

IL MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA, QUESTO SCONOSCIUTO di Claudio Bertoli

Quest'anno ricorre il 150 anniversario dell'invenzione del motore a scoppio da parte di Barsanti e Matteucci. A partire da una sintesi delle principali "tappe" dello sviluppo ultrasecolare del motore a combustione interna, verrà illustrato lo stato dell'arte delle varie tipologie di motore a combustione interna dopo l'ultima di queste rivoluzioni, dovuta al massiccio ingresso dell'elettronica digitale nel settore "automotive". Quest'evento, insieme allo sviluppo delle tecnologie di micromeccanica, ha reso il motore a combustione interna uno dei prodotti industriali a più rapido tasso d'evoluzione. Saranno tracciati quindi i contributi che la ricerca più fondamentale può dare alle numerosissime problematiche aperte.

INTRODUZIONE

Quest'anno ricorre il 150 anniversario dell'invenzione del motore a scoppio da parte di Barsanti e Matteucci. Spesso negli anni passati gli economisti, nel fare considerazioni sui diversi settori produttivi, hanno definito il settore della tecnologia automobilistica con il termine "maturo". Con tale termine, in maniera sintetica, si vuole intendere una tipologia industriale che dal punto di vista dell'innovazione di prodotto è giunta praticamente alla saturazione cui corrisponde un'enorme sproporzione tra gli investimenti richiesti ed il livello qualitativo e quantitativo dei miglioramenti sul prodotto indotti dall'innovazione stessa. In realtà quest'affermazione sembrerebbe scontata anche solo da un punto di vista storico. Il motore a combustione interna alternativo infatti già nei primi brevetti (Barsanti e Matteucci, Lenoir, Otto) è stato definito nei componenti fondamentali tutt'oggi presenti. Bisogna poi osservare che, dal punto di vista dell'intuizione del suo funzionamento certamente è molto più anziano.

Tuttavia, come tutte le invenzioni ad alto impatto sociale, sotto la spinta anche di eventi rilevanti da un punto di vista geo-politico quali crisi energetiche, problemi ambientali o di scoperte scientifiche fondamentali, il motore è passato attraverso una serie di

"rivoluzioni" che ne hanno fatto una delle macchine più studiate ed innovative.

GLI ANTESIGNANI

L'idea di ottenere lavoro meccanico dalla forza di un'esplosione risale certamente al 1600. Già nel 1678 infatti, Jean D'Hautefeuille pensò di utilizzare, per pompare l'acqua nei giardini del Re Sole, una macchina che sfruttava l'esplosione di polvere pirica in un cilindro all'interno del quale scorreva un pistone, su cui era depositata l'acqua da sollevare. Questi concetti ripresi poco dopo da C. Huygens e D. Papin, soprattutto per creare macchine in grado di realizzare il vuoto, non ebbero successo dal punto di vista pratico e spinsero verso l'utilizzo del vapore per realizzare macchine affidabili.

La carenza di conoscenze indispensabili nel campo della termodinamica frustrò certamente il lavoro di molti studiosi per tutto il 1700. A tal proposito è interessante che S. Carnot nelle sue *"Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a developper cette puissance"*, pubblicato nel 1824, riferisca che molti anni prima in Francia ci sia stato un interessante tentativo, dovuto a MM. Niepce, che aveva brevettato un apparecchio chiamato *"piréleophore"*. Tale apparecchio *"c'était un cylindre, muni d'un piston, où l'air atmosphérique était introduit a la densité ordinaire. L'on y projetait une*

matière très combustible réduite à un grand état de ténuité, et qui restait un moment en suspension dans l'air, puis on y mettait le feu. Il avait une sorte d'explosion et une dilatation subite du fluide élastique, dilatation que l'on mettait à profit en la faisant agir toute entière contre le piston ». E' chiaramente visibile che i principali elementi costitutivi del motore a combustione interna alternativo siano interamente presenti nell'invenzione di Niepce. Carnot conclude questa riflessione storica dichiarando che questa macchina, molto ingegnosa ed interessante soprattutto per la novità del principio, pecca però di un difetto fondamentale: la disponibilità di un combustibile adeguato. Infatti, il combustibile da utilizzare, ovvero la polvere di lycopodio (zolfo di natura vegetale), era estremamente costoso e poco diffuso. La sua principale applicazione era quindi destinata a rimanere confinata per l'impiego nei teatri, per creare le "fiammate" che sottintendevano un colpo di scena. Affermazioni di tal tipo, successivamente superate dal progredire della scienza e della tecnologia, hanno lastricato il lungo percorso del motore a combustione interna giustificando talvolta l'affermazione ricorrente che il motore fosse giunto al capolinea del suo travolgente processo di sviluppo.

I PRIMI MOTORI ALTERNATIVI A COMBUSTIONE INTERNA

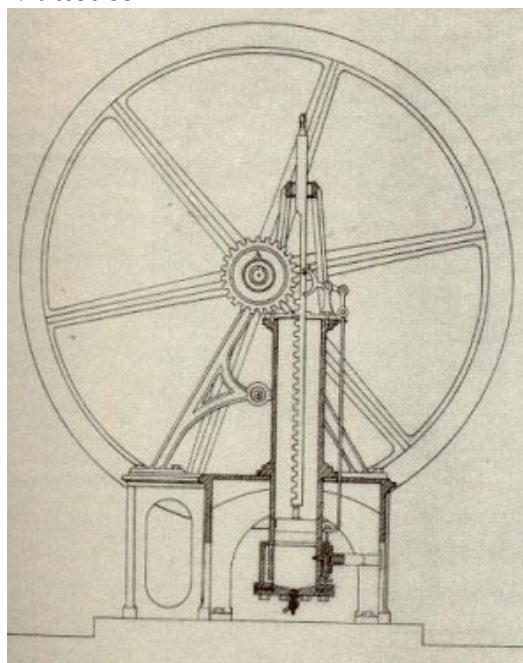
In una magnifica recente pubblicazione¹, cui si rimanda per specifici approfondimenti, E. Borchì ed altri hanno recensito con puntualità tutte le notizie che si hanno sugli inventori che, all'inizio dell'ottocento, hanno realizzato o concepito macchine a combustione interna. Tra questi numerosi sono Inglesi poiché tale paese all'epoca era certamente il più sviluppato tecnologicamente. Non si ha certezza del fatto che alcuni di questi

motori siano stati realmente costruiti. Merita comunque di essere ricordato W.Cecil che, in una memoria pubblicata nelle Transazioni Filosofiche di Cambridge nel 1857, afferma di aver fatto funzionare una macchina basata sul principio della combustione di una miscela d'aria ed idrogeno. Inoltre, in Italia, sembra che L. De Cristoforis avesse costruito nel 1841 una macchina atmosferica in cui il pistone veniva sospinto in alto da un'esplosione di una miscela di aria e vapori di olio combustibile. Comunque oggi è storicamente accertato che il primo esemplare di motore a combustione interna atmosferico, realmente funzionante e passibile di costruzione industriale, sia stato concepito e realizzato da due studiosi italiani: il prof. Padre Eugenio Barsanti e l'ing. Felice Matteucci (da non confondere col Prof. Carlo Matteucci insigne Fisico e Cattedratico Toscano vissuto nello stesso periodo).

Nel periodo che va dal 1851 al 1864 si sviluppa a Firenze, soprattutto nell'osservatorio Ximeniano, una ricerca sia sui principi di funzionamento che sulla realizzazione meccanica della nuova macchina di tipo atmosferico a combustione interna d'idrogeno sotto l'impulso delle conoscenze fisiche di Barsanti e delle geniali competenze meccaniche di Matteucci. Il 5 giugno del 1853, in una memoria depositata sigillata presso l'Accademia dei Gergofili, Barsanti e Matteucci espongono sinteticamente i principi del nuovo motore ed i risultati delle prime prove. Nel 1857 B&M ottennero il primo brevetto inglese e nel 1858 il nuovo motore fu brevettato anche in Francia.

¹ E. Borchì, R. Macii, G. Ricci: Barsanti e Matteucci, Lucca 2003.

Figura 1. Il Motore Barsanti e Matteucci



Il primo motore atmosferico (Fig.1), di tipo gravimetrico, era ad azione differita nella corsa di ritorno. Il pistone, per effetto della detonazione della miscela gassosa di idrogeno ed aria (provocata da una scintilla), veniva proiettato verso l'alto fin quando si arrestava per effetto degli attriti con il cilindro. La depressione generata nel cilindro, conservata grazie alla condensazione dei gas di combustione, nonché il peso proprio del pistone su cui agiva la pressione atmosferica, favorivano la corsa di ritorno che era sfruttata per produrre lavoro utile. Il meccanismo di conversione del moto alternativo del pistone in moto rotatorio sull'asse d'utilizzo era realizzato mediante una cremagliera, innestata sul pistone, che fuoriusciva dal cilindro ed impegnava un pignone che consentiva la conversione del moto. Un meccanismo a "scappamento" consentiva la rotazione dell'albero solo durante la corsa di ritorno del pistone.

Negli anni dal 1854 al 1864 il motore viene continuamente perfezionato al fine di aumentarne efficienza ed affidabilità e ne vengono costruite e brevettate diverse varianti.

La modernità dell'approccio scientifico del Prof. Barsanti è testimoniata nella frase conclusiva della memoria depositata all'Accademia dei Georgofili nel 1853: *"Non paghi di dedurre dalla sola esperienza la dimostrazione degli effetti di questa nuova forza, volemmo ancora valutarla colla teoria e col calcolo; ma senza più oltre diffonderci basterà accennare che ottenemmo risultati bastantemente concordi con quelli dedotti dalle esperienze"*.²

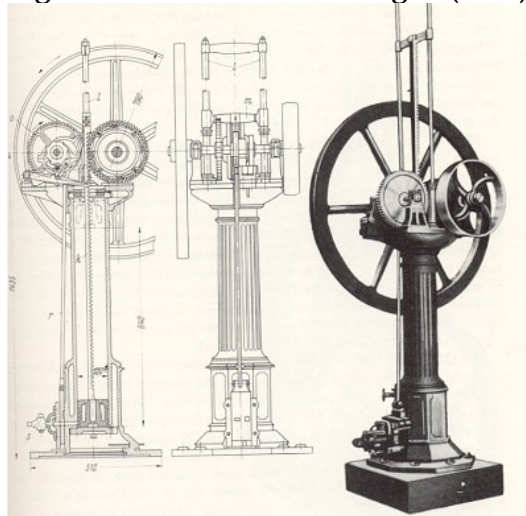
Nel 1864 la morte prematura di Barsanti in Belgio, dove si era recato per seguire direttamente la costruzione industriale del suo motore da parte della ditta Cockeril, ha certamente provocato l'oblio di queste prime realizzazioni, a favore della notorietà d'altri inventori Europei.

Già infatti in Francia, nel 1860, Etienne Lenoir conseguiva un brevetto per un motore "ad aria dilatata per mezzo della combustione di gas". Il maggior grado di sviluppo tecnologico della Francia rispetto al neonato Regno d'Italia, consentì immediatamente a Lenoir di fabbricare un numero elevato (circa 400 esemplari) del motore con varie taglie di potenza fino a 3 kW. Il motore Lenoir sfruttava la già avanzata tecnologia delle macchine a vapore da cui derivava. Era infatti ad azione diretta ed era alimentato da una coppia di cassette di distribuzione per l'aspirazione della miscela e per l'espulsione dei gas di scarico. Certamente a Lenoir va riconosciuto il merito di aver adattato il motore a combustione interna ad un'**automobile** che fu realizzata nel 1863, probabilmente per la prima volta al mondo.

² In molti dei lavori attuali che, mediante calcoli termofluidodinamici tridimensionali, analizzano fenomenologie assai complesse di combustione e generazione di inquinanti nei motori possono leggersi affermazioni di questo tipo!.. Infatti, la complessità teorico-sperimentale della termofluidodinamica reattiva non consente, allo stato attuale delle conoscenze, la possibilità di calcolare i processi che avvengono nei motori a c.i. in modo completamente predittivo.

Tuttavia a ben altro successo industriale e rinomanza storica era destinato il lavoro di un altro inventore: il tedesco Nikolaus August Otto.

Figura 2. Il motore Otto-Langen (1867)



Otto nel 1864, insieme all'ingegnere meccanico Langen, brevettò un motore a combustione interna atmosferico molto simile (se non identico!) a quello di Barsanti e Matteucci. Il motore fu presentato in una versione perfezionata (Fig.2) nel 1867 all'esposizione di Parigi dove ottenne la medaglia d'oro. Il successo (per la verità immeritato in quanto il motore era un'evidente copia di quello di Barsanti e Matteucci) spronò Otto a proseguire i suoi studi ed egli sviluppò una versione del motore modificata nel ciclo termodinamico nel 1876. In pratica Otto aveva introdotto il ciclo cosiddetto a 4 tempi. Nella tabella 1 è riportato un confronto con la macchina atmosferica da cui si deduce il sostanziale progresso ottenuto con il ciclo a 4 tempi.

Tabella 1. Confronto motori tra motore atmosferico e motore 4 tempi

Prestazioni	Atmosferico	4 tempi
Potenza (hp)	2	2
Peso (kg)	1815	570
Cilindrata (inc.^3)	400	310
Velocità (rmp)	90	160
rendimento mecc. %	68	84
Rendimento globale %	11	14
Rapporto di espansione	10	2,5

Questa versione del motore ebbe un notevole successo anche industriale. Nel primo decennio ne furono costruiti circa 50.000 esemplari anche negli Stati Uniti in cui era stato importato nel 1878. Nel 1882, l'Università di Würrzburg conferì ad Otto la laurea *honoris causa* per aver inventato il motore che porta il suo nome.³

³ Per completezza storica e correttezza scientifica, bisogna però ricordare che il brevetto del ciclo cosiddetto Otto fu revocato nel 1886 quando, in Francia, fu riportato alla luce un precedente studio, dovuto a Beau de Rochas che nel 1862 aveva pubblicato una memoria in cui era dettagliatamente descritto il ciclo a 4 tempi.

Figura 3. Prima vettoretta di Maybach e Daimler 1885



Verso la fine dell'Ottocento il motore a combustione interna diviene una realtà industriale sempre più perfezionata e si sviluppa in modo sorprendente e travolgente:

Nel 1881 Dugald Clerk brevettò il ciclo del motore a due tempi seguito rapidamente dalla prima costruzione di Karl Benz in Germania.

Nel 1885 W. Maybach costruisce il **primo motore con alimentazione a benzina** ed un carburatore rudimentale. Il motore bicilindrico a V, con una potenza di circa 1 kW ed una cilindrata di "soli" 962 cc, ha equipaggiato la prima auto tedesca di Maybach e Daimler (Fig.3). Questa soluzione d'alimentazione del motore era destinata a prendere il sopravvento sulle altre entro la fine del secolo.

Rapidamente ci si avvicina ad un'altra pietra miliare nello sviluppo del motore a combustione interna.

A partire infatti dal 1885 uno studioso tedesco, Rudolf Diesel nato a Parigi nel 1858 da genitori tedeschi aveva cominciato gli studi che lo portarono all'invenzione del motore che ha rivoluzionato tra l'altro la storia della propulsione navale e come vedremo più recentemente anche di quella terrestre.

In realtà Diesel era interessato ad aumentare sostanzialmente il rendimento del motore a combustione interna attraverso un forte aumento del rapporto di compressione. Egli quindi intuì che quest'obiettivo era raggiungibile solo se, durante la fase compressione nel cilindro motore fosse presente solo l'aria precedentemente aspirata, come forse anticipato nella memoria di S. Carnot del 1824. Nella già citata memoria si fa accenno infatti alla possibilità di realizzare una macchina in cui la compressione dell'aria fosse tale da indurre l'autoaccensione della miscela. Tuttavia Carnot aveva calcolato di comprimere il volume iniziale solo fino ad un quarto dello stesso rimanendo quindi

sostanzialmente fuori dal campo di interesse per l'autoaccensione.

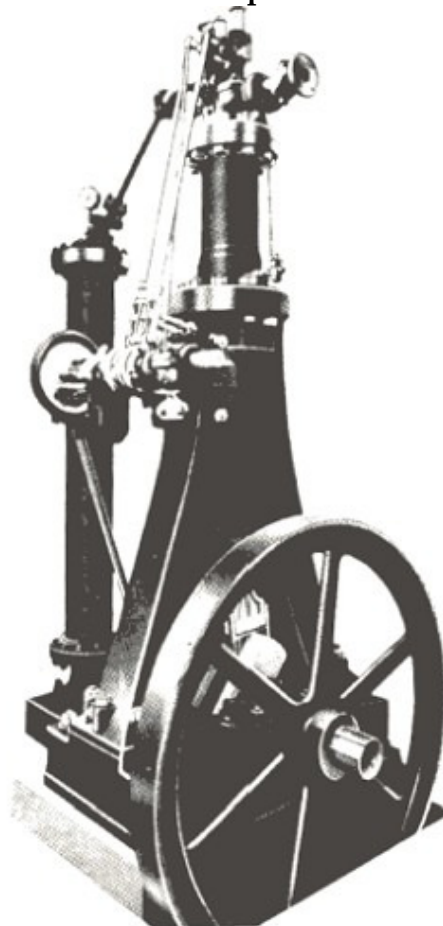
Il 28 febbraio del 1892 Diesel ottenne, prima in Germania e subito dopo in Inghilterra (pt. No. 7241), il primo brevetto meglio illustrato in una successiva memoria del 1893. La macchina era ispirata ai seguenti concetti innovativi:

Adozione di un rapporto di compressione elevatissimo per l'epoca tale da ottenere l'autoaccensione della miscela.

Iniezione di combustibile alla fine della corsa di compressione.

Possibilità di bruciare combustibili di natura diversa incluso, il polverino di carbone.

Figura 4. Il motore realizzato da Diesel nel 1897 che prese il suo nome



Bisogna osservare che, nel periodo 1885-90 in Inghilterra, H. Ackroyd Stuart aveva ottenuto diversi brevetti mirati a

risolvere il problema dell'accensione precoce nei motori ad olio combustibile. In uno di essi (pt. No. 7146) nel 1890 aveva già percorso l'ipotesi di ottenere la compressione dell'aria e la successiva iniezione del combustibile. Tuttavia, Ackroyd Stuart non proponeva di elevare le temperature di compressione sino all'autoaccensione della miscela. Egli, infatti, proponeva l'uso di una precamera riscaldata autonomamente per ignire il combustibile iniettato.

Va quindi interamente riconosciuta a Diesel la concezione del nuovo motore avvenuta, per la verità, più in maniera empirica che basandosi su di una teoria. Nella sua memoria iniziale Diesel commise alcuni evidenti errori teorici. Non era infatti possibile realizzare da un punto di vista pratico, come scriveva Diesel, un ciclo termodinamico di Carnot ne, come descritto nel successivo brevetto, un ciclo in cui l'adduzione di calore avvenisse (tutta) a pressione costante. Le ragioni di questi errori vanno ricercate nel fatto che, all'epoca, non erano ancora noti i meccanismi fondamentali dell'autoaccensione dei combustibili. Solo nel 1935 Semenov (premio Nobel per la Chimica nel 1956) chiarì i principali meccanismi di questa fenomenologia che, come si vedrà nel seguito, verrà sfruttata ai giorni nostri per realizzare sistemi di combustione innovativi.

Il primo prototipo costruito esplose al primo avviamento ferendo lo stesso Diesel. Tuttavia egli non demorse e, dopo tre anni di lavoro, nel 1897 (fig.4), presentò un motore 4 tempi che sviluppava 25 Cv a 198 giri al minuto. La macchina aveva un rendimento globale del 25%, quasi doppio di quello di tutti i motori dell'epoca. La notizia ebbe una notevolissima risonanza nell'ambiente tecnico ed anche in quello militare.

Diesel riuscì quindi a difendere il suo brevetto in una serie di dispute che terminarono solo nel 1898, con la vittoria su E. Capitaine che rivendicava anch'egli la scoperta di questo nuovo motore. Successivamente:

- 1898 Diesel cede una licenza del Motore ad un birraio americano (A.Bush) per la produzione in serie del motore negli Stati Uniti;
- 1903 Viene per la prima volta applicato il nuovo motore su di un battello fluviale in Francia;
- 1905 La ditta Sulzer costruisce il primo Diesel Marino reversibile;
- 1910 Diesel ottiene la medaglia d'oro all'esposizione di Bruxelles.

E' interessante osservare che Diesel lesse una memoria, nel marzo del 1912, presso l'Institution of Mechanical Engineers, in cui riferì di aver realizzato per scopi sperimentali un motore 4 cilindri da 30 Cv di basso peso per applicazioni automobilistiche o, nella versione reversibile, da naviglio leggero. Nel 1913 Diesel nel recarsi in Inghilterra su convocazione dell'Ammiragliato Inglese scomparve misteriosamente in mare. La convocazione era probabilmente legata alla possibile applicazione di motori Diesel sui sommergibili.

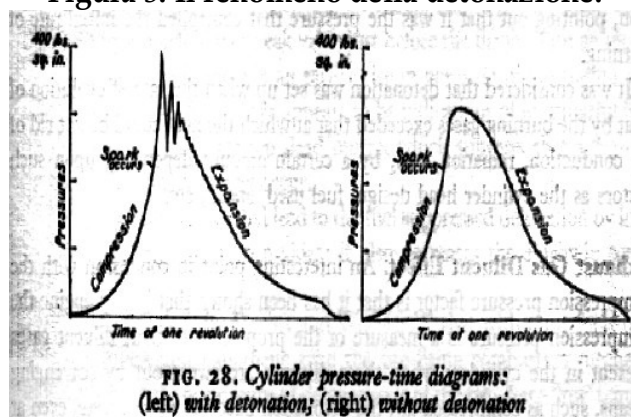
LO SVILUPPO DEL MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA NEL NUOVO SECOLO

Come si è già accennato, la tecnica motoristica nel nuovo secolo compie un balzo da gigante. Vengono costruiti motori sempre più leggeri, potenti ed affidabili. Viene tra l'altro presto intuito il potenziale d'applicazione del nuovo motore per scopi bellici oltre che per il trasporto. In un magnifico libro autobiografico Harry Ricardo (1885-1974), pioniere della ricerca motoristica, delinea l'intreccio tra studio teorico e sperimentazione che è alla base di questi sviluppi fino e durante la prima guerra mondiale. Si deve tener presente che la diffusione della motorizzazione privata e l'affermazione dei derivati petroliferi quale combustibile per i nuovi motori crearono dei problemi di disponibilità delle benzine già a partire dai primi anni del 1900. Infatti la domanda di

distillati leggeri crebbe nel mondo di cinque volte nel periodo dal 1907 al 1914. Questo problema fu risolto "solo" nel 1912 quando W. Barton introdusse il processo di *cracking* catalitico per la produzione delle benzine. Ma il vero problema (anche a causa della scarsa conoscenza dell'interazione tra qualità del combustibile e combustione nel motore) che ha condizionato l'incremento di rendimento del motore ad accensione comandata è quello oggi chiamato detonazione. Si tratta di quella fenomenologia comunemente definita

"battito in testa" che produce, a livello di sensazione esterna, un caratteristico rumore metallico che ne evidenzia l'insorgere. In realtà, come si evidenzia da un diagramma tratto da un vecchio testo di motori, si tratta di una fenomenologia di combustione anomala e distruttiva, che involve una fisica-chimica molto complessa e che tende a far ignire precocemente una piccola parte della miscela ed a provocare le oscillazioni di pressione evidenziate nel diagramma pressione-volume (fig. 5).

Figura 5. Il fenomeno della detonazione.



Il Prof. Hopkinson di Cambridge impostò una ricerca su questo specifico fenomeno, che condusse insieme al suo giovane assistente (H. Ricardo per l'appunto). Con molta onesta intellettuale Ricardo, cui viene riconosciuto il merito di aver per primo compreso l'essenza del fenomeno della detonazione ed anche l'influenza sullo stesso della turbolenza, ammette che la genialità di Hopkinson lo avesse spinto su questa intuizione. La

prima guerra mondiale spinge moltissimo la ricerca sia sui motori ad accensione comandata (ormai utili per gli aerei caccia e per i carri armati), migliorandone ulteriormente sia il processo di combustione sia il disegno meccanico.

A partire dal primo dopoguerra il motore a combustione interna è ormai divenuto la macchina dominante per le applicazioni terrestri (con l'esclusione della trazione ferroviaria), navali ed aeree.

Figura 6. Caccia Spitfire (1940)



Nel 1923 i laboratori di ricerca della General Motors, sempre lavorando sul problema della detonazione, misero a punto l'additivo a base di piombo tetraetile che ha consentito di elevare la capacità ottanica delle benzine continuamente, nel periodo tra le due guerre. Ciò ha quindi consentito la costruzione di motori ad accensione comandata con rapporto di compressione più elevato e quindi più efficienti e leggeri. Si ricorda che negli anni del II conflitto mondiale i motori alternativi dei caccia avessero ormai raggiunto potenze strabilianti. Il famoso caccia inglese Spitfire (fig.6), dominatore nel 1940 della battaglia d'Inghilterra, montava (nella versione Mk1A) un motore Rolls Royce Merlin da oltre 1000 Cv di potenza e che, alla fine del conflitto, era arrivato quasi a 2000 CV.

Sempre negli anni venti R. Bosch brevettò, in Germania, la prima pompa d'iniezione meccanica per motori Diesel. A partire da quegli anni, i tecnici tedeschi hanno continuamente perfezionato il motore diesel consentendone le prime applicazioni stradali (fig.7).

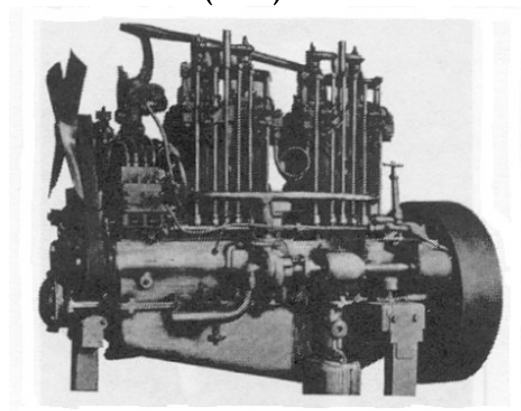
La prima vettura Diesel fu costruita dalla Mercedes nel 1936 ed era motorizzata con un motore precamera da circa 2,8 l di cilindrata.

Nel dopoguerra e fino ai primi anni 50 il motore ha una fase di sviluppo che potremmo definire quasi-stazionaria dal punto di vista della comprensione dei fenomeni chimico-fisici che avvengono al suo interno. Va però ricordata una

fondamentale applicazione del motore 2 tempi avvenuta in Italia nel 1947. Dal sito ufficiale della Piaggio si legge:

“È passato più di mezzo secolo da quel 23 aprile 1946, quando Piaggio depositò a Firenze il brevetto per «Motocicletta a complesso razionale di organi ed elementi con telaio combinato con parafanghi e cofani ricoprenti tutta la parte meccanica».

Figura 7. Primo Motore diesel Benz 4 cilindri 37 kW (1921)



Corradino D'Ascanio aveva progettato un veicolo a due ruote completamente nuovo e, per l'epoca, rivoluzionario siglato provvisoriamente "Prototipo MP6", ma prontamente ribattezzato Vespa dallo stesso Enrico Piaggio. Ciò che è accaduto da quel giorno fa parte ormai della storia. Vespa non è soltanto uno scooter, ma si è ben presto affermato come "lo" scooter. È un mito costruito su oltre quindici milioni di veicoli prodotti e venduti in tutto il mondo. Che sono serviti non solo a motorizzare interi Paesi, ma anche ad

accomunare popoli di lingue e di culture diverse. Vespa è una parola, anzi un concetto, assolutamente internazionale che rappresenta i sogni e il desiderio di libertà di intere generazioni”.

Sempre poi come applicazione del ciclo a due tempi bisogna ricordare l'enorme successo dei motori *diesel* 2 tempi navali che, ancor oggi, con potenze dell'ordine di decine di migliaia di kW dominano il campo della trazione navale di grosso tonnellaggio. Si può senz'altro affermare che tali motori siano quelli che hanno il primato della macchina prima con il rendimento più elevato tra tutte quelle costruite dall'uomo.

Lo sviluppo della motorizzazione di massa in Europa ed in Giappone, sulla falsariga di quanto è già avvenuto negli USA, è nei primi anni 60 un fatto ormai compiuto. La diffusione dei veicoli ha però fatto nascere in maniera evidente il problema dell'inquinamento atmosferico prodotto dal motore a combustione interna.

Il problema si è manifestato già a Los Angeles nel 1943. Infatti, come si può osservare dalla tabella 2, nel 1940 il parco

di veicoli circolante in California era dell'ordine di un veicolo per ogni tre abitanti.

Riprendendo le parole sul sito dell'Agenzia di Protezione dell'Ambiente Californiana:

1943 - *First recognized episodes of smog occur in Los Angeles in the summer of 1943. Visibility is only three blocks and people suffer from smarting eyes, respiratory discomfort, nausea, and vomiting.*

1945 - *The City of Los Angeles begins its air pollution control program, establishing the Bureau of Smoke Control in its health department.*

1947 - *California Governor Earl Warren signs into law the Air Pollution Control Act, authorizing the creation of an Air Pollution Control District in every county of the state.*

1959 - *California enacts legislation requiring the state Department of Public Health to establish air quality standards and necessary controls for motor vehicle emissions.*

1966 - *Auto tailpipe emission standards for hydrocarbons and carbon monoxide are adopted by the California Motor Vehicle Pollution Control Board.*

Tabella 2. Veicoli circolanti in California

Anno	Popolazione (milioni)	Veicoli (milioni)
1940	7	2,8
1960	16	8
1970	20	12
2000	34	23,4

Nel 1952 Haaghen-Smith dimostrò il meccanismo di interazione della radiazione solare sulle emissioni di idrocarburi incombusti (HC) e di ossidi di azoto (NOx) e, nel 1966, vennero introdotte le prime limitazioni alle emissioni inquinanti dei veicoli in California. Nel 1970 viene pubblicato il primo *Clean Air Act* e la legislazione antinquinamento assume carattere federale negli USA. Nello stesso anno viene introdotta sul mercato la benzina

senza piombo (questo componente avvelena il catalizzatore) e quindi viene spianata la strada all'uso di sistemi catalizzati di abbattimento delle emissioni allo scarico dei motori ad accensione comandata.

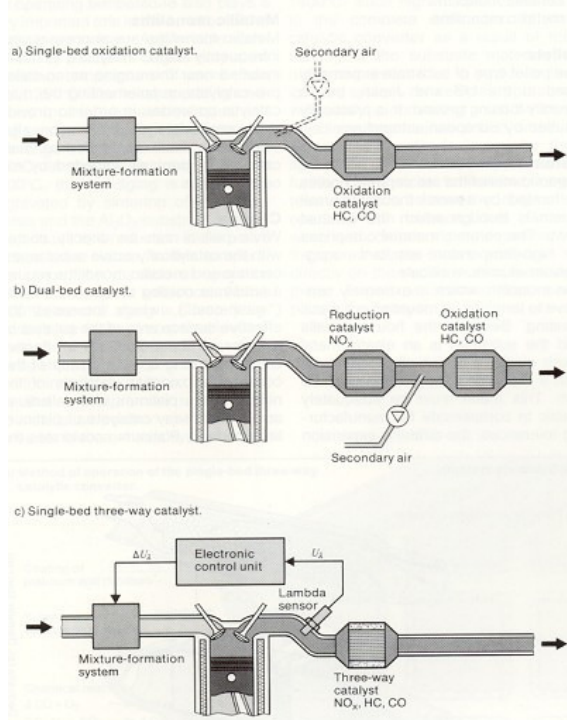
Dagli schemi di figura 8 si vede come sia evoluto negli anni il *layout* del motore. Dai sistemi primi passivi di ossidazione catalitica di CO ed HC, si è passati al catalizzatore a tre vie con regolazione elettronica dell'iniezione contro-reazionata

da una sonda (Lambda) che consente al motore di funzionare in uno strettissimo intervallo intorno al valore stechiometrico del rapporto tra aria e combustibile. Anche in Europa, a partire dal 1970, si attuano disposizioni legislative atte a ridurre le emissioni inquinanti allo scarico dei veicoli.

Nel diagramma di figura 9 è riportata l'evoluzione della legislazione Europea negli anni. Si può osservare come, dalla fine degli anni 90, l'interesse della stessa si sia maggiormente rivolto anche a

contenere i consumi di combustibile per controllare l'immissione di gas serra (CO_2) nell'atmosfera. Infatti, i Costruttori Europei di vetture, hanno siglato un accordo con l'U.E. che prevede una diminuzione dei consumi di combustibile sul parco circolante medio del 15%, rispetto ai valori rilevati nel 1995, entro il 2005 e del 20% entro il 2010. La tecnologia motoristica si è quindi orientata verso soluzioni di motore che accoppiassero bassi consumi e limitate emissioni inquinanti.

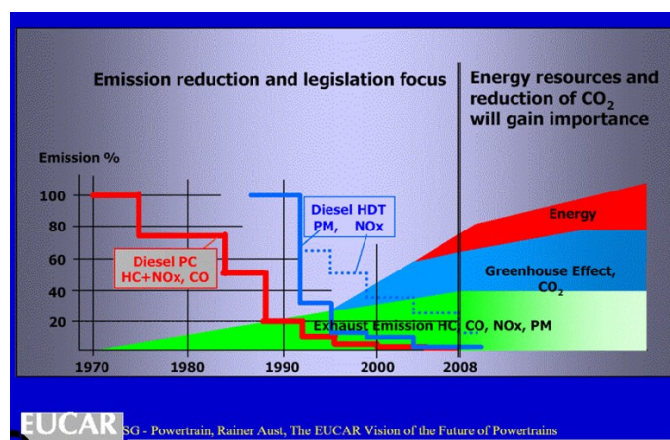
Figura 8. Evoluzione degli schemi controllo delle emissioni mediane catalizzatori allo scarico



L'evoluzione del motore Diesel ha giocato in questo scenario un ruolo centrale. A tal proposito va ricordato che il motore diesel precamera a turbolenza (brevetto Ricardo del 1936) ha cominciato a sfondare sul mercato delle vetture, a

partire dalla seconda metà degli anni settanta allorchè la Volkswagen presentava la Golf Diesel, che è stata la prima vettura a gasolio con larghissima diffusione sul mercato.

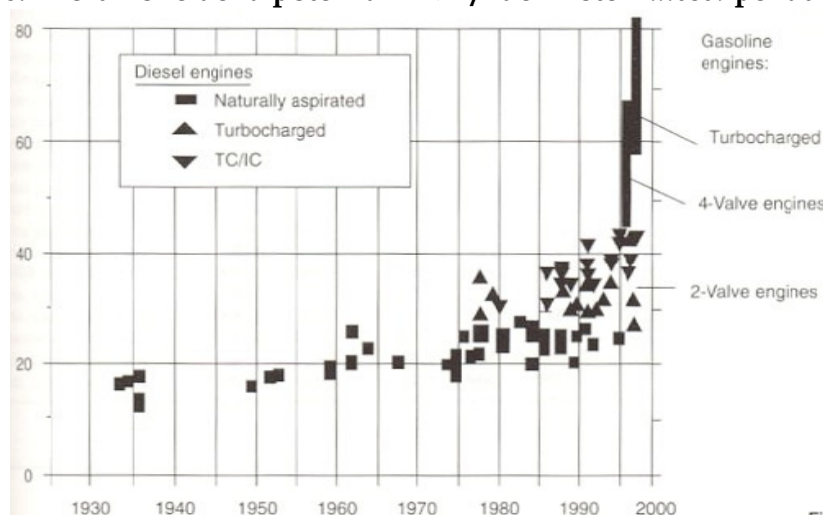
Figura 9. Evoluzione della legislazione Europea sulle emissioni e sua focalizzazione (Fonte EUCAR)



Tuttavia i veri vantaggi sui consumi di combustibile erano ipotizzabili con l'adozione del sistema di combustione ad iniezione diretta che, già applicato nella trazione pesante e navale, non si sapeva

però realizzare per le ridotte dimensioni della camera di combustione necessarie per i motori di bassa cilindrata unitaria. In questo settore la ricerca italiana ha avuto un ruolo determinante.

Figura 10. Evoluzione della potenza in kW/l dei motori *diesel* per autovettura

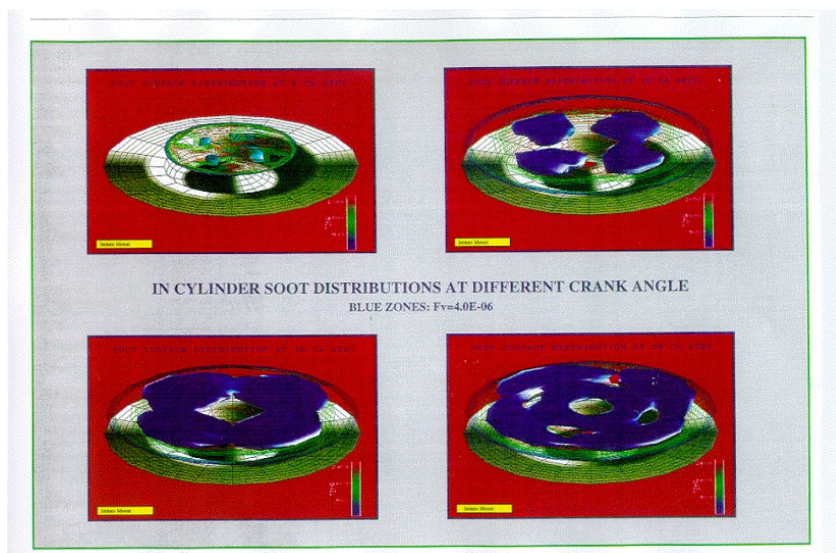


Il CNR nel 1975, nell'ambito del Progetto Finalizzato Energetica, avvia una ricerca sull'applicazione di motori *diesel* ad iniezione diretta nella trazione automobilistica. Il lavoro si conclude all'inizio degli anni '80 con alcuni prototipi funzionanti.

Verso la fine di questo decennio il Gruppo FIAT produce il primo motore *diesel* ad iniezione diretta per autovettura al mondo (Croma I.D.) che chiameremo,

per comodità, motore di prima generazione. Immediatamente i vari Costruttori Europei adottano il motore ad iniezione diretta che inizia la sua ascesa attraverso una seconda generazione, in grado di rispettare le più severe normative previste anti-emissioni per il 1992. Ciò è stato certamente facilitato dallo sviluppo notevolissimo della fluidodinamica computazionale a partire dalla fine degli anni '80.

Figura11. Calcoli tridimensionali del processo di formazione della fuliggine in un Diesel



Il motore numerico, ancora oggi richiede intensa attività di ricerca ma senz'altro può già considerarsi un valido aiuto allo sperimentatore (Fig.11).

Figura 12. L'Apparato d'iniezione Common Rail della Bosch



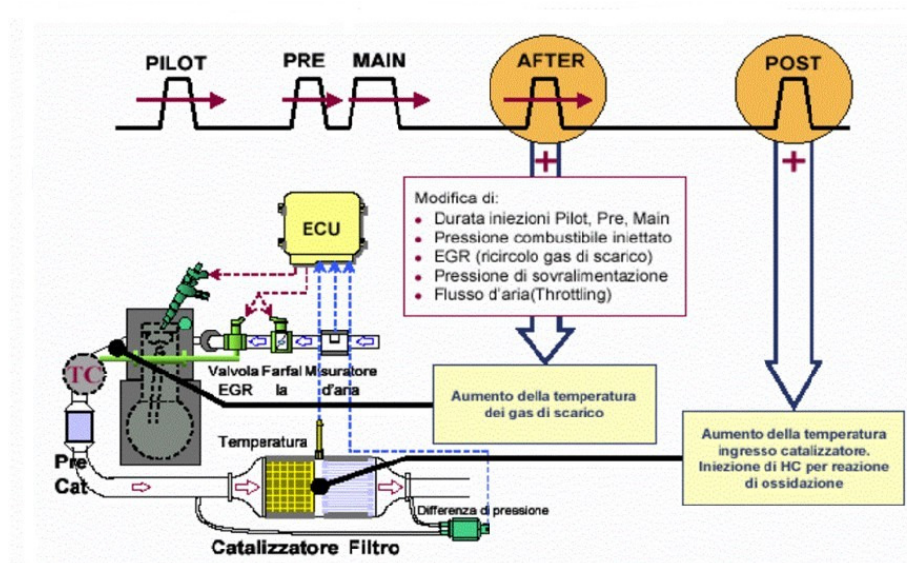
Figura 13. Layout di un motore Diesel iniezione diretta di IV generazione con apparato common rail avanzato e trappola di particolato (Fonte: Centro Ricerche FIAT)

Tuttavia il vero salto tecnologico del *diesel* si presenta nel 1997, con la comparsa sul mercato della prima vettura FIAT (AR 156) equipaggiata con il rivoluzionario apparato d'iniezione *Common rail* (terza generazione di motori). Il Centro Ricerche FIAT, che aveva sviluppato quest'apparato d'iniezione a partire dal 1990, aveva infatti ceduto, nel 1994, alla Bosch i brevetti per l'industrializzazione dello stesso.

Sempre la Ricerca Italiana, ha sviluppato la seconda generazione d'apparati *Common Rail*, che consentono di dosare il combustibile in più iniezioni nello stesso ciclo motore.

Con l'introduzione delle trappole di particolato, il motore assume la configurazione di figura 13, in grado di soddisfare alle più severe normative previste per il 2006.

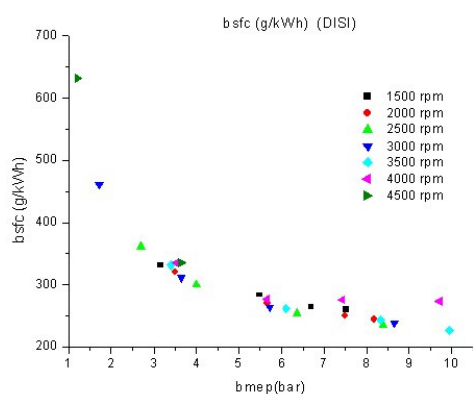
Si deve infine ricordare che, sempre per limitare i consumi, anche il motore ad accensione comandata si è evoluto verso la soluzione ad iniezione diretta di benzina (fig.14).



LE NUOVE SFIDE: I MOTORI CON EMISSIONI "NEAR ZERO"

I veicoli ad emissioni equivalenti allo zero sono stati definiti come quelli che, operando in Los Angeles, generano emissioni inferiori a quelle specifiche generate per produrre l'energia necessaria per il funzionamento di un equivalente veicolo elettrico. In Europa, per convenzione, si assumono per equivalenti allo zero (EZEV) emissioni che siano la decima parte dei valori EURO III in vigore dal 2001.

Figura 14. Consumi specifici di un prototipo DISI da due litri in grado di soddisfare il limite di emissione di 140 g/km per la CO₂



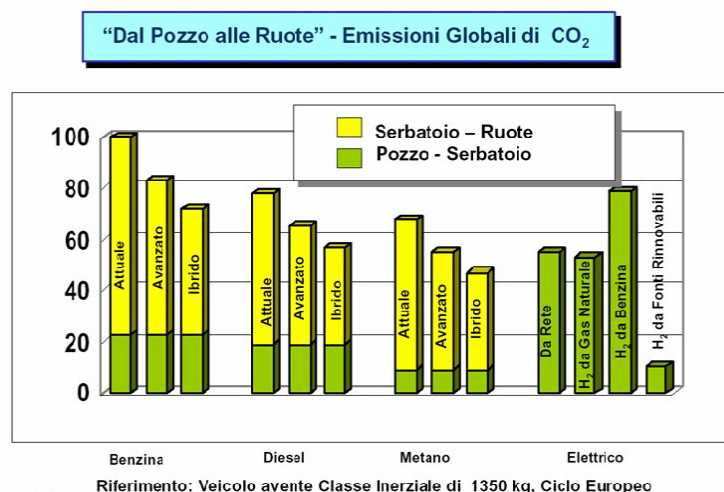
Tale limite ha un valore puramente teorico poiché lo stesso appare essere probabilmente al di sotto della soglia di misurabilità delle emissioni allo scarico, con l'attuale metodologia di prova.

Per raggiungere questo limite possono esservi diverse vie che i laboratori di ricerca stanno esplorando. Lo sviluppo di nuove tecnologie di combustione, concomitantemente con l'applicazione del concetto di motore ibrido ai diversi tipi di propulsore, costituisce certamente una concreta possibilità per realizzare veicoli con emissioni EZEV.

Infatti è noto che i nuovi motori a bassissimo impatto ambientale tendenzialmente esibiscono consumi di combustibile maggiori rispetto all'ultima generazione di motori a combustione interna. La tecnologia del veicolo ibrido può risolvere questo problema. Tale ultima tecnologia è naturalmente soprattutto mirata all'ulteriore contenimento dei consumi di combustibile. Un veicolo ibrido in sostanza, è un veicolo in cui s'integrano, per la trazione, sia un motore elettrico ed il relativo sistema d'accumulo (batterie) che il motore a combustione interna. Naturalmente è possibile affrontare questo problema con gradi di complessità dell'architettura complessiva del veicolo (e naturalmente costi) crescenti. Tuttavia

anche con livelli di sofisticazione medi è possibile ottenere risultati notevoli.

Figura 15. Emissioni globali di CO₂ per diversi propulsori. (Fonte CRF)



Engine Division

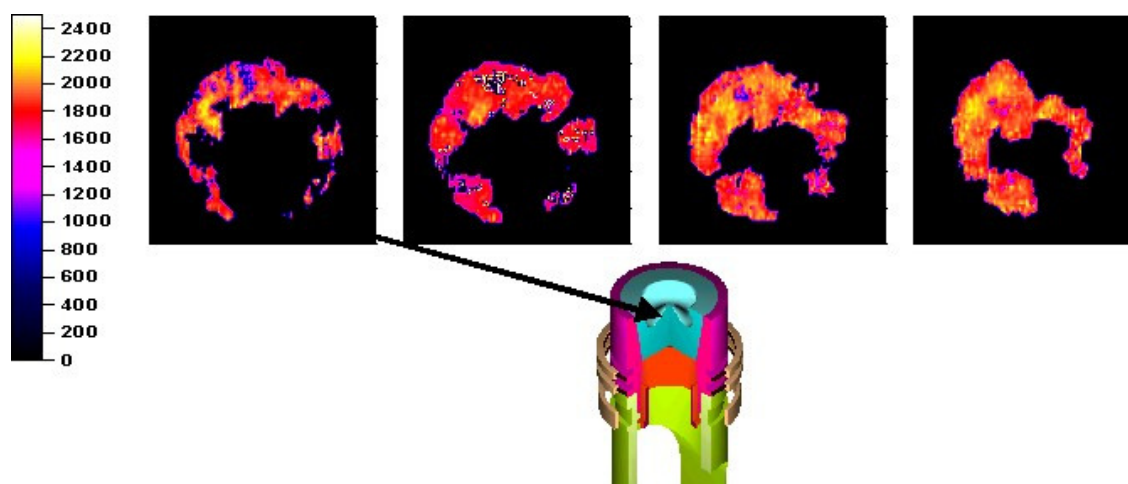
Nel diagramma di fig. 15 sono comparate le emissioni di CO₂ ovvero i consumi di diversi tipi di motorizzazione con il concetto di emissioni "dal Pozzo alle Ruote".

Le motorizzazioni prevedono propulsori *Diesel*, ad accensione comandata con alimentazione a benzina, e ad accensione comandata con alimentazione a metano. Si assume pari a 100 il livello di consumo degli attuali motori alimentati a benzina con iniezione elettronica nel condotto di aspirazione. Nella parte destra del diagramma sono riportate anche le soluzioni con propulsione elettrica pura (da rete) e quelle ibride, basate sull'uso di celle a combustibile il cui combustibile (idrogeno) è derivato da diverse fonti. Se si esaminano le

possibilità offerte dalle moderne tecnologie si arriva alla conclusione che, anche a prescindere da problemi legati al costo dell'applicazione, il bilancio della CO₂ è favorevole all'idrogeno solo se lo stesso è ottenuto da fonti rinnovabili. Appare quindi molto probabile che il motore termico, naturalmente evoluto ulteriormente, abbia ancora un notevole potenziale di sviluppo, anche solo dal punto di vista temporale.

Naturalmente si tratterà di investire in ricerca per l'individuazione applicativa di nuove modalità di gestione del processo di combustione. Per comprendere in modo banale la filosofia di fondo dei sistemi di combustione innovativi basta osservare i rilievi sperimentali di figura 16.

**Figura 16. Rilievi di temperatura di Fiamma in un motore da ricerca *Diesel*
Common rail con accessi ottici**

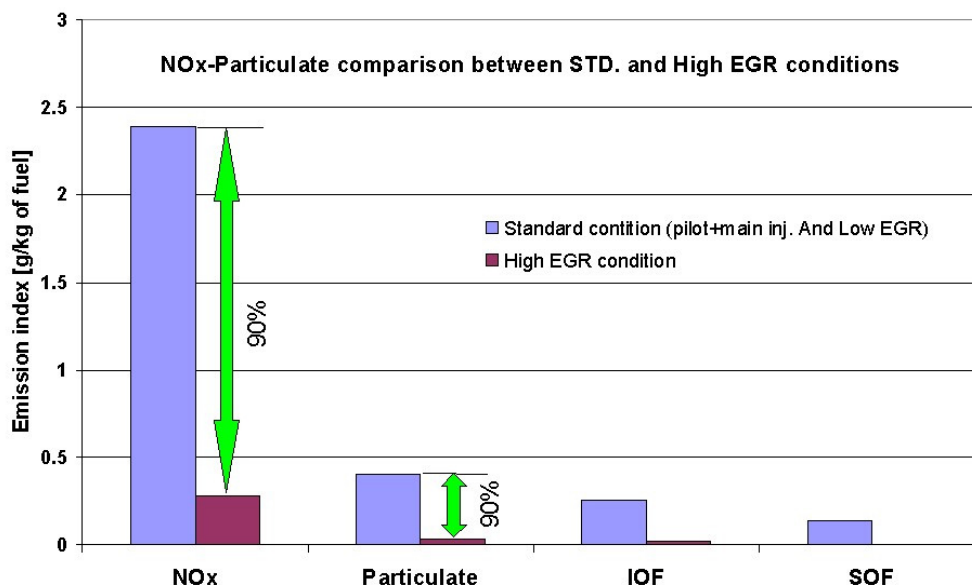


Tali rilievi sono stati effettuati, durante la fase di espansione, con tecniche ottiche in un motore da ricerca con accessi ottici e sistema d'iniezione common rail avanzato. Si può osservare dalla rappresentazione che, in camera di combustione esistono zone ad alta temperatura (max. 2400 K) abbastanza concentrate dal punto di vista spaziale. Applicando l'equazione di stato, a partire dai rilievi di pressione di combustione media corrispondenti ai tempi delle varie visualizzazioni, si può immediatamente rilevare che le temperature medie termodinamiche ottenute sono molto più basse (< 2000 K). Al di sotto di tali temperature la cinetica di formazione della fuliggine e degli ossidi di azoto subisce drastiche riduzioni di velocità. Se si riuscisse quindi a realizzare processi di combustione a bassa temperatura, efficaci un ampio intervallo di condizioni operative del motore, si otterrebbero motori intrinsecamente "puliti". A riprova di quanto detto nel diagramma di figura 17, sono confrontate le emissioni inquinanti, in uno specifico punto del piano di prestazioni, di un

motore Diesel avanzato e dello stesso ma allestito con un sistema di combustione a bassa temperatura.

Naturalmente è richiesto ancora molto lavoro di ricerca per rendere stabile e funzionale un sistema di combustione di tal tipo, ma la strada appare notevolmente promettente. La tecnologia motoristica ha reso infatti disponibili una serie di sottosistemi quali il controllo elettronico della distribuzione, quello dell'apparato di alimentazione, del turbocompressore etc. Con l'uso di tali sistemi si potranno ottenere motori in cui è possibile variare, durante il funzionamento le condizioni fluidodinamiche e termodinamiche all'aspirazione, il rapporto di compressione, la parzializzazione della cilindrata e tutte le caratteristiche d'alimentazione del combustibile. Insomma si potrà disporre di un sistema totalmente flessibile in grado di esibire consumi ridotti ed emissioni quasi zero. Infine si potrà adattare uno stesso motore a funzionare con combustibili di derivazione diversa.

Figura 17. Vantaggi ottenibili con il controllo della temperatura di fiamma sulle emissioni



CONCLUSIONI

Nel lungo termine, probabilmente alla fine di questo secolo, la cosiddetta civiltà dell'idrogeno cambierà anche lo scenario delle tecnologie motoristiche. Tuttavia a mio avviso il motore a combustione interna rimarrà probabilmente la macchina dominante ancora per questo secolo. Esso infatti, per flessibilità nell'utilizzo e differenziazione delle applicazioni, non ha trovato ancora degni

successori. Inoltre gli scenari di sviluppo che la ricerca scientifica mostra per tale macchina fanno intravedere un'evoluzione maggiore di quella avuta negli ultimi 150 anni i cui contorni, anche socio economici, non sono oggi prevedibili. E' incredibile affermarlo ma la conoscenza dei fenomeni chimico fisici che avvengono in un motore a combustione interna moderno è ancora da assestare in gran parte. Il motore resterà ancora uno "sconosciuto" per qualche tempo.

CLAUDIO BERTOLI

Dirigente di ricerca presso l'Istituto Motori del CNR e responsabile del reparto motori diesel e combustibili.

Contatti:

CNR Istituto Motori
tel. 081-7177104

Via Guglielmo Marconi 8 80125 Napoli
E.mail: c.bertoli@im.cnr.it fax 081-2396097