

56° Congresso Nazionale ATI
Napoli 10-14 settembre 2001

OTTIMIZZAZIONE DELL'ANTICIPO D'ACCENSIONE ED EMISSIONI NO_x

Alberto Beccari

Marco Cammalleri

Beniamino Drago

Emiliano Pipitone

Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica – Università di Palermo

SOMMARIO

Le emissioni inquinanti di un motore ad accensione comandata sono essenzialmente costituite da monossido di carbonio CO, idrocarburi incombusti HC ed ossidi di azoto NO_x. Questi ultimi si suddividono in monossido di azoto NO e biossido di azoto NO₂ anche se sperimentalmente si è osservato che il biossido di azoto costituisce una percentuale trascurabile delle emissioni totali NO_x (2-5%, vedi Figura 1, [1]), per cui si può limitare l'osservazione delle emissioni legate all'azoto al solo contributo di NO.

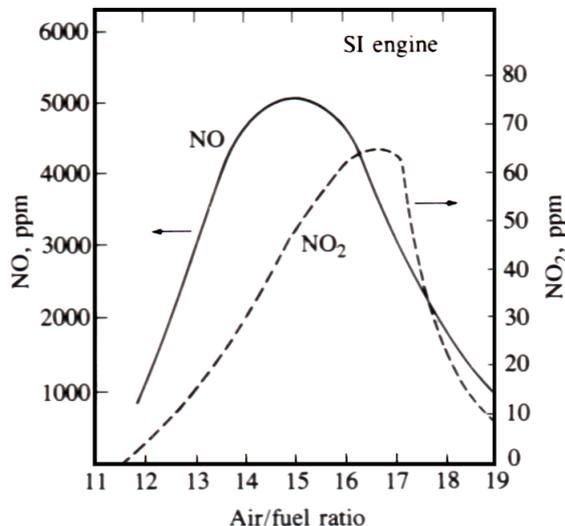


Figura 1.- Emissioni di NO ed NO₂ in condizioni WOT a 1500 rpm in funzione della dosatura, [1]

Il meccanismo di formazione dell'ossido NO a partire dall'azoto introdotto con l'aria è governato da reazioni chimiche del tipo $O + N_2 = NO + N$, $N + O_2 = NO + O$, $N + OH = NO + H$, reazioni che assumono qualche rilievo a temperature superiori a 2000 K, come può avvenire in motori ad accensione comandata.

E' altresì noto che un parametro molto importante nel funzionamento del motore ad accensione comandata è l'anticipo d'accensione. I risultati di una precedente sperimentazione [2] mostrano, per esempio, come una scelta opportuna dell'anticipo consenta di ottenere diminuzioni significative del

consumo specifico di carburante.

Un aumento dell'anticipo d'accensione può causare però un aumento della temperatura massima del ciclo per via della maggiore quantità di combustibile che si brucia durante la corsa di compressione dello stantuffo. Conseguenza di tale aumento è una maggiore concentrazione di NO_x allo scarico. Scopo del presente lavoro è una valutazione quantitativa delle emissioni di NO_x connesse alla scelta dell'anticipo d'accensione di massima coppia (MBT).

1 PROVE SPERIMENTALI

Si è eseguita una campagna di prove sperimentali sul banco prova motori del Dipartimento, costituito essenzialmente da:

- a) freno a correnti parassite Schenck regolato su una caratteristica frenante a velocità angolare costante
- b) motore Renault da 1598 cc ad iniezione del tipo Multi Point sequenziale (MPI)
- c) centralina di sviluppo Walbro MINJ400 in grado di intervenire in tempo reale sulla dutata e sulla fase dell'iniezione oltre che sull'anticipo di accensione
- d) sonda lambda NTK per la misura della dosatura di funzionamento
- e) analizzatore di gas di scarico Motorscan 8020 munito di sensore di NO (cella elettrochimica)
- f) accelerometro Brüel & Kjær collegato ad oscilloscopio al fine di avvertire l'incipiente detonazione
- g) contaimpulsu digitale per la misura del regime di rotazione
- h) computer per l'elaborazione dei dati sperimentali acquisiti

Le prove sperimentali sono state effettuate a diversi regimi di rotazione (1500, 2500 e 3500 rpm) e per differenti carichi. Nel corso di ogni prova si è ridotto l'anticipo d'accensione partendo dal valore di massima coppia con decrementi progressivi di 2° fino ad una diminuzione massima di 10° e, al fine di poter stabilire la reciproca influenza da parte dell'anticipo e della dosatura, si sono rilevate le emissioni di ossido di azoto per tre diverse dosature di funzionamento: leggermente ricca ($\lambda=0.95$), stechiometrica ($\lambda=1$) e leggermente povera ($\lambda=1.05$). Le stesse prove sono state poi effettuate adottando per il motore in prova un iniezione del tipo Multi Point simultanea, onde poter valutare l'influenza della strategia di iniezione.

1.1 RISULTATI PROVE CON INIEZIONE SEQUENZIALE

Dalle prove effettuate sul motore al banco risulta (come anche ampiamente documentato in letteratura, [1], [3], [4], [5], [6], [7], [8]) che, fissata la posizione della valvola a farfalla ed il regime di rotazione, aumentando l'anticipo d'accensione fino al raggiungimento della massima coppia ottenibile aumentano le emissioni inquinanti di monossido di azoto. In Figura 2 sono riportati i valori di emissioni di NO rilevate al variare dell'anticipo d'accensione per diversi carichi ($\phi=pme/pme_{max}$) e regimi di rotazione con iniezione di tipo sequenziale ($\Delta Ant =$ anticipo di funzionamento - anticipo di massima coppia).

La caratteristica dei diagrammi rappresentati è che indipendentemente dal valore di anticipo d'accensione, le emissioni di NO ottenute con dosatura leggermente povera ($\lambda=1.05$) sono largamente superiori (di circa un ordine di grandezza) a quelle rilevate con dosatura stechiometrica o ricca. In tal senso dai grafici in Figura 2 si deduce che le emissioni di NO mostrano una sensibilità molto maggiore nei confronti della dosatura che nei confronti dell'anticipo d'accensione.

Ciò si spiega considerando che la dosatura gioca un duplice ruolo nei riguardi delle emissioni di NO: infatti all'aumentare di questa da un lato diminuisce la quantità di combustibile bruciata e quindi il calore rilasciato dalla combustione, dall'altro diminuisce la velocità di propagazione della fiamma, rendendo la combustione più lenta, con una maggiore temperatura di fine espansione e un conseguente

globale riscaldamento del cilindro cui si accompagnano temperature massime più elevate e quindi, in ultima analisi, un maggior tenore di NOx allo scarico.

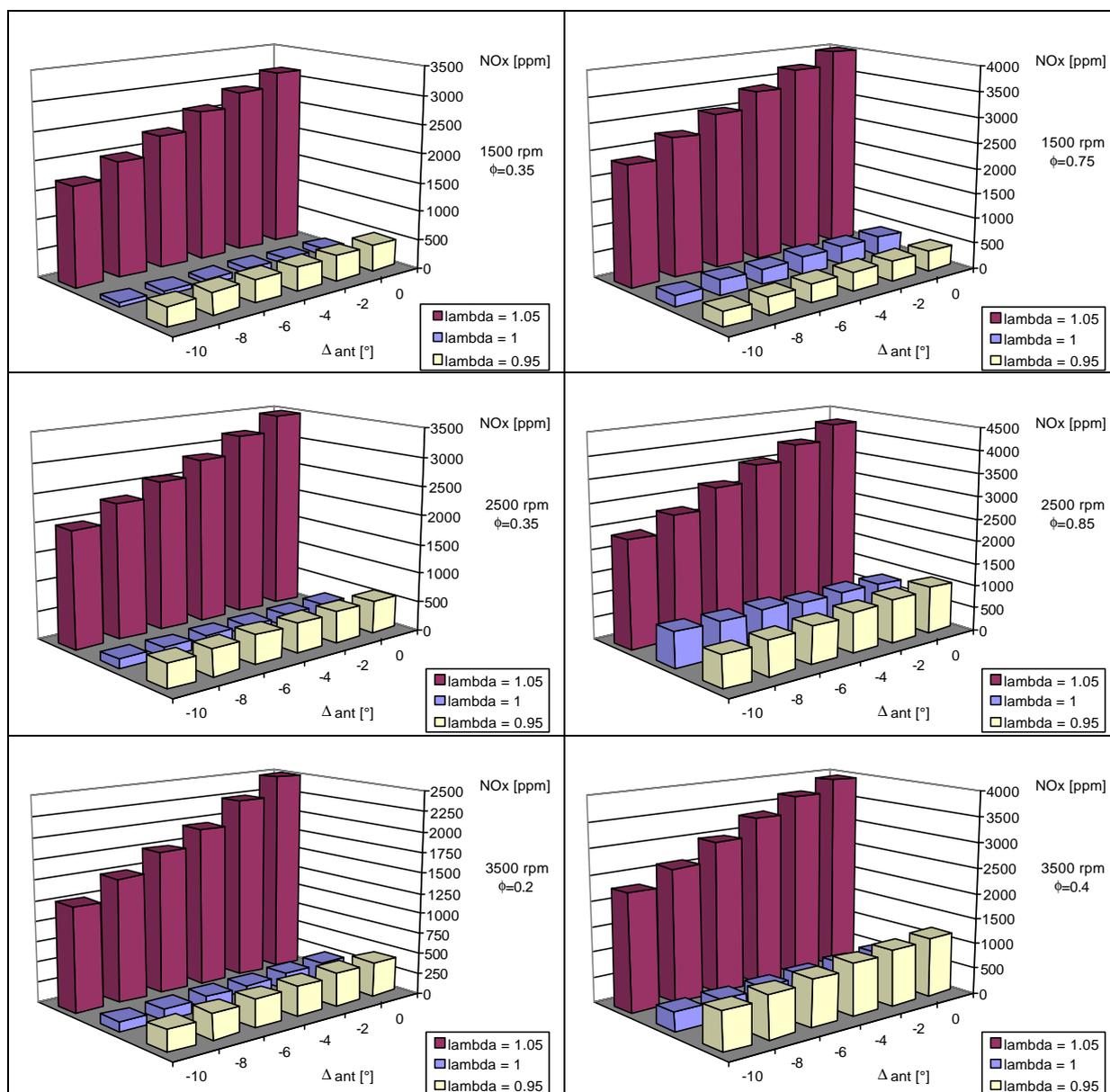


Figura 2.- Emissioni di NO rilevate con iniezione sequenziale al variare dell'anticipo d'accensione

I due effetti si combinano in modo tale da far registrare un massimo della concentrazione di NOx allo scarico per dosature povere. A tal proposito si riporta in Figura 3 l'andamento delle emissioni di ossido di azoto rilevate a 1500 rpm e carico parziale 0,5 per un intervallo di dosatura $0,9 < \lambda < 1,1$.

In Figura 4 e Figura 5 sono rappresentate le variazioni percentuali osservate sul consumo specifico e sulle emissioni di NO in due delle prove eseguite. Sulla base di grafici di questo genere si è dedotto che ritardare l'accensione di 10° rispetto alla condizione MBT causa aumenti del consumo specifico che variano dal 5% al 15% a seconda del carico e del regime di rotazione (tali variazioni del consumo specifico mostrano bassa sensibilità alla dosatura); lo stesso ritardo nell'accensione provoca diminuzioni della concentrazioni di NOx allo scarico tra il 30% ed il 50% a seconda del carico, del regime di rotazione e della dosatura.

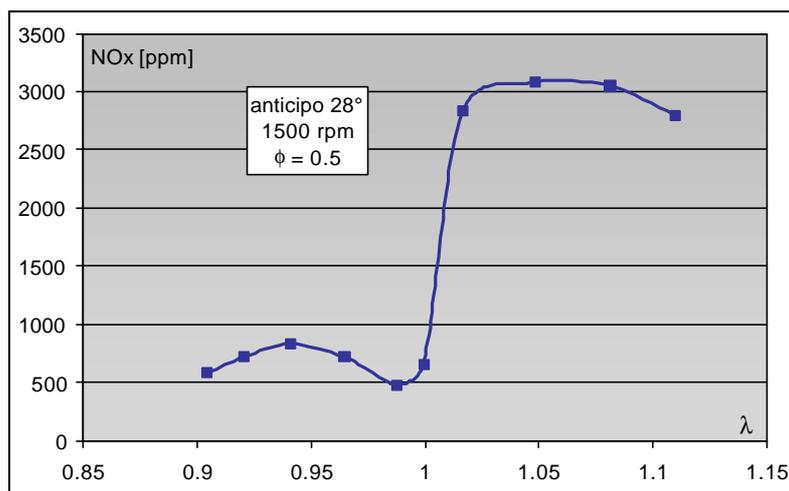


Figura 3.- Emissioni di NO rilevate al variare della dosatura

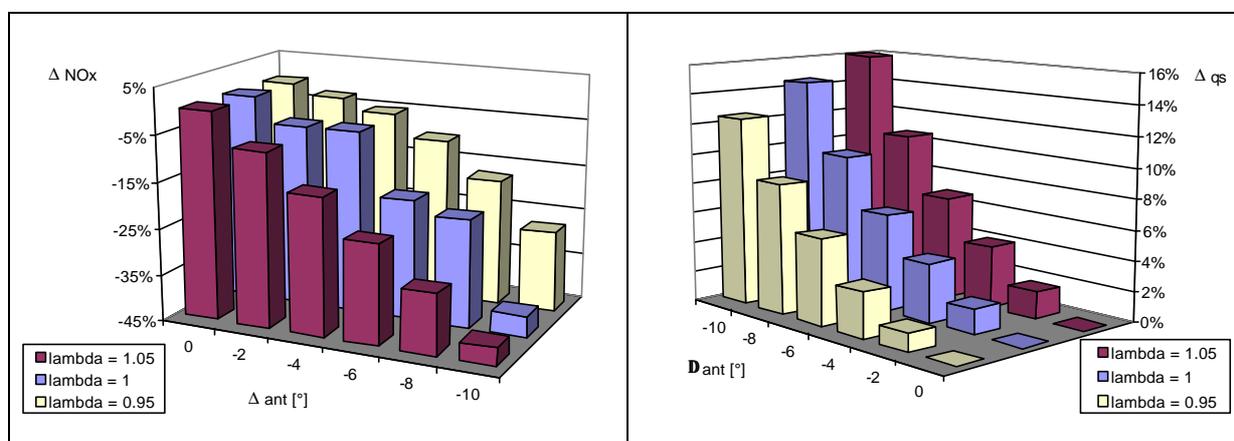


Figura 4.- Variazione percentuale di emissioni di NO (sinistra) e consumo specifico (destra) rilevate a 1500 rpm e $\phi=0.75$ (iniezione sequenziale)

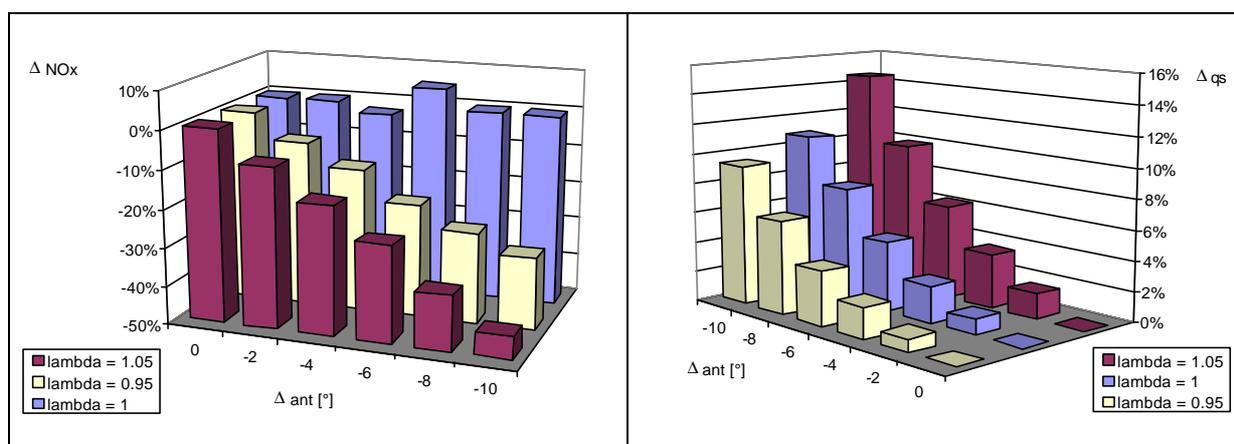


Figura 5.- Variazione percentuale di emissioni di NO (sinistra) e consumo specifico (destra) rilevate a 2500 rpm e $\phi=0.85$ (iniezione sequenziale)

In alcuni casi (vedi Figura 5) nel funzionamento a dosatura stechiometrica non si sono rilevate

variazioni significative delle emissioni di ossido di azoto proprio per quanto già osservato sulla sensibilità di tali emissioni inquinanti nei confronti della dosatura, soprattutto nel passaggio da dosatura ricca a povera, condizione abituale di funzionamento di un motore ad accensione comandata regolato in retroazione con sonda λ .

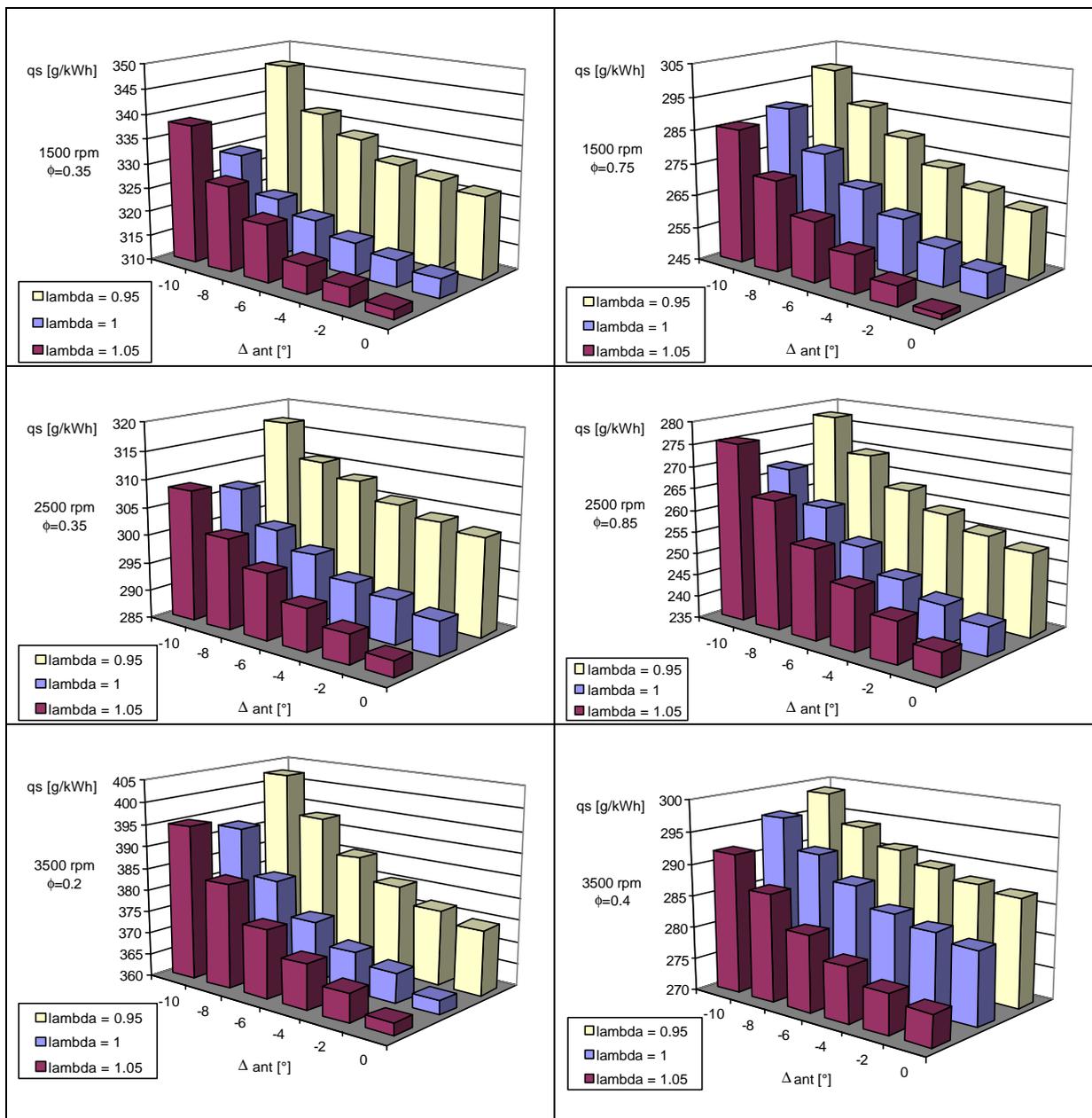


Figura 6.- Consumi specifici rilevati con iniezione sequenziale al variare dell'anticipo d'accensione

In Figura 6 sono riportati i consumi specifici misurati al variare dell'anticipo e per i tre valori di dosatura presi in considerazione.

Visto l'analogo trend di ΔNO_x e Δq_s in funzione dell'anticipo per i tre valori di dosatura (vedi Figura 4 e Figura 5) questi sono stati mediati, conducendo in sintesi ai diagrammi conclusivi in Figura 7 e Figura 8. La Figura 7 mostra che ritardando l'accensione di 10° rispetto alla condizione MBT si ottiene una diminuzione media del 35% delle emissioni di ossido di azoto, mentre per ciò che concerne il consumo specifico, la Figura 8 mostra che un tale ritardo nell'accensione provoca peggioramenti che

dipendono dal carico e dalla velocità angolare e che vanno dal 5% al 14% (l'aumento percentuale di consumo specifico è maggiore ai bassi regimi ed alti carichi).

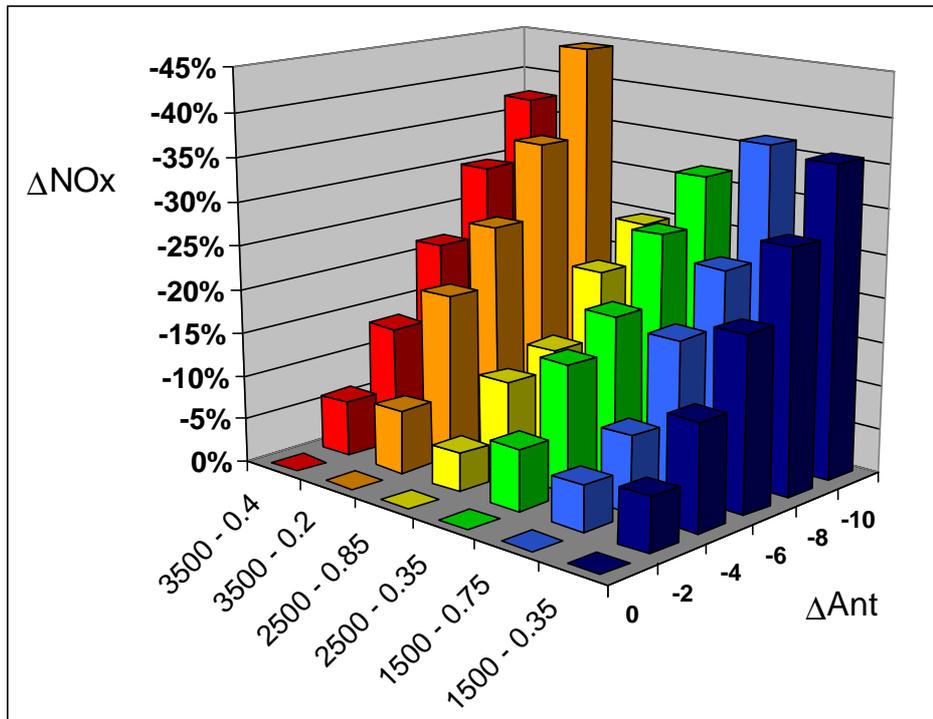


Figura 7.- Variazione percentuale delle emissioni NO rilevate con iniezione sequenziale

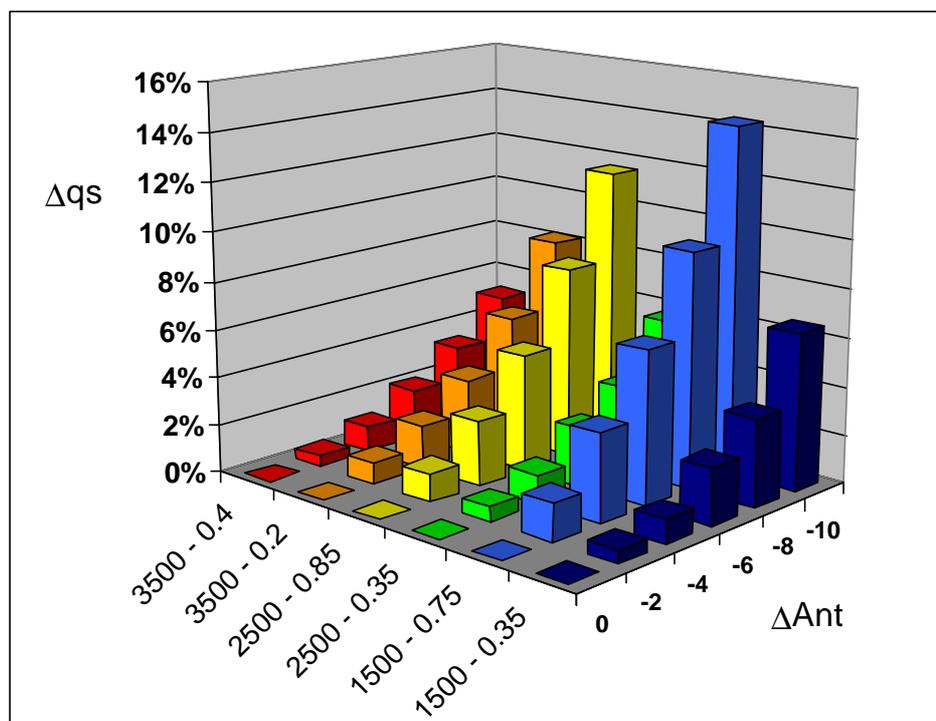


Figura 8.- Variazione percentuale del consumo specifico (iniezione sequenziale)

Da questi primi risultati si evince come in un'ottica di riduzione delle emissioni inquinanti legate all'azoto, il funzionamento del motore ad accensione comandata con anticipo d'accensione ottimo (cioè di massima coppia) comporta peggioramenti percentuali di un ordine di grandezza inferiore a quelli conseguenti una regolazione poco precisa della dosatura della miscela carburata.

1.2 RISULTATI PROVE CON INIEZIONE SIMULTANEA

La centralina di sviluppo Walbro disponibile ha consentito di adottare una strategia di iniezione del tipo multi point "simultanea", cioè con iniezione contemporanea per tutti i cilindri.

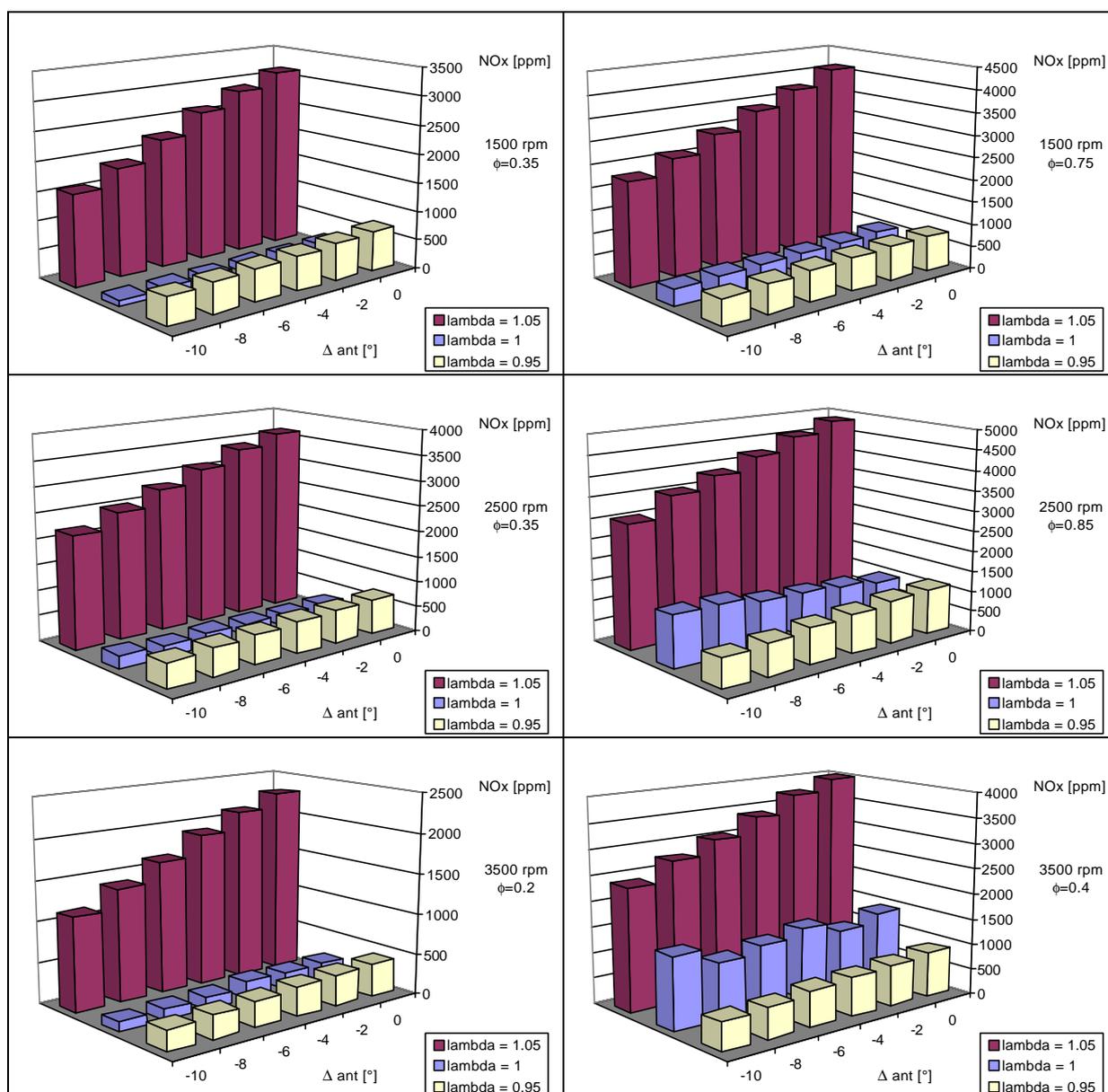


Figura 9.- Emissioni di NO rilevate con iniezione simultanea al variare dell'anticipo d'accensione

Si è voluto così valutare in che termini l'iniezione simultanea si differenzia da quella sequenziale nei confronti del consumo specifico e delle emissioni di NO al variare dell'anticipo d'accensione.

In Figura 9 sono rappresentate le emissioni di ossido di azoto rilevate al variare dell'anticipo. Analogamente a quanto visto per le prove ad iniezione sequenziale, anche questa volta sulla concentrazione di ossidi di azoto allo scarico hanno avuto un peso molto maggiore le variazioni di dosatura piuttosto che quelle di anticipo d'accensione. Nel confronto, l'iniezione simultanea ha fatto registrare valori mediamente più alti di quelli ottenuti con iniezione sequenziale.

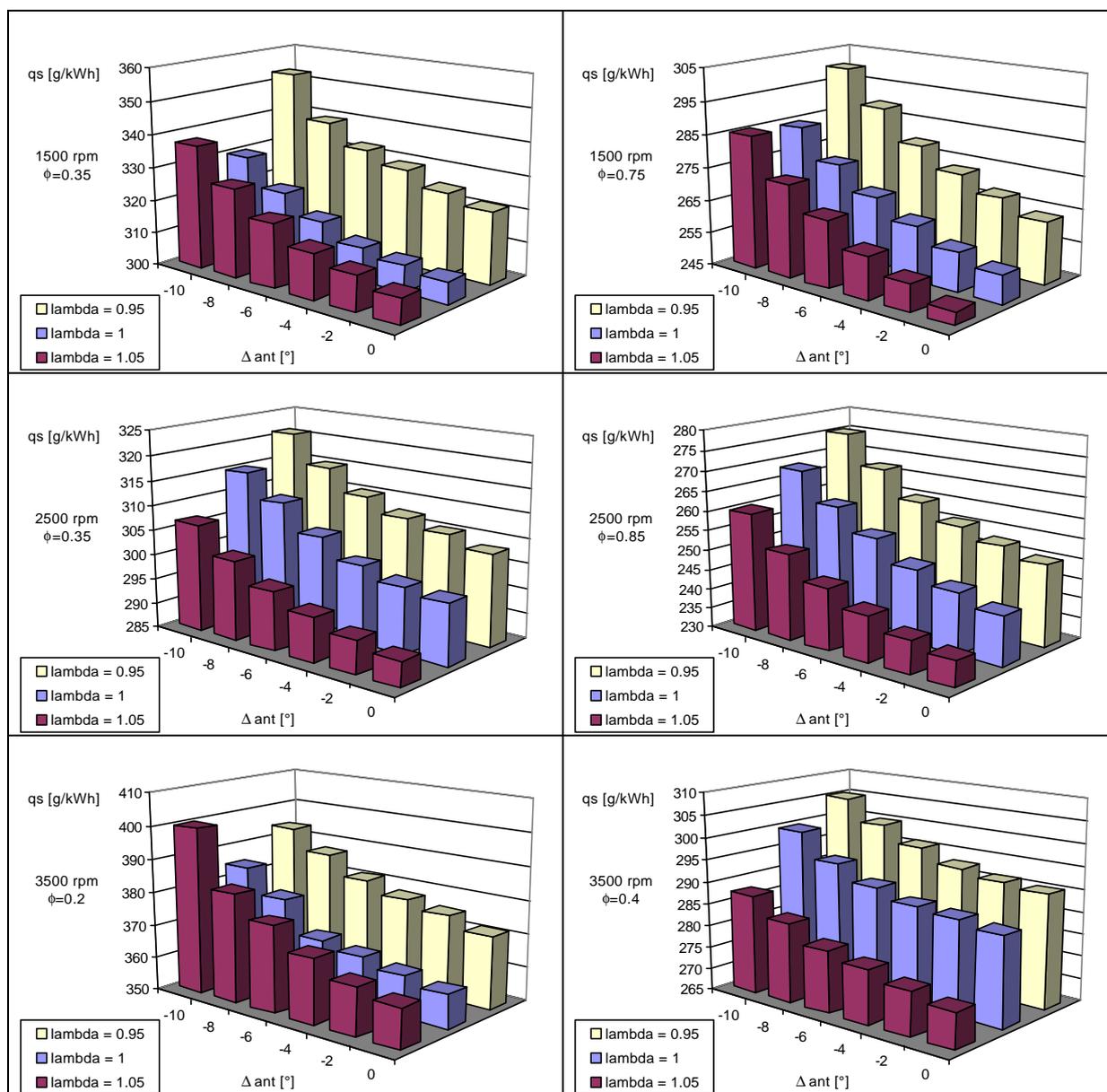


Figura 10.- Consumi specifici rilevati con iniezione simultanea al variare dell'anticipo d'accensione

La Figura 10 mostra i valori di consumo specifico rilevati durante le prove con iniezione simultanea. Se si pongono a confronto questi grafici con gli analoghi di Figura 6 relativi all'iniezione sequenziale, si osserva che quest'ultima non vanta particolari benefici in termini di consumo specifico. In Figura 11 e Figura 12 sono riportati infine i diagrammi con le variazioni percentuali di emissioni di NO allo scarico e di consumo specifico rilevate durante le prove con iniezione simultanea.

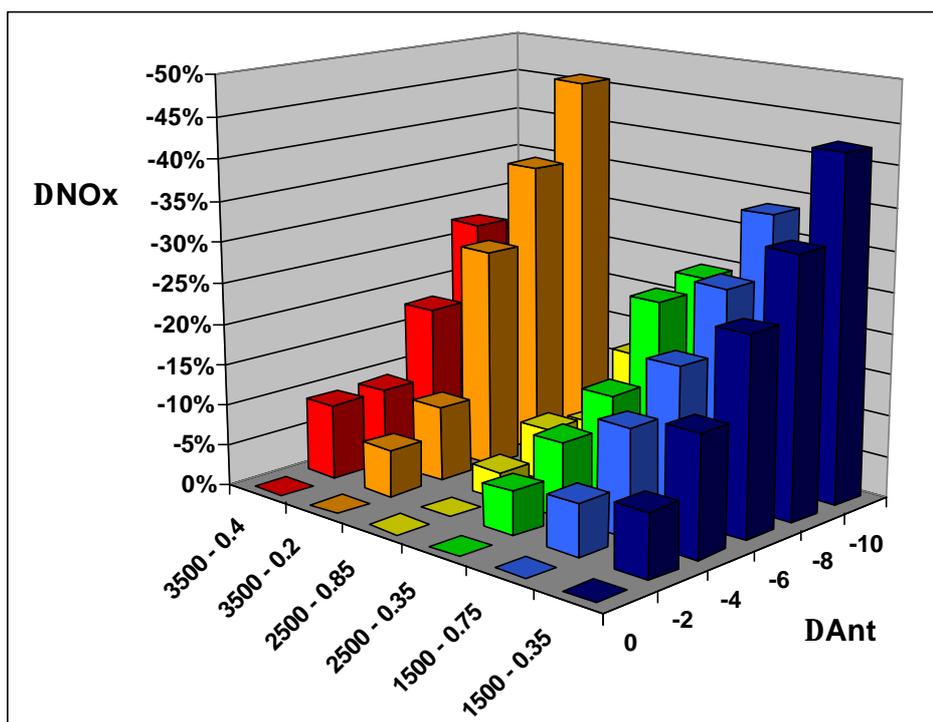


Figura 11.- Variazione percentuale delle emissioni NO rilevate con iniezione simultanea

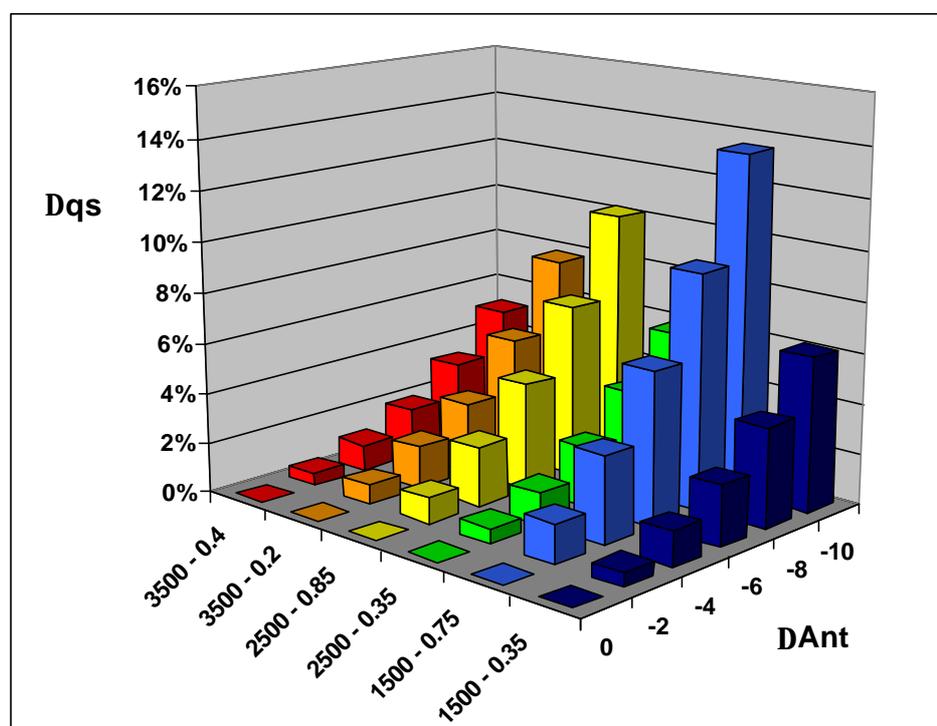


Figura 12.- Variazione percentuale del consumo specifico (iniezione simultanea)

Per quanto riguarda le emissioni di NO, il diagramma di Figura 11 (iniezione simultanea) mostra una dipendenza dal carico lievemente più accentuata rispetto ai risultati di Figura 7 (iniezione sequenziale) ed un valore medio del 31% in corrispondenza ad un ritardo di 10° nell'accensione.

Mettendo invece a confronto i diagrammi di Figura 12 con quelli di Figura 8 non si osserva alcuna sostanziale differenza, tranne un aumento percentuale del consumo specifico leggermente più elevato per l'iniezione sequenziale a parità di ritardo nell'accensione.

2 CONCLUSIONI

Si è svolta una sperimentazione in regime stazionario al banco prova motori con l'obiettivo di valutare quantitativamente sia il miglioramento in termini di emissioni di ossidi di azoto conseguenti ad un anticipo d'accensione inferiore a quello di massima coppia, sia il contestuale peggioramento del rendimento.

I risultati mostrano non solo che ritardando l'accensione le emissioni di ossido di azoto diminuiscono percentualmente più di quanto aumenti il consumo specifico, ma anche che tali emissioni sono molto più sensibili a variazioni di dosatura della miscela carburata che a variazioni di anticipo d'accensione (aumenti di un ordine di grandezza per lambda che va da 1 a 1,05).

Pertanto in un ottica di abbattimento delle emissioni inquinanti e di miglioramento del consumo specifico assumono particolare importanza il controllo della dosatura per il primo dei due obiettivi, e l'ottimizzazione dell'anticipo d'accensione (anche in retroazione, [9], [10], [11], [12], [13]) per il secondo. Il tenore di ossidi di azoto potrebbe addirittura essere utilizzato come grandezza indice per la correzione della dosatura in loop chiuso. Volendo poi ottenere il massimo rendimento, il motore dovrebbe funzionare con dosatura povera ed anticipo ottimo regolato anch'esso in retroazione; in tal caso sarebbe d'obbligo un sistema di abbattimento degli inquinanti NOx efficace anche con miscele povere [14].

ELENCO DEI SIMBOLI E ABBREVIAZIONI

$\phi = p_{me}/p_{me_{max}}$	Frazione di carico massimo
ΔAnt	Differenza tra anticipo d'accensione ed anticipo d'accensione di massima coppia (=0 in condizioni MBT)
ΔNO_x	Variazione percentuale di emissioni NO (riferita alle emissioni rilevate con anticipo di MBT)
Δq_s	Variazione percentuale di consumo specifico (riferita al consumo rilevato con anticipo di MBT)
MBT	Maximum Brake Torque
WOT	Wide open throttle

BIBLIOGRAFIA

-
- 1 John B.Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Book Company, 1988.
 - 2 A. Beccari, E. Pipitone. Influenza di dosatura ed anticipo d'accensione sulle prestazioni del motore ad accensione comandata. Atti del 55° Congresso ATI, Bari-Matera 15-20 Settembre 2000.
 - 3 A. Beccari, C. Caputo. *Motori termici volumetrici*. UTET, 1987.
 - 4 F.Shafer, R. van Basshuysen. *Reduced emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines*. Springer-Verlag, SAE International, 1995.
 - 5 Bosch. *Automotive Handbook*. SAE, 2000.
 - 6 P.J.Shayler, J.Chick, N.J.Darnton, D.Eade. Generic functions for fuel consumption and engine out emissions of HC, CO and NOx of spark ignition engine. Journal of Automobile Engineering, Vol 213 No D4,1999.
 - 7 H.P.Lenz. *Mixture Formation in Spark-Ignition Engines*. Springer-Verlag, SAE International, 1992.
 - 8 J.R.Sodré. Modelling NOx emissions from spark-ignition engines. Journal of Automobile Engineering, Vol 214 No D8,2000.
 - 9 P. Yoon, S. Park, M. Sunwoo. Closed-loop control of spark advance and air-fuel ratio in SI engines using cylinder pressure. SAE Technical Papers 2000-01-0933.
 - 10 H.Cho, J.Lee, J.Yoo. A study of the adaptive control of spark timing using cylinder pressure in a spark ignition engine. Journal of Automobile Engineering, Vol 213 No D5,1999.
 - 11 W.Wang, E.C.Chirwa, E.Zhou, K.Holmes, C.Nwagboso. Fuzzy ignition timing control for a spark ignition engine. Journal of Automobile Engineering, Vol 214 No D3,2000.
 - 12 Paul H. Schweitzer and Carl Volz. Electronic Optimizer Control for I.C. engine: most MPG for any MPH. SAE Paper 750370.
 - 13 Lars Eriksson. *Spark advance modelling and control*. Linus & Linnea, Linköping, Svezia 1999.
 - 14 M.S.Brogan, N.S.Will, M.V.Twigg, A.J.J.Wilkins, K.Jordan. Advances in DENOX catalyst technology for European stage IV emissions level. In: *Future Engine and System Technologies*, IMechE Seminar Publication, 1998.