

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

**SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA**

***CORSO DI LAUREA*
IN INGEGNERIA MECCANICA**

Classe: L-9

Sede di Forlì

**ELABORATO FINALE DI LAUREA
IN MACCHINE L**

“Il rilievo del titolo e del tenore di NO_x nei gas di scarico di un motore a combustione interna: metodi, tecnologie ed errori di misura”

CANDIDATO
Baldazzi Matteo

RELATORE
Chiar.mo Prof. Corti Enrico

CORRELATORI
Chiar.mo Prof. Moro Davide
Ill.mo Ing. Valbonetti Manuel
Ill.mo Ing. Ravaglioli Vittorio

Anno Accademico 2011/2012

Sessione II

RINGRAZIAMENTI.....	6
ELENCO DEGLI ACRONIMI UTILIZZATI	7
RACCOLTA BIBLIOGRAFICA.....	11
1 INTRODUZIONE AI CONTROLLI ON BOARD	12
1.1 LA FORMAZIONE DEGLI INQUINANTI.....	14
1.1.1 <i>Idrocarburi e monossido di carbonio</i>	17
1.1.2 <i>Ossidi di azoto</i>	18
1.1.3 <i>Particolato</i>	18
1.2 SISTEMI PER L'ABBATTIMENTO DELLE EMISSIONI	19
1.2.1 <i>Il catalizzatore a tre vie</i>	20
2 INTRODUZIONE ALLE SONDE λ.....	22
2.1 TECNOLOGIE PER SONDE λ	22
2.1.1 <i>Sonda al biossido di zirconio (HEGO)</i>	23
Principio di funzionamento di una sonda al biossido di zirconio	23
2.1.2 <i>Sonda al biossido di titanio(HEGO)</i>	25
Principio di funzionamento di una sonda al biossido di titanio	25
2.1.3 <i>2.1.3 Sonda lambda a banda larga(UEGO)</i>	26
Principio di funzionamento di una sonda lineare.....	27
2.2 SONDE λ "SPECIALI"	29
2.2.1 <i>Sonda NO_x</i>	29
2.2.2 <i>Studio approfondito delle problematiche, di un sensore NO_x al biossido di zirconio (ZrO₂), riguardanti la misurazione delle basse concentrazioni di NO_x</i>	31
Descrizione dettagliata del sensore	33
Introduzione ai sensori CLD (chemi-luminescence detector).	34
Segnale del sensore NO _x su un motore Benzina.....	36
Segnale del sensore NO _x su un motore Diesel.....	37
Problematiche riscontrate	38
Analisi della dipendenza dall'ossigeno utilizzando modelli di gas	40
Meccanismo con cui l'ossigeno influenza i risultati prodotti.	41
Verifica delle ipotesi, "causa/meccanismo", riguardanti l'influenza dell'ossigeno.....	42
Risoluzione delle problematiche attuando un set di modifiche al sensore denominato "Ip ₁ control"	44
Effetti dell'Ip ₁ Control"	47
Altri benefici del "Ip ₁ control"	49
Conclusioni.....	50
2.2.3 <i>Sonde lambda a ingombro ridotto</i>	51
Analisi delle misurazioni di una sonda λ a ingombro ridotto per il controllo dell'AFR su moto.	51
Problematiche.....	52
Soluzioni.....	53
2.2.4 <i>Sonde "Racing"</i>	56
2.3 POSIZIONAMENTO DELLE SONDE λ :	57
3 PROBLEMATICHE DEI SENSORI UEGO	58
3.1 ANALISI DEI TRANSITORI STECHIOMETRICI DEL RAPPORTO A/F	59
Caratterizzazione dei picchi	59
Influenza della pressione d'aspirazione	64
Influenza dello scostamento dal valore stechiometrico sui picchi di misurazione.	65
Effetto della velocità di variazione dell'AFR.....	66
Conseguenze sul controllo in feedback.....	67
Conclusioni.....	68
3.2 PROBLEMATICHE DURANTE I TRANSITORI D'ACCENSIONE: CONFRONTO UEGO-FFID	69
Sensori in camera FFID.....	69
Svolgimento dei test	70
Settaggio iniziale dei test	71
Risultati nei test a caldo (90°C)	72
Risultati nei test a temperatura ambiente (20°C)	76
Risultati nei test a bassa temperatura (0°C).....	78
Errori nella misurazione di λ	79

	Dati filtrati	80
	Conclusioni tratte:.....	80
3.3	INTERAZIONI FRA I SENSORI D'O₂ E LA COMPOSIZIONE DEI GAS ALLO SCARICO.....	81
	Apparecchiature e procedimento dei test	82
	Risultati dei test sulle specie inorganiche	85
	Influenza dell'idrogeno	86
	Paraffine, Olefine e Acetileniche.....	88
	Componenti Aromatiche.....	89
	Osservazioni	89
	Studio approfondito dell'effetto del toluene e dell'idrogeno.....	92
	Osservazioni	96
	Problematiche riscontrate da questo genere di test	96
	Effetto "NO _x /Aromatics"	97
	Benefici apportati alla misurazione tramite l'impiego di un secondo sensore.....	98
3.4	RIPERCUSSIONI DELL'AVVELENAMENTO DOVUTO ALL'ETÀ DI UNA SONDA λ.....	100
3.4.1	<i>Misurazione sperimentale degli effetti dell'avvelenamento di un sensore λ.....</i>	<i>100</i>
4	MISURAZIONE INNOVATIVA DEL RAPPORTO A/F DURANTE I TRANSITORI	112
4.1	STUDIO DI UN SENSORE UEGO ARTIFICIALE (SUEGO) PER LE PARTENZE "A FREDDO" DEL MOTORE (METODOLOGIA, PROGETTAZIONE E PRESTAZIONI).....	112
	Le reti neurali	117
	Conclusioni sulla SUEGO:	126
4.2	MISURAZIONE CICLO PER CICLO DELL'AFR UTILIZZANDO SENSORI NDIR A RISPOSTA RAPIDA 127	
	Sensori NDIR.....	127
	Applicazione allo studio dei transitori d'accensione.....	129
	Strumentazione adottata per la comparazione dei sensori NDIR e HC con la tradizionale UEGO e relativo posizionamento.....	130
	Iniettori PFI.....	131
	Descrizione del sensore UEGO	132
	Acquisizione dei dati	132
	Macro in MS Excel.....	132
	Comparazione di λ fra il metodo appena descritto e il tradizionale sensore UEGO	137
	Difetti della misurazione UEGO:.....	139
	Difetti della misurazione "fast λ " :.....	140
	Ripetibilità	140
	Conclusioni.....	144
4.3	MISURAZIONE INNOVATIVA DEL RAPPORTO A/F DURANTE IL TRANSITORIO CON L'IMPIEGO DEL SEGNALE DI PRESSIONE.....	145
4.3.1	<i>Stima dell'AFR utilizzando il segnale di pressione in camera.....</i>	<i>145</i>
	Influenza delle armoniche della pressione sull'AFR: approccio teorico.....	148
	Svolgimento dei test	154
	Conclusioni.....	163
4.3.2	<i>Correlazione dell'AFR al lavoro indicato</i>	<i>164</i>
5	EFFETTO DEGLI NO_x SULLA DETONAZIONE IN MOTORI SI.....	171
	Metodologie e Calcoli dello studio.....	173
	Apparato sperimentale	174
	Condizioni e metodi utilizzati negli esperimenti	175
	Analisi dei risultati ottenuti.....	177
	Esperimenti di verifica.....	178
	Test utilizzando pseudo-aria in aspirazione	183
	Conclusioni.....	185
6	BIBLIOGRAFIA	186
1	ANALISI DATI	189
1.1	INTRODUZIONE	190
1.2	DESCRIZIONE DEI TEST	190
1.3	ELABORAZIONE DEI DATI.....	199
	Pressione.....	199
	Output dei sensori UEGO	201

	Osservazioni	205
1.4	CALCOLO DELLA COSTANTE DI TEMPO DEL SENSORE POSTO SUL RUNNER DEL QUARTO CILINDRO	206
	Risultati ottenuti	209
	Calcolo della costante di tempo per il sensore alla confluenza	216
	Risultati	217
	Osservazioni:	219
1.	COMUNICAZIONE CAN CON UN SENSORE NOX	221
2.	INTRODUZIONE	222
2	COMUNICAZIONE CAN	222
2.1	FRAMES.....	224
2.1.1	<i>Data frame</i>	224
	Formato del Base frame.....	224
	Remote Frame.....	226
	Error Frame	226
	Overload frame	226
	Bit stuffing.....	227
3	AMBIENTE DI SVILUPPO	227
4	HARDWARE	228
4.1	NI COMPACTRIO	228
4.1.1	<i>Architettura CompactRIO</i>	228
4.1.2	<i>Controller/Chassis</i>	228
4.1.3	<i>Moduli</i>	230
	Modulo 9853.....	231
5	SOFTWARE.....	232
5.1	LABVIEW	232
5.1.1	<i>Pannello frontale "Front panel"</i>	232
5.1.2	<i>Diagramma a blocchi, "block diagram"</i>	233
5.2	CANALYZER	235
6	DESCRIZIONE DEL SENSORE.....	238
6.1	CARATTERISTICHE DEL SENSORE:	238
6.2	DIMENSIONI.....	239
6.3	FUNZIONI	239
6.4	APPLICAZIONI	239
	Motori Diesel.....	239
	Motori Benzina.....	240
	Applicazione su motori a iniezione diretta.....	241
6.5	PRINCIPIO DI MISURAZIONE	241
6.6	SPECIFICHE TECNICHE:.....	242
6.7	CABLAGGIO	242
6.8	POSIZIONAMENTO.....	245
7	PROGETTAZIONE IN LABVIEW	247
7.1	REALIZZAZIONE DEL VI IN FPGA	250
	Problematiche riscontrate:	253
APPENDICE A	255

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio la mia famiglia, in particolare mia madre, tutti gli amici e le persone che da anni mi vogliono bene e che han sempre creduto in me.

Fare tutti vostri nomi sarebbe inutile, sapete che mi riferisco a voi.

Ringrazio inoltre tutto il personale hangar che mi ha aiutato nello svolgimento di questa tesi, a partire dal mio relatore il Professor Corti, il vostro contributo è stato di fondamentale importanza per me.

ELENCO DEGLI ACRONIMI UTILIZZATI

Acronimo	Significato in inglese	In italiano
$\frac{A}{F}$	$\left(\frac{Air}{Fuel} \right)$	$\frac{Aria}{Combustibile}$
ANN	Artificial Neural Network	Rete Neurale Artificiale
BMEP	Brake Mean Effective Pressure	PME (misurata al banco)
Bsfc	Brake Specific Fuel Consumption	Consumo specifico
CA	Crank Angel	Angolo di manovella, spesso riferito all'anticipo di accensione rispetto al PMS
CAA	Crankshaft Angular Acceleration	Accelerazione angolare della manovella
CLD	(chemi-luminescence detector)	Rilevatore chimico di luminescenza
CO		Monossido di Carbonio
Controller PID	Proportional-Integral-Derivative Controller	Controller costituito da tre contributi: proporzionale, integrale e derivativo.
CRIO	CompactRIO	
DFT	Discrete Fourier Transform	Trasformata di Fourier discreta
ECU	Electronic Engine Control Unit	Centralina
EGR	Exhaust Gas Recirculation	Ricircolo dei gas di scarico

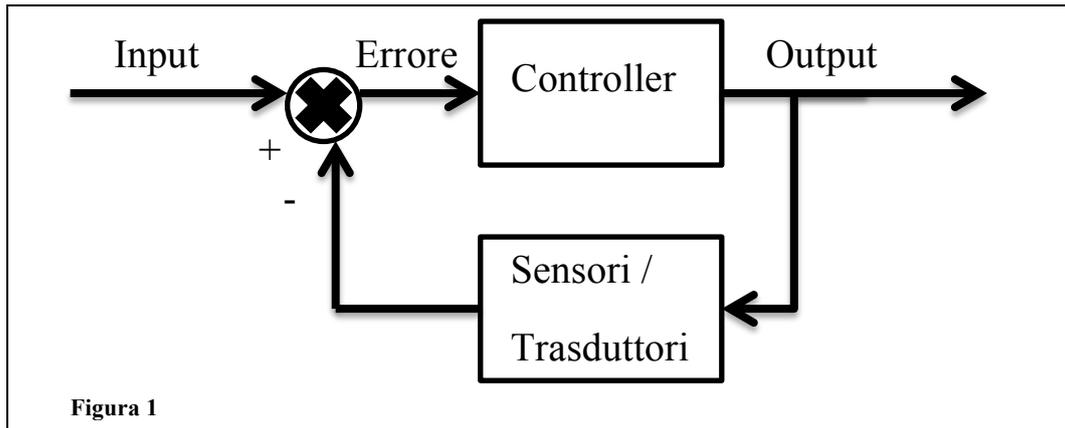
FFID	Fast Flame Ionization Detector	Rilevatore Veloce di Fiamme Ionizzate
FPGA	Field Programmable Gate Array	Circuito integrato digitale
GND	Ground	Terra
HC		Idrocarburi
HEGO	Heated Exhaust Gas Oxygen	
ISO	International Organization for Standardization	Organizzazione internazionale per la normazione
KI	Knock Intensity	Intensità di detonazione
MAP	Manifold Air Pressure	Pressione nel collettore d'aspirazione
MBT	Maximum Brake Torque	Coppia massima (misurata al freno)
NIDR	Nondispersive infrared sensor	Sensore a infrarossi non dispersivo
NO _x		Ossidi d'azoto
NVH	Noise, vibration and harshness	Rumore, vibrazioni e "regolarità" riferiti alla combustione
OBD	On-Board Diagnostics	Diagnostica a bordo
OSC	Oxygen Storage Capacity	Capacità d'immagazzinare ossigeno (riferita al catalizzatore)
PFI	Port Fuel Injection	Iniezione diretta di carburante
PMI o BDC	Bottom Dead Center	Punto Morto Inferiore
PMS o TDC	Top Dead Center	Punto Morto Superiore
PMT	Photo Multiplier Tube	Tubo fotomoltiplicatore

Ppm		Parti per milione
Ppm		Parti Per Milione
SCR	Selective Catalytic Reduction	Riduzione catalitica selettiva
SI	Spark Ignition	Accensione Comandata (per scintilla)
SUEGO	Synthetic UEGO	Sensore lineare artificiale
T_q	Torque	Coppia
TWC	Three Way Catalyst	Catalizzatore a tre vie
UEGO	Universal Exhaust Gas Oxygen	

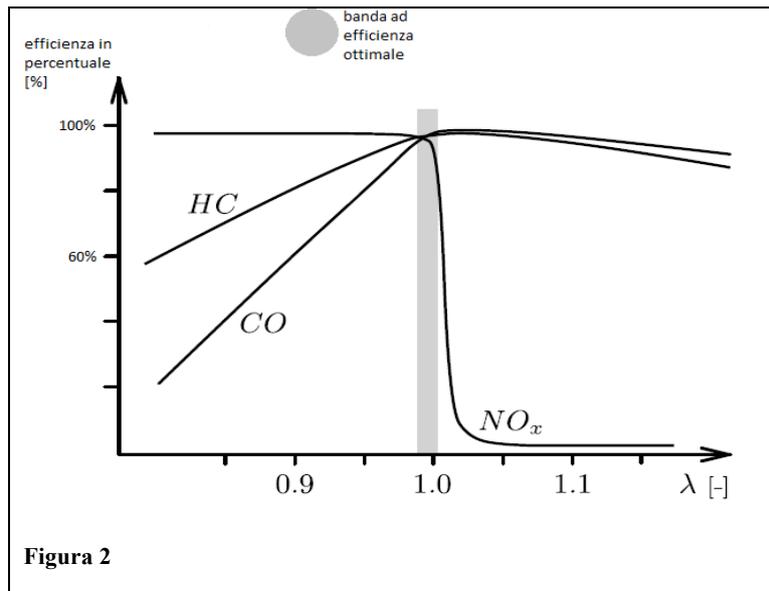
RACCOLTA BIBLIOGRAFICA

1 INTRODUZIONE AI CONTROLLI ON BOARD

Nelle vetture odierne l'apparato di controllo assume un ruolo fondamentale, infatti circa un terzo delle componenti sono elettriche, ciò rende possibile un incremento della sicurezza, della guidabilità e una riduzione dei consumi e delle emissioni inquinanti. Questi controlli generano un flusso d'informazioni che converge verso la centralina (ECU) e sono per lo più controlli in feedback, di cui si riporta il principio di funzionamento nel diagramma a blocchi sottostante:



L'ECU può così intervenire con criterio sui principali parametri di regolazione del motore, nelle centraline più datate questo consisteva nella sola regolazione del tempo d'iniezione, oggi invece è possibile un intervento su più parametri. Uno tra i principali parametri è di certo il rapporto aria combustibile, dal quale si definisce il parametro λ che coincide col rapporto di aria e combustibile in camera diviso il rapporto stechiometrico $[(A/F)/(A/F)_{st}]$; la necessità di controllare questo parametro in anello chiuso deriva dall'introduzione delle normative anti inquinamento che hanno portato i costruttori di auto all'installazione di sofisticate tecnologie per abbattere le emissioni e al catalizzatore a tre vie, la cui efficienza varia in funzione di λ come da diagramma:



Leggendo il grafico si nota che per miscele grasse ($\lambda < 1$) si ha una riduzione di efficienza nell'abbattimento degli idrocarburi "HC" e del monossido di carbonio "CO" dovuta alla scarsità di ossigeno presente in atmosfera per l'ossidazione delle due specie chimiche; viceversa se si hanno miscele grasse ($\lambda < 1$) diminuisce l'efficienza di abbattimento degli ossidi d'azoto "NO_x" i quali richiedono un'atmosfera riducente, s'individua così una banda di funzionamento ottimale nell'intorno della stechiometria che garantisce elevata efficienza per tutte e tre le specie chimiche.

Vi sono inoltre altri parametri su cui la centralina è in grado di agire per migliorare le prestazioni del motore, di cui in tabella se ne riportano alcuni (riferiti a motori Diesel):

Tabella 1

Input di controllo	Effetto prodotto
Anticipare l'iniezione	-migliora il consumo specifico ("bsfc"). -abbassa la quantità di particolato prodotto -incremento delle emissioni di NO _x
Alzare la pressione d'iniezione	-incremento delle emissioni di NO _x -decremento della quantità di particolato -leggero miglioramento del "bsfc"
Iniezione(i) Pilot	-miglioramento della rumorosità
Incrementare l'EGR	-decremento della quantità di NO _x prodotti -quantità di particolato pericolosamente elevato -miglioramento della rumorosità -leggero incremento del "bsfc"

1.1 LA FORMAZIONE DEGLI INQUINANTI

Al fine di ridurre queste specie chimiche è necessario misurare il rapporto di Aria/Combustibile presente in camera, per far ciò si utilizzano sonde di vario tipo posizionate sullo scarico, alcune delle quali misurano la concentrazione degli inquinanti (sonde NOx o fast HC) e le correlano a λ , come si vedrà in seguito.

La formazione delle specie inquinanti nei motori a combustione interna è piuttosto difficile da prevedere teoricamente o mediante simulazione numerica. Ciò è principalmente dovuto al fatto che questi fenomeni sono influenzati da un insieme di parametri soggetti ad aleatorietà, in altre parole che variano di ciclo in ciclo in maniera indeterminata a priori, essi sono: la distribuzione della miscela, la temperatura e la pressione all'interno della camera di combustione, tale fenomeno prende anche il nome di "dispersione ciclica". Le mappe sono quindi ricavate per via sperimentale, modificando lentamente i parametri di controllo accessibili (velocità del motore, pressione nel collettore d'aspirazione, quantità di EGR impiegato) e monitorando i livelli d'inquinamento prodotti.

Tutti questi approcci si basano sul presupposto fondamentale che la formazione delle specie inquinanti sia dipendente, in modo deterministico, dai parametri di controllo d'ingresso e dalle condizioni termodinamiche del sistema. Tuttavia questo non è del tutto vero nella realtà considerando il singolo ciclo a causa della dispersione ciclica, occorre dunque precisare che tali valutazioni siano valide riferendosi alla media di più cicli.

Concentrandosi sull'influenza della composizione chimica della miscela, in funzione di λ essa può essere:

- 1) Stechiometrica
- 2) Non stechiometrica:
 - a) Magra $\lambda > 1$
 - b) Grassa $\lambda < 1$

Per definire la stechiometria occorre conoscere la composizione chimica del combustibile e le reazioni che portano alla formazione dei prodotti, poiché questo è molto complicato a causa dell'elevato numero di specie intermedie, si considera la seguente reazione semplificata per un generico idrocarburo:

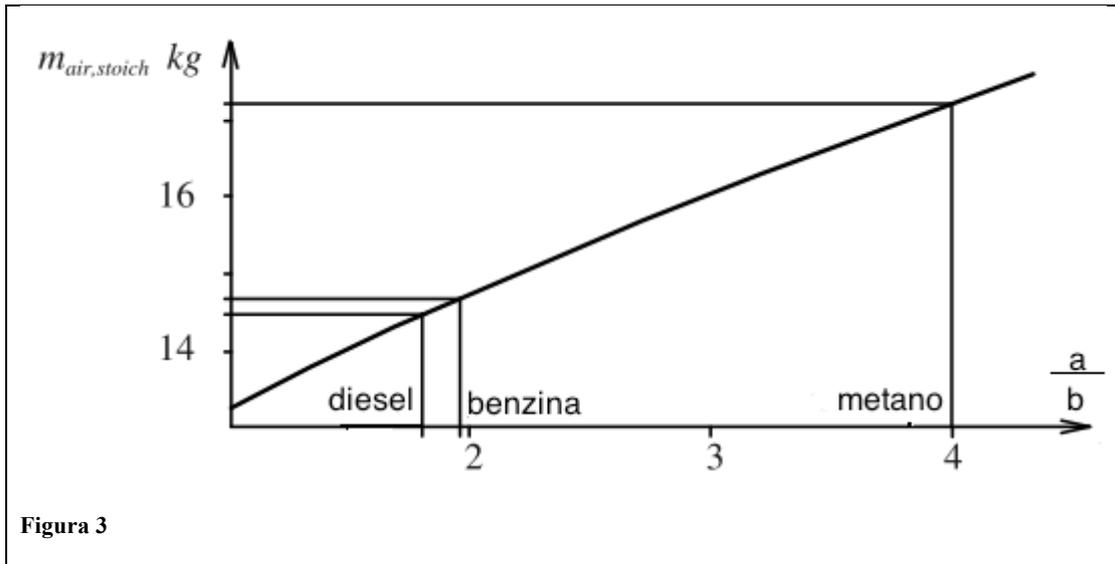


ed assumendo l'aria atmosferica composta dal: $\begin{cases} 21\% - O_2 \\ 79\% - N_2 \end{cases}$

$$z = \frac{x}{2}; m = y; t = \left(\frac{1}{0,21} - 1\right) \times \left(y + \frac{x}{4}\right); t = \left(\frac{1}{0,21}\right) \times \left(y + \frac{x}{4}\right)$$

da cui la massa d'aria stechiometrica per bruciare un kg di combustibile è:

$$\frac{137 \times \left(1 + \frac{a}{b \cdot 4}\right)}{12 + \frac{a}{b}}$$



In realtà la combustione completa presenta sempre tracce (da diverse decine a migliaia di ppm) di specie inquinanti, le principali sono:

Tabella 2

INQUINANTI	CAUSA
Idrocarburi HC	Ossidazione incompleta
Monossido di carbonio CO	
Ossidi di azoto NOx	Ossidazione indesiderata
Particolato(diesel)	Elevate temperature localizzate

Le concentrazioni, inoltre, variano in funzione del tipo di combustione e di conseguenza del motore, come in figura, dove vi sono le concentrazioni in funzione di λ per un motore ad accensione comandata e per un diesel.

Motori benzina

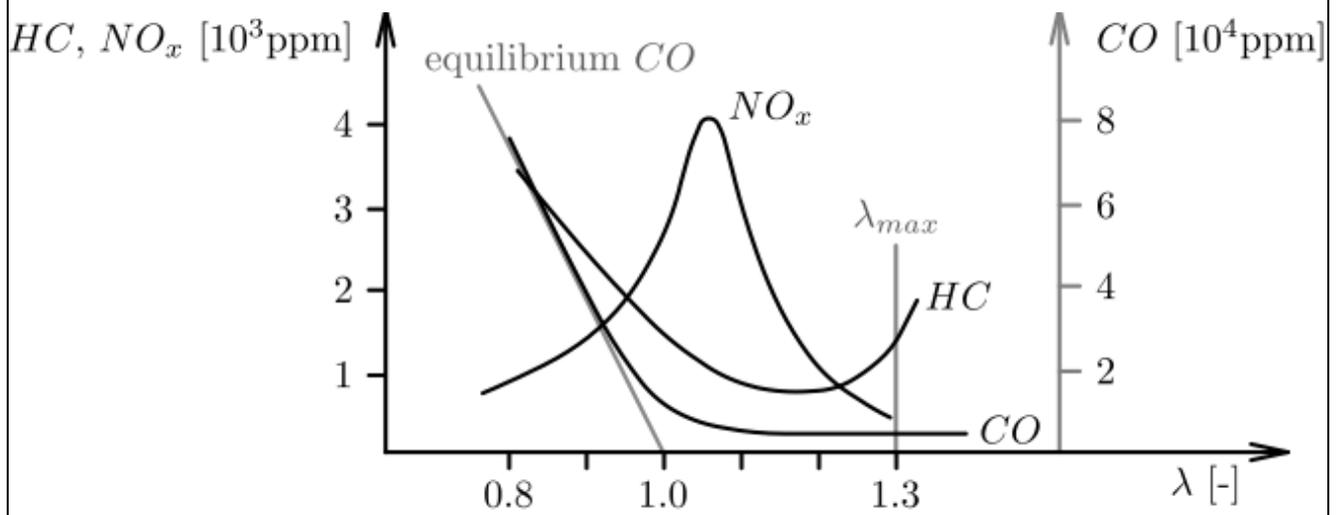


Figura 4

Motori diesel

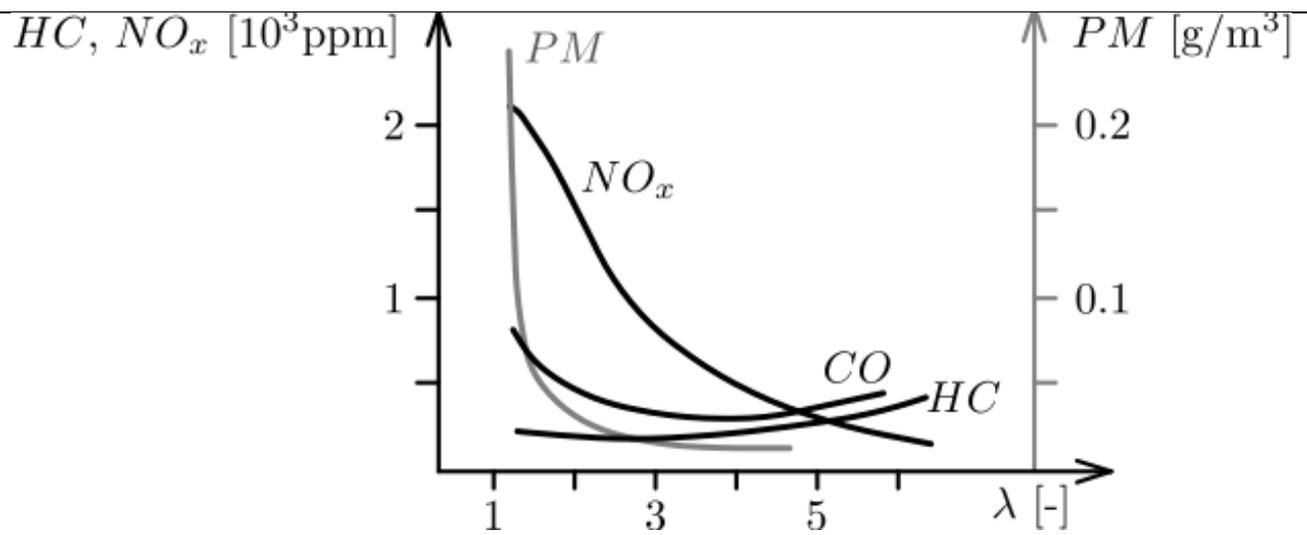
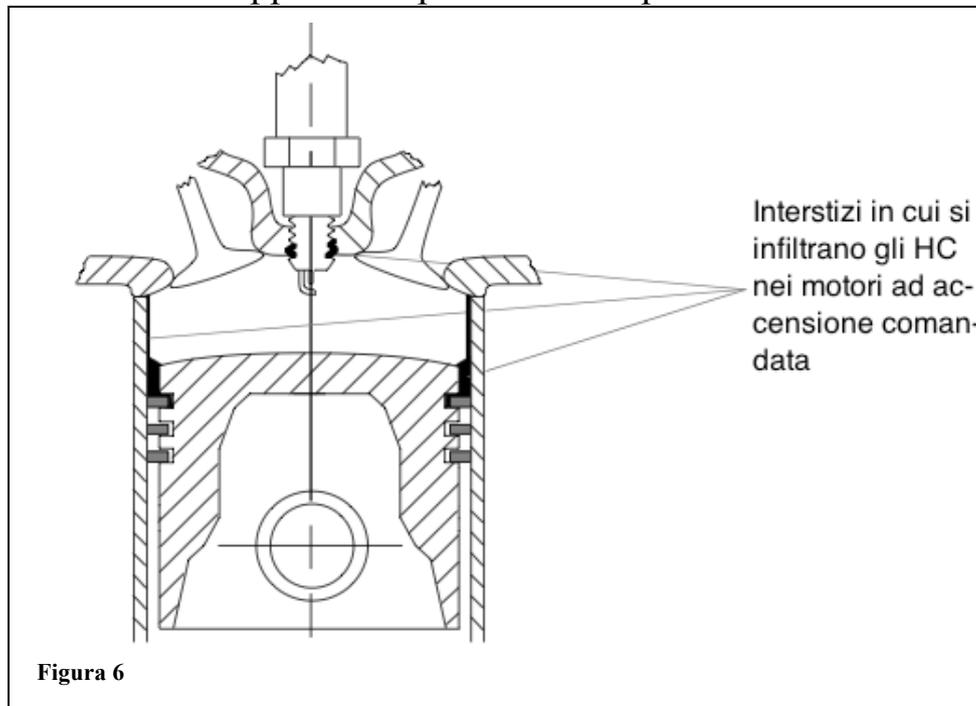


Figura 5

1.1.1 Idrocarburi e monossido di carbonio

Essi costituiscono un problema soprattutto per i motori a benzina poiché nei motori diesel generalmente si hanno miscele magre; nei motori ad accensione comandata invece la loro formazione si ha sia per miscele grasse a causa della scarsità di ossigeno presente, sia per miscele estremamente magre poiché in tali condizioni si generano misfires (mancata accensione della miscela) che causano l'incremento delle emissioni di HC. I misfires provocano anche la riduzione della temperatura nel cilindro e nei gas di scarico, riducendo così la possibilità di un'ossidazione post-combustione degli idrocarburi. Si precisa che le mancate accensioni della miscela non incrementano la quantità di monossido di carbonio. Nei motori benzina dai grafici presentati sopra, si nota che per miscele stechiometriche le concentrazioni di HC e CO non si azzerano, questo può essere spiegato come segue:

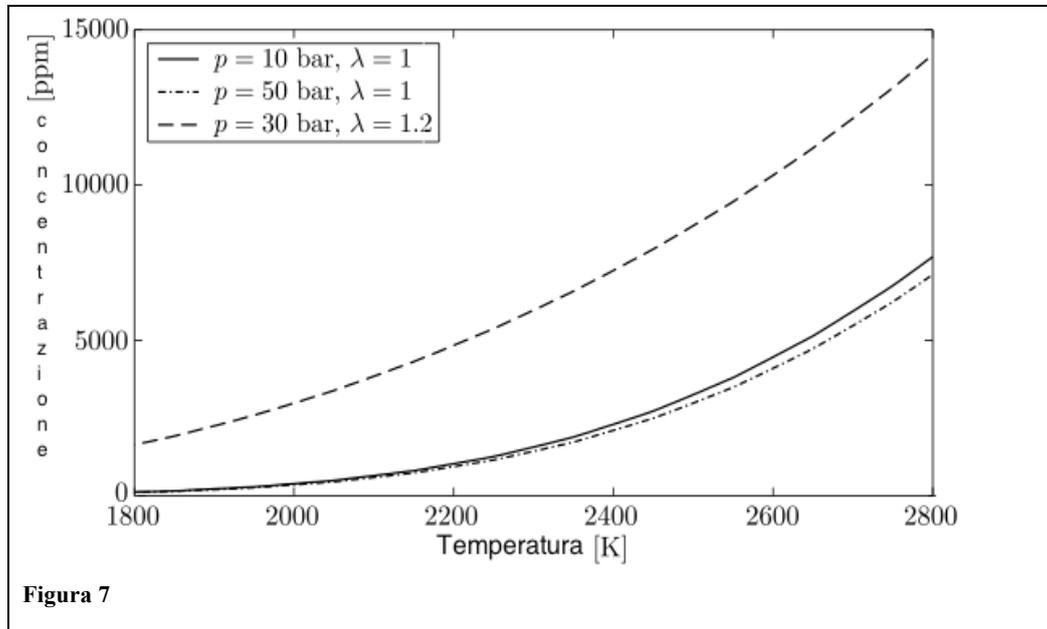
- Durante la fase di espansione il rapido raffreddamento della carica in camera provoca il "congelamento" delle reazioni, impedendo la completa ossidazione degli HC appena formati e dei CO.
- Durante la compressione la miscela subentra in fessure presenti nel cilindro, una parte di essa è così assorbita nel film d'olio che copre le pareti del cilindro. Quando la pressione diminuisce durante l'espansione, queste molecole di HC sono rilasciate nel cilindro, dove la temperatura in camera è ormai troppo bassa perché si completi l'ossidazione.



- Il fronte di fiamma a contatto con le pareti tende a spegnersi e le perdite di calore impediscono così al composto di ossidarsi completamente.

1.1.2 Ossidi di azoto

Gli ossidi di azoto denominati finora NO_x (in genere NO ma anche NO₂) si formano a causa dei picchi di temperatura (nell'ordine di 2000 K) raggiunti in camera durante la combustione. Le tre variabili più influenti sul processo sono la quantità di ossigeno, la pressione e la temperatura raggiunta in camera.



Questa specie inquinante rappresenta un problema soprattutto per i motori Diesel, nei quali durante il processo di combustione disomogeneo si hanno molteplici punti caldi (hot spots), generando ossidi di azoto che poi restano tali a causa del congelamento della reazione, provocato dal rapido abbassamento della temperatura in espansione.

1.1.3 Particolato

S'intende l'insieme di particelle solide e liquide generate nel processo di combustione e sospensione dei gas di scarico, con concentrazioni maggiori nei motori diesel rispetto ai benzina. Si tratta principalmente di particelle di tipo carbonioso (chiamate anche "fuliggine" o "fumo nero"), la struttura base è formata da $10^5 \div 10^6$ atomi di carbonio; condensati o che hanno assorbito composti organici ad alta massa molecolare (chetoni, aldeidi, esteri, polinucleari aromatici, ecc.).

Queste sostanze, liberate nell'aria, sono inalate e in buona parte trattenute nei polmoni, provocando danni fisiologici diretti.

1.2 SISTEMI PER L'ABBATTIMENTO DELLE EMISSIONI

Dal 1980 i livelli di concentrazione permessi, per le specie inquinanti viste sopra, sono stati ridotti significativamente dalle norme legislative sempre più stringenti:

Normativa Anno		Euro I 1992	Euro II 1996	Euro III 2000	Euro IV 2005	Euro V 2009	Euro VI 2014
Motori a Benzina							
<i>CO</i>	[g/km]	2.72	2.2	2.3	1.0	1.0	1.0
<i>HC</i>	[g/km]			0.2	0.1	0.1	0.1
<i>NO_x</i>	[g/km]			0.15	0.08	0.06	0.06
<i>HC + NO_x</i>	[g/km]	0.97	0.5				
<i>PM</i>	[g/km]					0.005 ⁽ⁱ⁾	0.005 ⁽ⁱ⁾
Motori Diesel							
<i>CO</i>	[g/km]	3.16	1.0	0.64	0.5	0.5	0.5
<i>HC</i>	[g/km]						
<i>NO_x</i>	[g/km]			0.5	0.25	0.18	0.08
<i>HC + NO_x</i>	[g/km]	1.13	0.7	0.56	0.3	0.23	0.17
<i>PM</i>	[g/km]	0.18	0.08	0.05	0.025	0.005	0.005
Mezzi pesanti Diesel							
<i>CO</i>	[g/kWh]	4.5	4.0	2.1	1.5	1.5	1.5
<i>HC</i>	[g/kWh]	1.1	1.1	0.66	0.46	0.46	0.13
<i>NO_x</i>	[g/kWh]	8.0	7.0	5.0	3.5	2.0	0.4
<i>PM</i>	[g/kWh]	0.36	0.15	0.1	0.02	0.02	0.01
Smoke	[m ⁻¹]			0.8	0.5	0.5	
Normativa				LEV	ULEV	SULEV	
<i>CO</i>	g/miglio			4.2	2.1	1.0	
<i>NMOG</i>	g/miglio			0.09	0.055	0.01	
<i>HCOH</i>	g/miglio			0.018	0.011	0.004	
<i>NO_x</i>	g/miglio			0.07	0.07	0.02	
<i>PM</i>	g/miglio			0.01	0.01	0.01	

Tabella 3

Solo i motori ad accensione comandata funzionanti a $\lambda=1$ stechiometrico sono in grado di ottenere con facilità i livelli di emissioni richiesti utilizzando un catalizzatore a tre vie. Tutti gli altri tipi di motore (Diesel, SI a iniezione diretta, ecc...) devono essere combinati con complessi sistemi di trattamento dei gas di scarico come la trappola per gli NO_x, il catalizzatore selettivo (SCR) e il filtro antiparticolato.

1.2.1 Il catalizzatore a tre vie

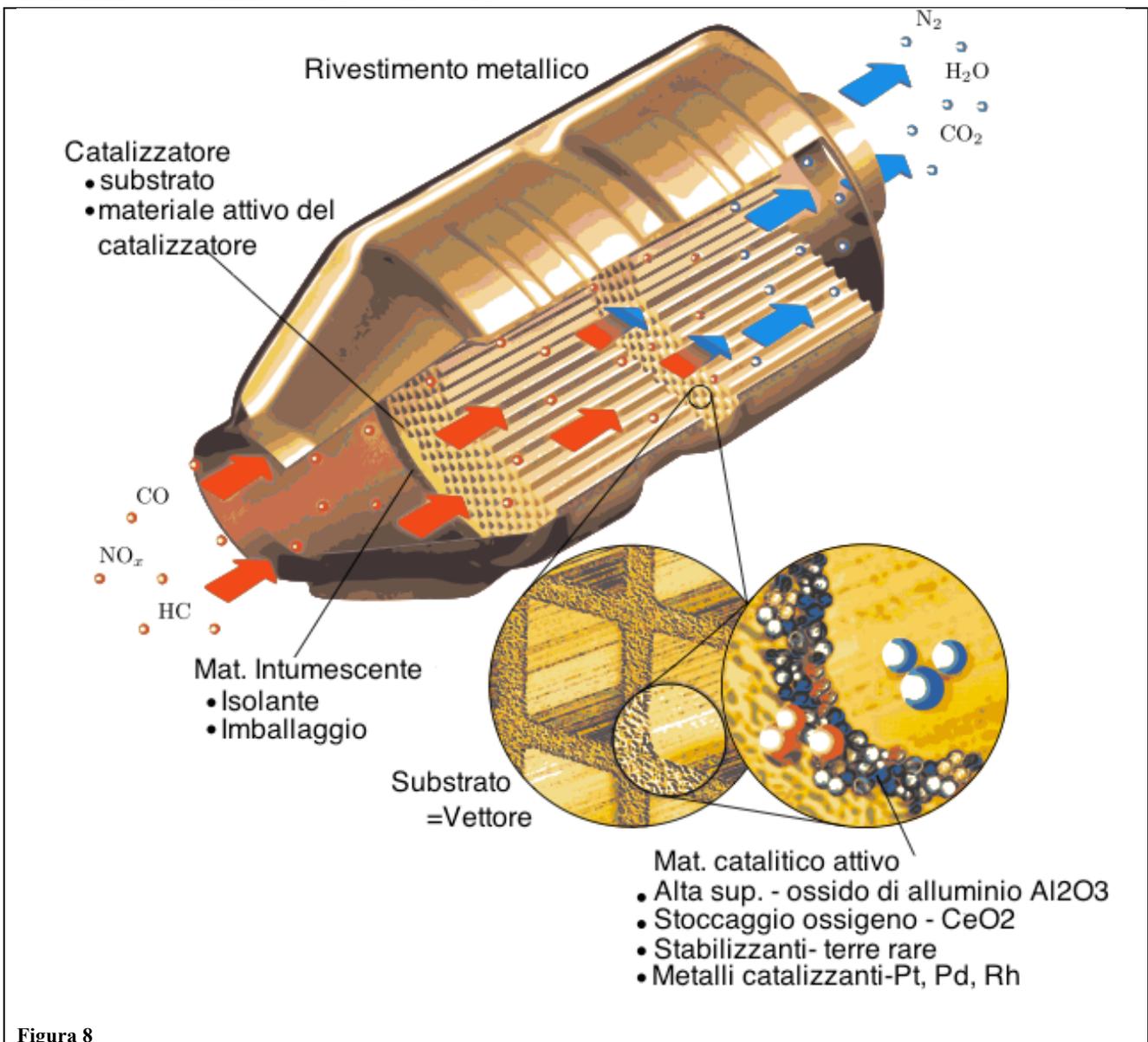


Figura 8

Già dalla fine degli anni ottanta, su ogni nuovo veicolo con motore a benzina venne installato un catalizzatore e almeno una sonda lambda per ridurre le emissioni di sostanze inquinanti. Il più comune fra quelli usati oggi è quello a tre vie, il suo nome deriva dalla capacità di ridurre di ossidi d'azoto e ossidare i CO e gli HC. A regime il sistema è in grado di rimuovere oltre il 98% degli inquinanti ma con elevate limitazioni su λ .

Data l'equazione di Arrhenius: $vel.reazione = Cost \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}$ i catalizzatori sono elementi in grado di far avvenire le reazioni anche a basse temperature (rispetto quelle in camera) come quelle presenti allo scarico, di fatto abbassano l'energia di attivazione E_a .

Un catalizzatore ideale porta a termine le seguenti reazioni chimiche:

- $NO + CO \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + CO_2$
- $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$
- $H_aC_b + (b + \frac{a}{4}) \cdot O_2 \rightarrow b \cdot CO_2 + \frac{a}{2}H_2O$

in realtà tali reazioni sono più complesse di quanto descritto finora, e formate da un'elevata successione di step intermedi.

Generalmente i reagenti sono prima assorbiti sulla superficie del catalizzatore per garantire poi alle sostanze catalizzanti (platino Pt, Palladio Pd, o rodio Rh) il tempo necessario affinché:

- sia presente una sufficiente quantità d'ossigeno
- si completino le reazioni

Per l'ossidazione degli HC e CO, l'O₂ viene immagazzinato nel catalizzatore grazie alla seguente reazione chimica:



mentre per la riduzione degli ossidi d'azoto è necessario far funzionare il motore con miscele grasse in maniera tale da creare un'atmosfera riducente all'interno del catalizzatore.

Prevedere i tassi di conversione del catalizzatore è molto importante per la diagnosi on-board (OBD), poiché esso deve essere in grado di avvertire il conducente quando questo non è più in grado di rimuovere gli inquinanti dai gas di scarico, al fine di non superare i limiti imposti dalle normative ULEV o Euro IV, i tassi di conversione devono superare il 96%. Pertanto, i risultati degli algoritmi OBD devono essere molto precisi; un obiettivo difficile considerando i pochi sensori disponibili per le macchine di produzione in serie.

Un'altra caratteristica rilevante per un catalizzatore è il tempo che esso impiega a riscaldarsi poiché a basse temperature è inattivo e le normative più stringenti prevedono che la temperatura di avviamento a freddo oltre alla prova già presente a 20°C venga affiancata anche da un test a -7°C, per questa esigenza la posizione del catalizzatore in passato si è avvicinata sempre di più al collettore di scarico. Una volta raggiunta una temperatura sufficientemente elevata, si genera una reazione a catena dovuta al calore rilasciato dalle reazioni chimiche che incrementano a loro volta la temperatura interna del catalizzatore, aumentandone l'efficienza. Un parametro di raffronto sotto questo punto di vista per i catalizzatori è il tempo di light-off ovvero il tempo necessario affinché il catalizzatore raggiunga una temperatura sufficiente a garantire un'efficienza di conversione degli idrocarburi pari al 50 %.

2 INTRODUZIONE ALLE SONDE λ

Quando si sviluppano modelli orientati al controllo dei TWC, l'obiettivo principale è quello di prevedere il livello di stoccaggio d'ossigeno, poiché questo non può essere misurato direttamente. Pertanto, dev'esser stimato indirettamente, in genere si usano sensori λ che misurano la concentrazione residua di O_2 allo scarico; sfortunatamente, in condizioni grasse si rileva un certo numero di altre specie come idrogeno ma anche CO e HC, pertanto, al fine di consentire una corretta interpretazione dell'uscita del sensore questi disturbi vanno considerati nel modello del catalizzatore, assieme al fattore tempo che provoca un calo dell'efficienza.

La sonda lambda è quindi fondamentale per mantenere il corretto rapporto di aria carburante e garantire un funzionamento ottimale del catalizzatore.

Il suo principio base è generare un segnale in uscita dipendente dalla quantità di ossigeno residuo presente nel gas di scarico. La centralina, utilizzando questo valore in appositi algoritmi, regola di conseguenza gli organi che agiscono sulla composizione della miscela. Per garantire questo principio, la tecnologia delle sonde lambda nel tempo si è costantemente evoluta, oggi garantisce una ridotta emissione di sostanze nocive, assicura un ridotto consumo di carburante ed una lunga durata del catalizzatore.

2.1 TECNOLOGIE PER SONDE λ

Si distinguono tre diverse tipologie di sonde lambda, in grado di misurare la concentrazione di O_2 , in base del principio di funzionamento:

Al biossido di zirconio	Dette anche “binarie” o “on-off” (HEGO) per la tipologia di segnale in uscita che oscilla tra due valori discreti.
Al biossido di titanio	
A banda larga	Dette anche sonde “lineari”(UEGO) poiché in grado di misurare la concentrazione di ossigeno residuo nei gas di scarico in modo continuo all'interno di un ampio intervallo.

2.1.1 Sonda al biossido di zirconio (HEGO)



Figura 9

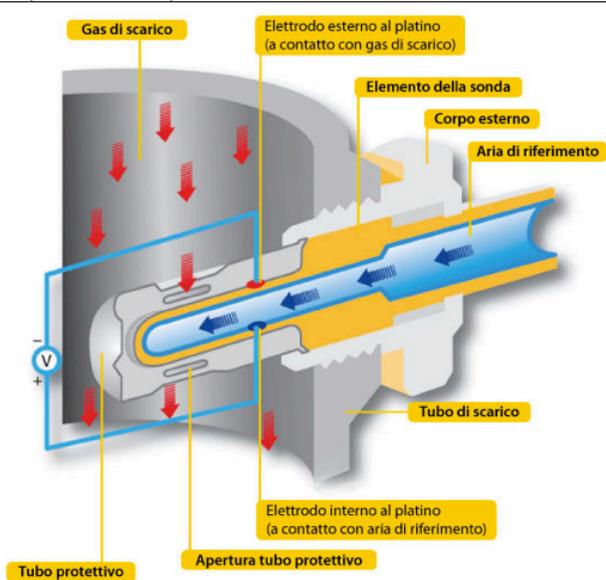


Figura 10

Questa sonda lambda è costituita da un elettrolito solido a base di biossido di zirconio, questo materiale conduce gli ioni di ossigeno da una temperatura di 300°C.

Tramite due elettrodi posti sull'elemento sensibile; uno sul lato interno (prendendo come riferimento l'aria) e l'altro sul lato dei gas di scarico, è possibile misurare il tenore di ossigeno presente. Il segnale di output è così generato dagli ioni di ossigeno che migrano attraverso l'elemento e tentano di compensare la differenza (di pressione parziale) d'ossigeno.

La sonda lambda al biossido di zirconio si contraddistingue per le seguenti caratteristiche:

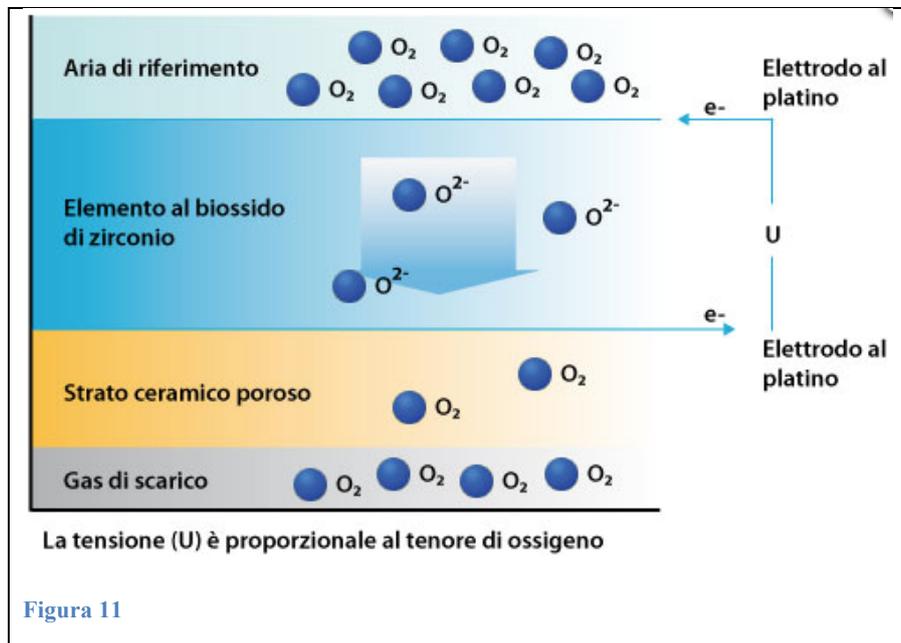
- rapida attivazione
- resistente alle variazioni di temperatura
- resistente all'avvelenamento
- grande affidabilità di misurazione

Queste sonde, a seconda del veicolo, vengono utilizzate come sonde di regolazione e/o diagnosi.

Principio di funzionamento di una sonda al biossido di zirconio

L'elemento sensibile della sonda al biossido di zirconio è cavo ed ha la forma di un dito. Il lato interno è a contatto con una cella di riferimento al cui interno vi è aria prelevata dall'ambiente, il lato esterno si trova a contatto con i gas combusti: entrambi i lati sono rivestiti da un sottile strato poroso di platino che funge da elettrodo. Quando la sonda lambda raggiunge la temperatura

d'esercizio, gli ioni d'ossigeno si spostano all'interno dell'elemento a causa della diversa concentrazione d'ossigeno, tale "migrazione" avviene dalla zona a contatto con l'aria esterna in direzione di quella a contatto con i gas combusti.



Il segnale binario si ottiene per effetto della differenza di potenziale che genera una tensione elettrica (V) sugli elettrodi al platino, se la miscela è magra, il segnale della sonda è di circa 0,1 Volt mentre è 0,9 Volt se grassa; con $\Lambda=1$ invece si ha un valore di tensione caratteristico di 0,45 Volt.

In genere in funzione delle caratteristiche della sonda variano anche il numero di cavi in uscita da essa: da uno a due cavi (segnale generato e terra) se la sonda non è riscaldata fino a quattro cavi se invece possiede quest'ultima capacità.

2.1.2 Sonda al biossido di titanio(HEGO)



Figura 12

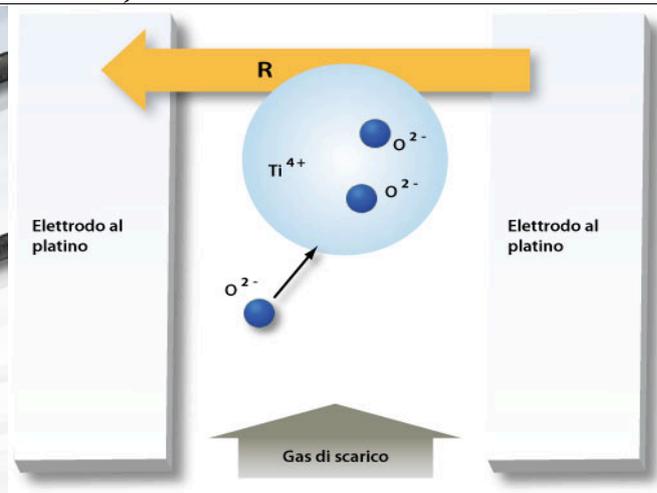


Figura 13

La sonda lambda al biossido di titanio è una sonda binaria con una caratteristica particolare, la sua resistenza elettrica varia proporzionalmente alla quantità di ossigeno presente nei gas combusti e si contraddistingue per le seguenti caratteristiche:

- robustezza e compattezza
- elevata velocità di reazione dell'elemento sensibile
- non necessita della cella contenente l'aria di riferimento (dimensioni ridotte del sensore)
- raggiunge rapidamente la temperatura d'esercizio

Queste sonde erano perlopiù utilizzate in passato come sonde di regolazione o di diagnosi, attualmente sono in disuso.

Principio di funzionamento di una sonda al biossido di titanio

Il funzionamento è basato su un elemento sensibile al biossido di titanio che varia la propria resistenza elettrica proporzionalmente alla pressione parziale dell'ossigeno nella miscela dei gas di scarico. In caso di miscela magra ($\lambda > 1$) il biossido di titanio conduce meno, mentre in caso di miscela grassa ($\lambda < 1$) la sua conducibilità aumenta, quindi applicando una tensione sull'elemento, il voltaggio in uscita varia in base alla concentrazione di ossigeno nei gas di scarico. La temperatura d'esercizio di queste sonde lambda è di 700°C e non deve superare gli 850°C altrimenti rischia di danneggiarsi.

2.1.32.1.3 Sonda lambda a banda larga(UEGO)



Figura 14

Con l'esigenza di ridurre i consumi e le emissioni inquinanti è emersa anche la necessità di controllare il funzionamento dei motori al di fuori del punto di funzionamento stechiometrico ($\lambda = 1$): a tale scopo sono state sviluppate le sonde a banda larga.

Queste sonde lambda, dette lineari, sono in grado di emettere un segnale in uscita proporzionale alla quantità di ossigeno residuo nei gas scarico per un ampio “range” di λ . Il segnale d'uscita corrisponde alla corrente di pompaggio (I_p) necessaria a imporre nella cella di misura una percentuale d'ossigeno costante. Maggiore è lo scostamento, del gas di scarico in entrata, da questo valore e maggiore è la corrente di pompaggio e, di conseguenza, il segnale in uscita dalla sonda.

La sonda lambda a banda larga offre i seguenti vantaggi:

- il segnale in uscita è disponibile dopo poco tempo dall'accensione della sonda
- il riscaldatore è integrato all'interno dell'elemento sensibile
- struttura ermetica al cui interno il riferimento d'ossigeno è auto generato
- è resistente alle alte temperature
- ha una grande affidabilità

Queste sonde sono utilizzate nei motori a benzina come sonde di regolazione e si trovano sempre più anche in veicoli diesel.

Principio di funzionamento di una sonda lineare

Rappresentazione tridimensionale dell'elemento sensibile di una sonda a banda larga

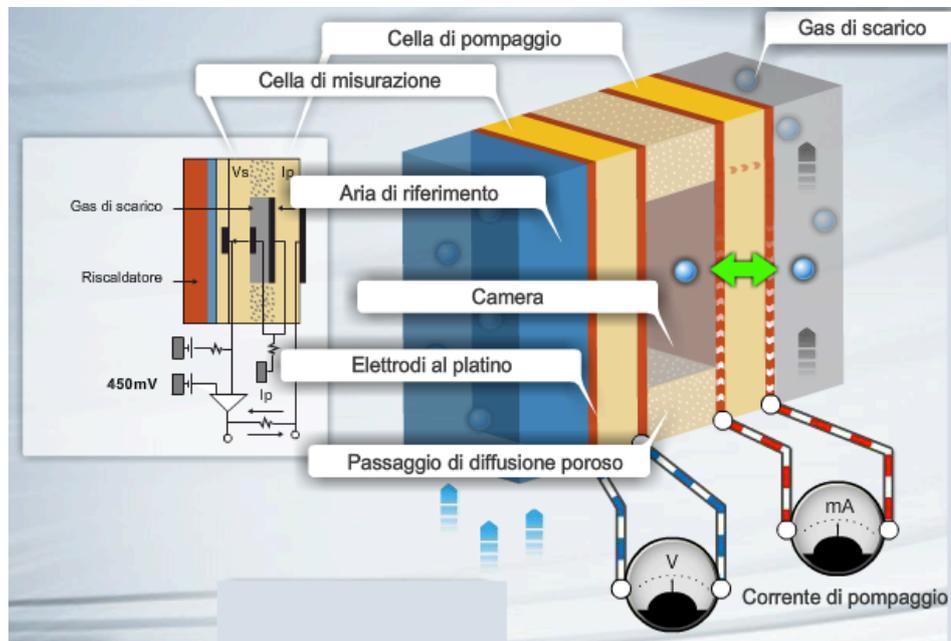


Figura 15

Le sonde a banda larga sono dotate di due celle: una di misura e una di pompaggio.

Con l'ausilio della cella di misura, il tenore d'ossigeno dei gas di scarico nella camera di rilevazione, è misurato e confrontato con un valore nominale di 450 mV. In caso di divergenza da questo valore, mediante l'attivazione di un flusso di pompaggio sull'apposita cella, vengono pompati ioni di ossigeno in entrata o in uscita dalla camera di rilevazione finché il valore della tensione della cella di misurazione non corrisponde nuovamente a 450 mV.

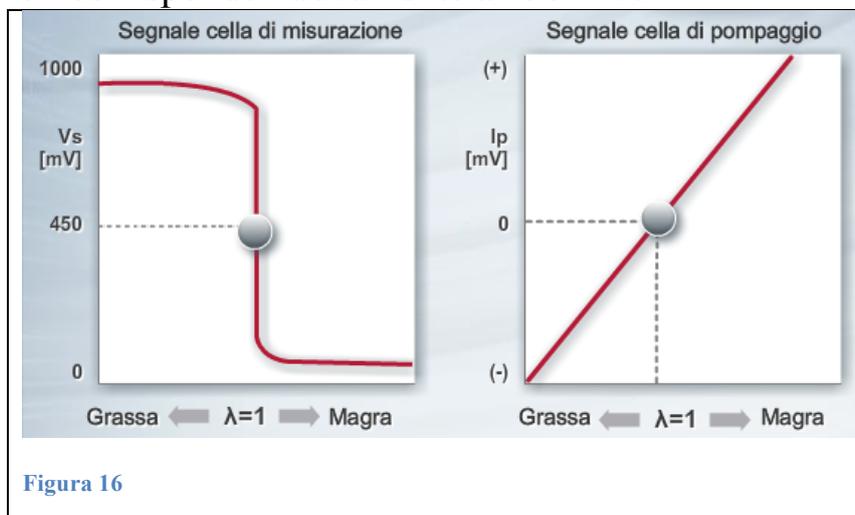
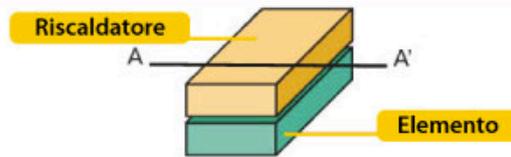


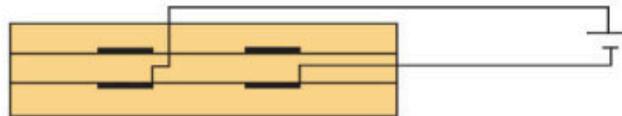
Figura 16

Sezione dell'elemento planare di una sonda lambda a banda larga

Vista A-A'



Riscaldatore



Elemento

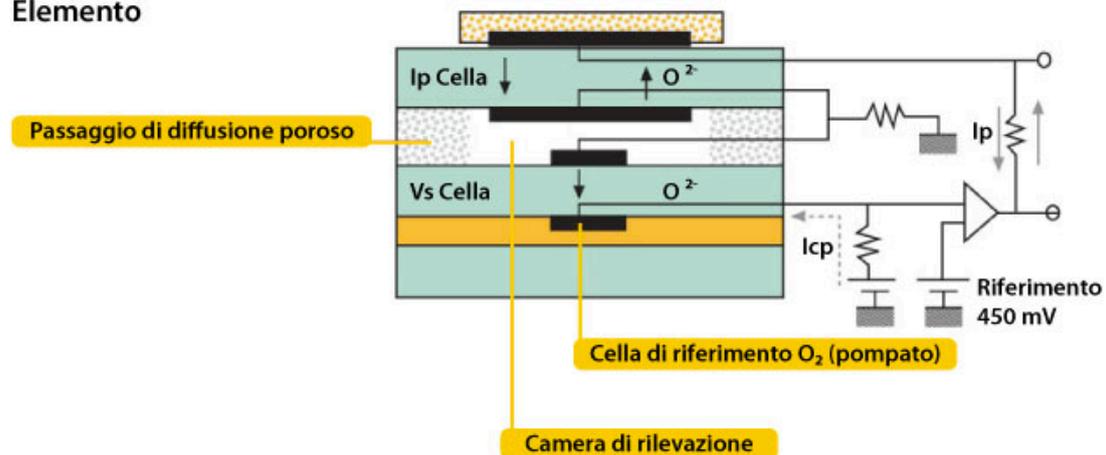


Figura 17

La corrente di pompaggio è la grandezza che descrive in modo quasi lineare l'esatto valore della concentrazione di ossigeno nella miscela, se stechiometrica è uguale a zero (poiché la pressione parziale dell'ossigeno della camera di rilevazione corrisponde al valore nominale sopraccitato).

Il numero dei cavi per questo tipo di sonda (in genere) è pari a cinque: due per il riscaldamento, uno per la corrente di pompaggio (I_p) e uno per la cella di misura (V_s), infine si ha un cavo che funge da terra per la cella di pompaggio e misurazione.

2.2 SONDE λ “SPECIALI”

Per le moderne applicazioni occorrono spesso sonde speciali, le principali sono:

Sonde NOx	I motori benzina a iniezione diretta richiedono uno speciale catalizzatore ad accumulo di NOx e una sonda NOx
Sonde per moto	Dall'ingombro ridotto
Sonde per le corse sportive	Queste sonde garantiscono un consumo di benzina corretto e la massima performance.

2.2.1 Sonda NO_x



Figura 18

Per rendere i motori a benzina più economici ed ecologici, i costruttori di auto si affidano sempre più spesso ai motori a iniezione diretta che in particolari condizioni di carico parziale possono essere utilizzati con miscele magre. Questa soluzione offre consumi ridotti (dal 12 al 20%) ma richiede uno speciale catalizzatore, in grado di “intrappolare” gli ossidi d’azoto e una sonda che misuri la concentrazione di questo inquinante, garantendo così la massima precisione e affidabilità nel controllo della rigenerazione del catalizzatore NOx.

Funzionamento della sonda NOx:

Nel funzionamento "magro", il punto d'esercizio non rientra più nella finestra di conversione ottimale del catalizzatore, poiché non è più caratterizzato da miscele stechiometriche ($\lambda = 1$). È pertanto possibile che gli ossidi di azoto non siano più convertiti in modo ottimale e che la loro produzione aumenti in modo considerevole.

Il sensore NOx riconosce la saturazione della capacità di accumulo del catalizzatore e ordina alla centralina di passare per circa due secondi in modalità "grassa" ($\lambda < 1$). Gli ossidi di azoto si riducono e sono convertiti in azoto innocuo. Nel funzionamento con miscela magra, questa "fase di rigenerazione" si ripete ogni 60 secondi circa.

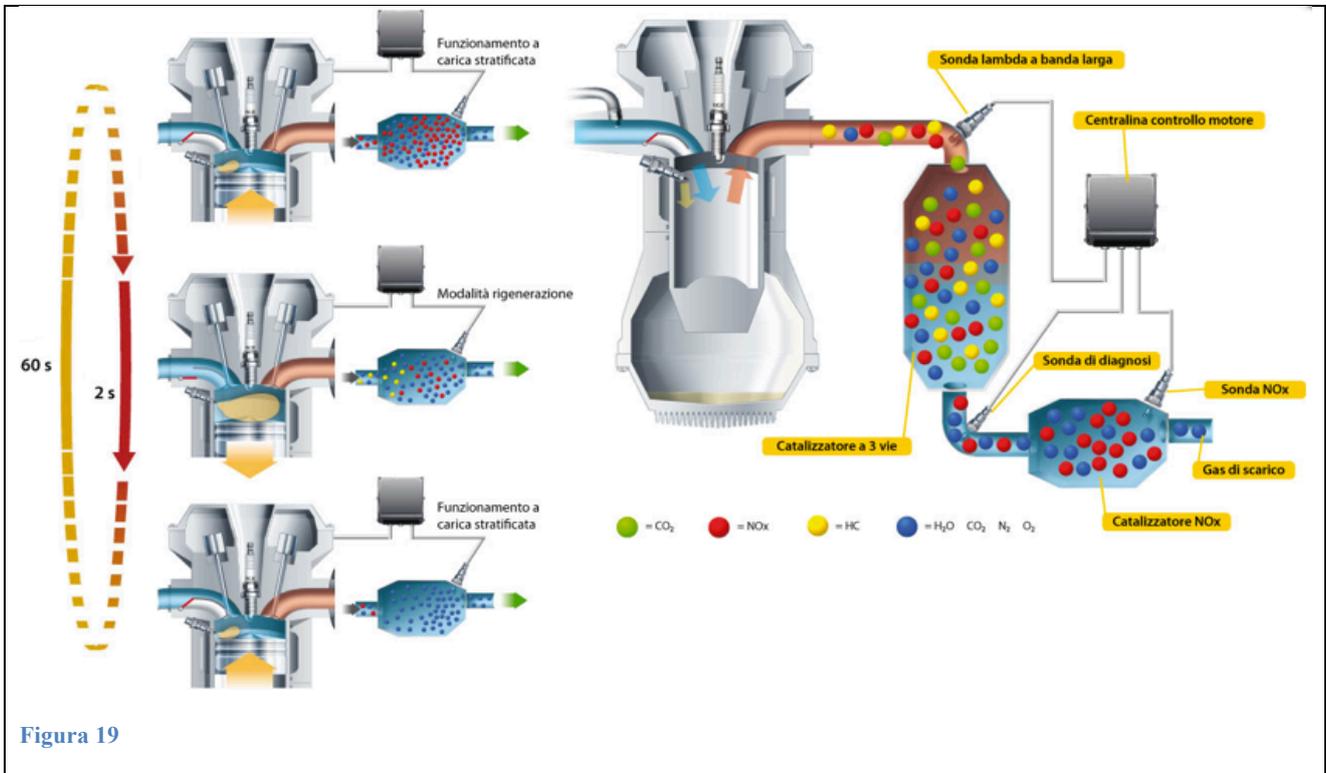


Figura 19

Layout dei cavi

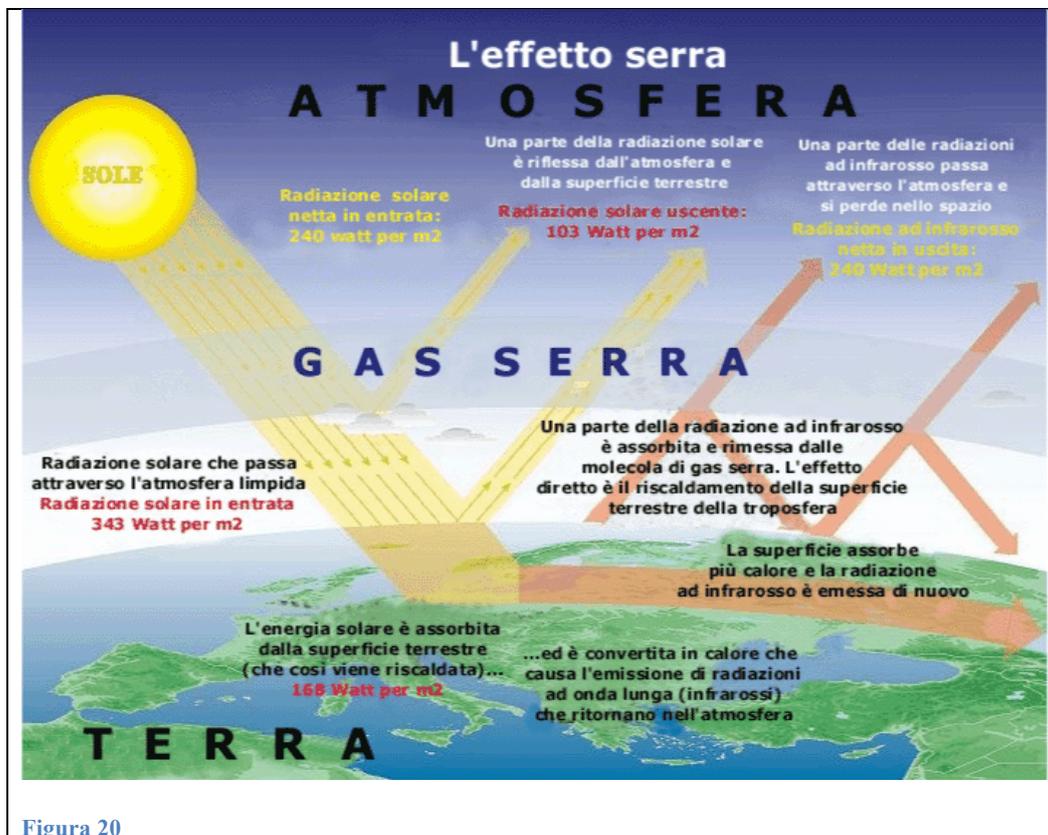
Le sonde NOx in genere hanno sei cavi di collegamento: due cavi per l'alimentazione dell'elemento riscaldante, due per i segnali della corrente di pompaggio, un cavo per la tensione di misura (Vs+) e infine un cavo che funge da terra.

2.2.2 Studio approfondito delle problematiche, di un sensore NO_x al biossido di zirconio (ZrO₂), riguardanti la misurazione delle basse concentrazioni di NO_x

Dalla consultazione del paper Sae riportato in [bibliografia](#) all'indice 5, si riporta lo studio di un sensore NO_x in atmosfere che presentano una bassa concentrazione di tale inquinante. Lo studio è il frutto delle rivendicazioni sociali per prevenire o rallentare il riscaldamento globale causato dai gas serra, un problema in espansione nell'opinione pubblica, tanto da divenire una questione di primaria importanza.

L'incremento dell'effetto Serra è stato collegato alle emissioni di anidride carbonica (CO₂) già nel 1896 da Svante Arrhenius, noto chimico che constatò l'aumento di temperatura che essa provoca.

È bene sottolineare che comunque l'anidride carbonica non costituisce un problema diretto per la salute dell'uomo, poiché non è considerata un inquinante ma un climalterante. Inoltre la sua presenza nell'atmosfera terrestre è di fondamentale importanza: infatti è in grado d'intrappolare la radiazione infrarossa della luce solare riflettendola nuovamente verso la superficie terrestre, impedendo così alla terra di raffreddarsi.



Per far fronte a tali problematiche, si sono sviluppati motori funzionanti in

condizioni magre, in particolare Diesel poiché si auna regolazione per qualità della combustione. Tuttavia questo genere di combustione favorisce abbondanti emissioni di NO_x, che devono essere ridotte dai sistemi di post-trattamento presenti allo scarico di cui si è già parlato nel capitolo 1.2 SISTEMI PER L'ABBATTIMENTO DELLE EMISSIONI.

Al fine di poter controllare anche piccole concentrazioni di NO_x, emesse durante le combustioni magre, si riportano i risultati dei test per un sensore al biossido di zirconio a doppia cella di pompaggio d'ossigeno.

La precisione di misurazione nel funzionamento standard del sensore, non si è dimostrata sufficientemente elevata per il monitoraggio e il controllo dei bassi livelli di NO_x (nell'ordine di qualche decina di ppm). Non è quindi possibile ottenere un feedback affidabile dell'assorbimento e deassorbimento di NO_x, utilizzando il sensore a valle del catalizzatore.

Nelle normali condizioni di funzionamento il motore Diesel (di fabbricazione Toyota), vede alcuni suoi parametri variare all'interno dei seguenti range:

- Concentrazione di ossigeno: dal 2 al 14.5%
- Temperatura dei gas di scarico: da 175 a 730°C
- Contropressione dei gas di scarico: da 2 a 100 mmHg

In tali condizioni l'ossigeno presente nei gas di scarico, provoca un errore del 10% sulle misurazioni di NO_x. Tuttavia tal errore può essere migliorato del ± 2%, consentendo misurazioni di concentrazioni anche inferiori ai 100 ppm. Pertanto questo miglioramento può rivelarsi utile per lo sviluppo on-board di sistemi in grado di controllare l'assorbimento e deassorbimento degli ossidi d'azoto in basse concentrazioni, utilizzando il sensore studiato.

Il sensore installato per ritenersi affidabile a questo tipo d'impiego deve possedere un'elevata accuratezza di misurazione, con un errore massimo di ± 10 ppm, preferibilmente di ±5 ppm, ogni 100 ppm di ossidi d'azoto.

Descrizione dettagliata del sensore

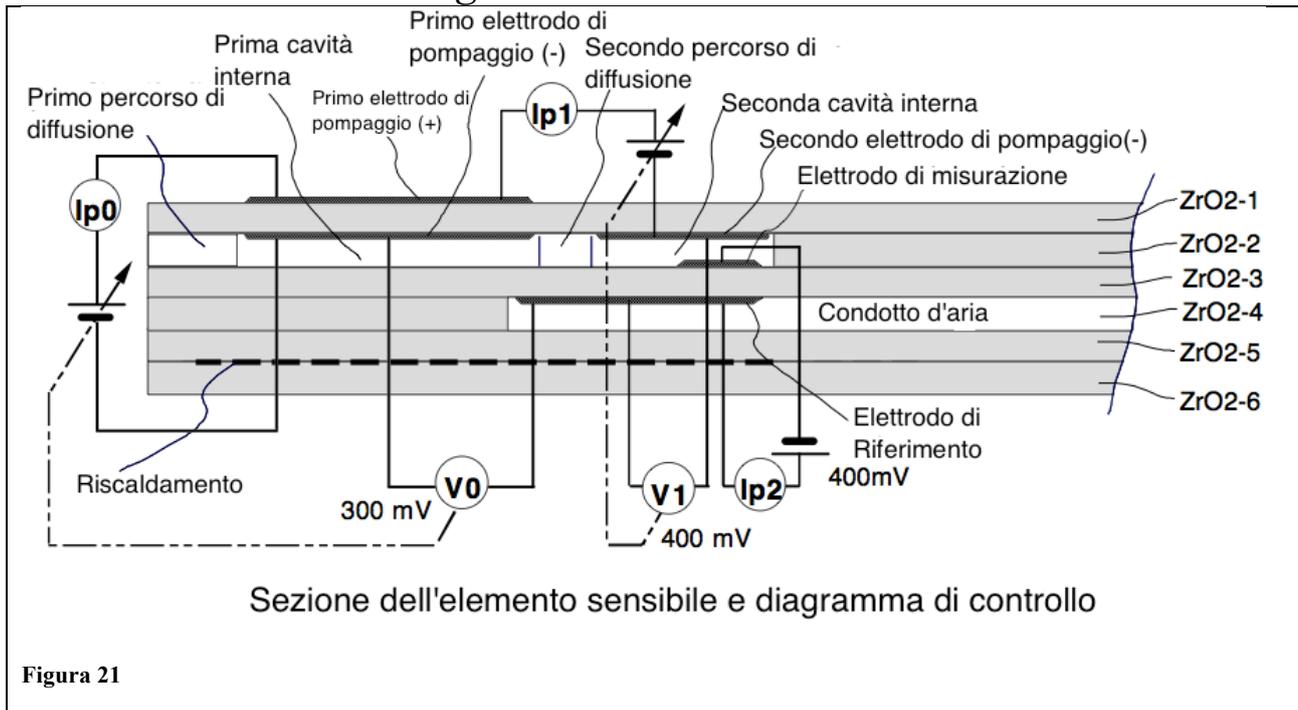


Figura 21

In figura si vede una sezione trasversale dell'elemento sensibile del sensore NO_x e uno schema del circuito elettrico che lo comanda. La funzione di ciascun componente può essere così riassunta:

1. Prima cavità interna: il suo scopo è connettere il gas proveniente dallo scarico con un "percorso di diffusione" che lascia diffondere il gas in una seconda cavità, a una predeterminata resistenza.
 - 1.1. Prima cella di pompaggio dell'ossigeno: è costituita da una coppia di elettrodi, (catodo + e anodo -), posti su uno strato di ZrO₂-1, in grado di regolare la concentrazione d'ossigeno al livello prefissato.
 - 1.2. Prima cella sensibile alla quantità d'ossigeno: controlla la concentrazione d'O₂ nella prima cavità tramite FEM (forza elettromotrice) generando un segnale di feedback per la prima cella di pompaggio. Il valore della forza elettromotrice è settato a 300 mV corrispondenti a circa un 1 ppm di concentrazione d'ossigeno.
2. Seconda cavità interna: in analogia alla prima, il suo scopo è di connettere il gas proveniente dalla prima cella a un "percorso di diffusione", che lascia diffondere il gas a una predeterminata resistenza.
 - 2.1. Seconda cella di pompaggio d'O₂: costituita da una coppia di elettrodi di cui l'anodo (-) è posizionato nella seconda cella, mentre il catodo (+) nella prima, entrambi sullo strato di ZrO₂-1 per regolare la quantità d'ossigeno.
 - 2.2. Seconda cella sensibile alla quantità d'ossigeno: analoga alla prima, controlla la concentrazione d'O₂ nella cavità tramite FEM (forza elettromotrice) generando un segnale di feedback per la prima cella di

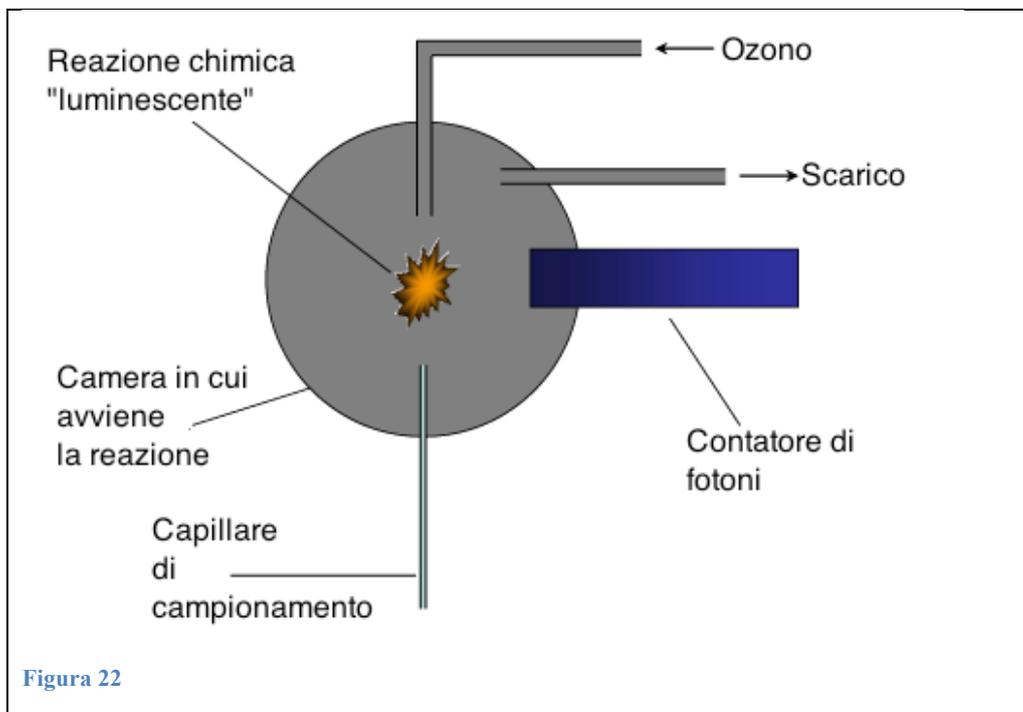
pompaggio. Il valore della forza elettromotrice è però settato a 400 mV corrispondenti a circa un 0,01 ppm di concentrazione d'ossigeno.

3. Cella di misurazione degli NO_x: è costituita da un elettrodo di misurazione posto nella seconda cavità e da un elettrodo di riferimento nel condotto dell'aria, l'elettrodo di misurazione è al rodio e funge da catalizzatore per gli NO_x, si libera così una certa quantità di O₂ che viene rilevata dalla corrente di pompaggio presente nella cella.

Introduzione ai sensori CLD (chemi-luminescence detector).

Poiché impiegati in questo studio come metro di paragone per il sensore NO_x al ZrO₂ se ne presenta una breve descrizione.

I sensori CLD rappresentano un metodo standard per misurare la concentrazione di ossidi d'azoto.



La reazione che avviene tra l'ossido d'azoto e l'ozono (O₃) emette luce e ciò rappresenta la base per il funzionamento del CLD, il quale è in grado di rilevare la quantità di fotoni prodotti tramite un tubo fotomoltiplicatore (PMT). L'output che esso genera, proporzionale alla concentrazione di NO, è molto accurato ed ha una costante di tempo molto bassa nell'ordine di pochi ms.

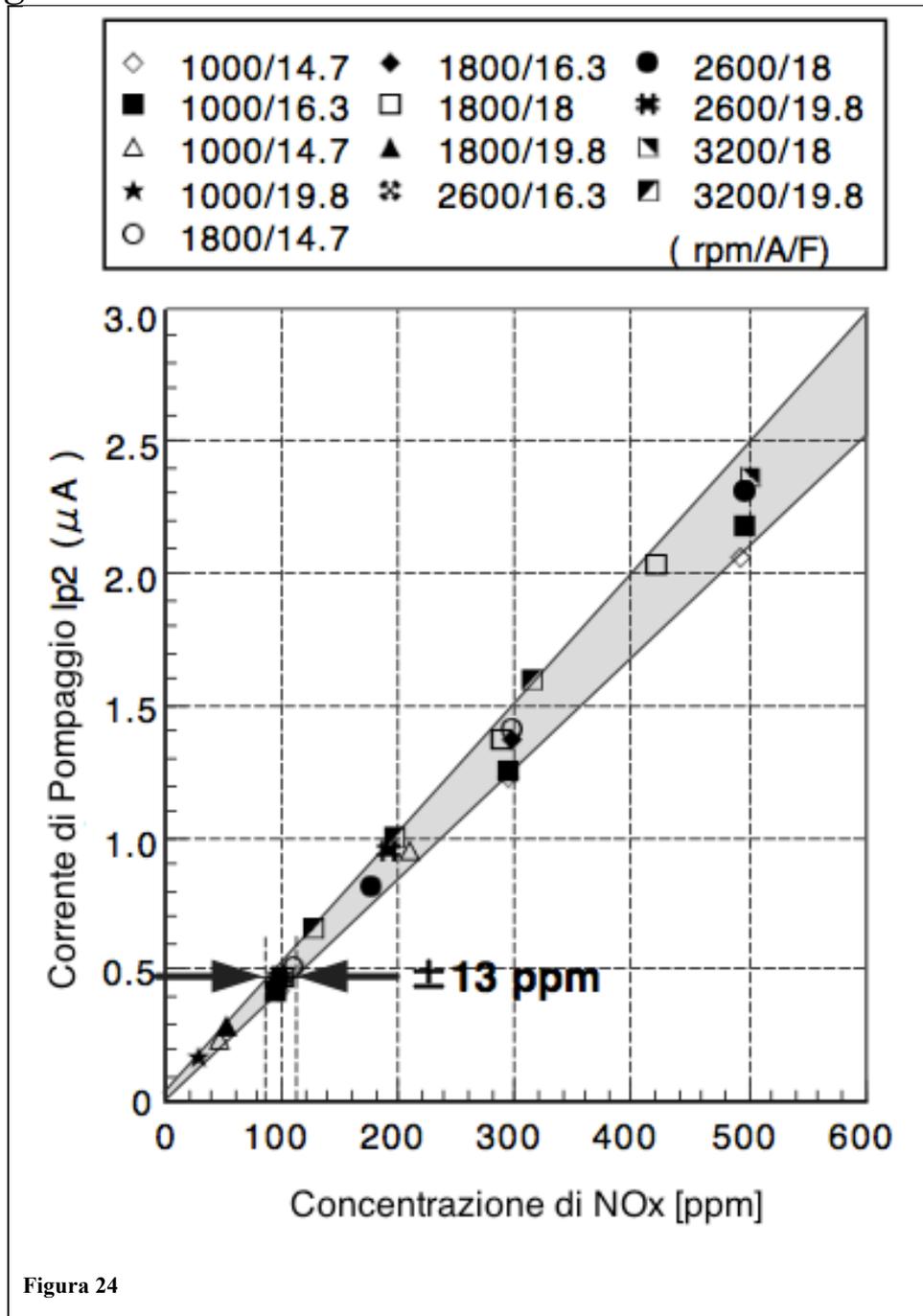
In genere i CLD hanno due teste di campionamento controllate a distanza da un'unità di controllo, in grado di campionare contemporaneamente da due posizioni differenti.

Il loro campo di applicazione non prevede l'impiego on-board a causa del costo e delle dimensioni non contenute, come da figura:



Figura 23

Segnale del sensore NOx su un motore Benzina



In figura è possibile vedere la relazione che lega la concentrazione di NOx misurata tramite CLD e il sensore preso in analisi. Il sensore NOx è stato poi installato allo scarico di un motore benzina 2.0 di cilindrata dietro il TWC. Il livello di NOx è stato controllato intervenendo sull'A/F, sui giri del motore e sulla quantità di EGR. Nel test la temperatura dei gas (nella posizione in cui è stato installato il sensore) varia da 240 a 660°C. Dai dati misurati è emersa un'accuratezza che si aggira intorno a ± 13 ppm ogni 100 ppm di NOx. Questo livello di precisione è al di sotto di quello richiesto per le misurazioni post catalizzatore.

Segnale del sensore NOx su un motore Diesel

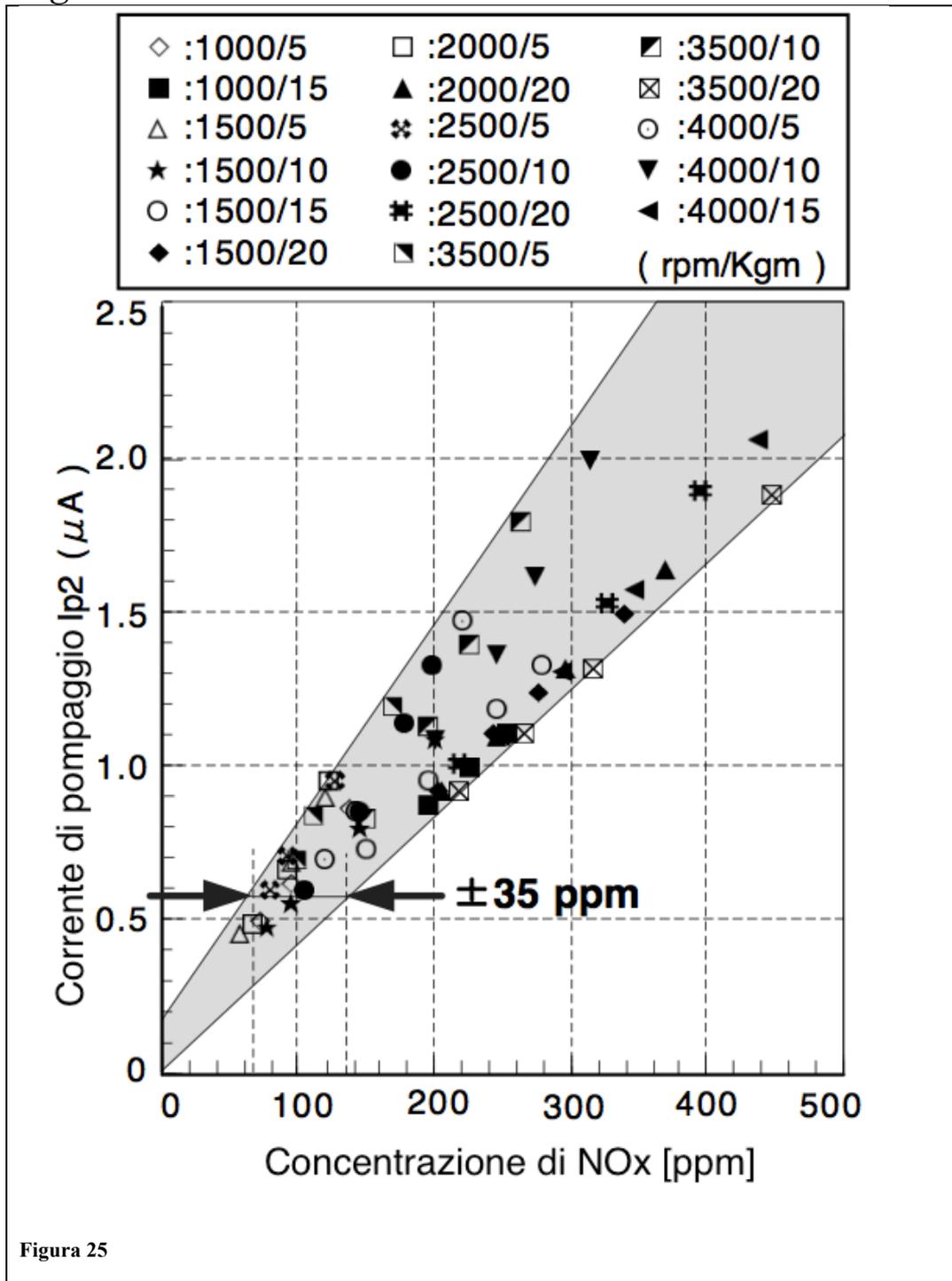


Figura 25

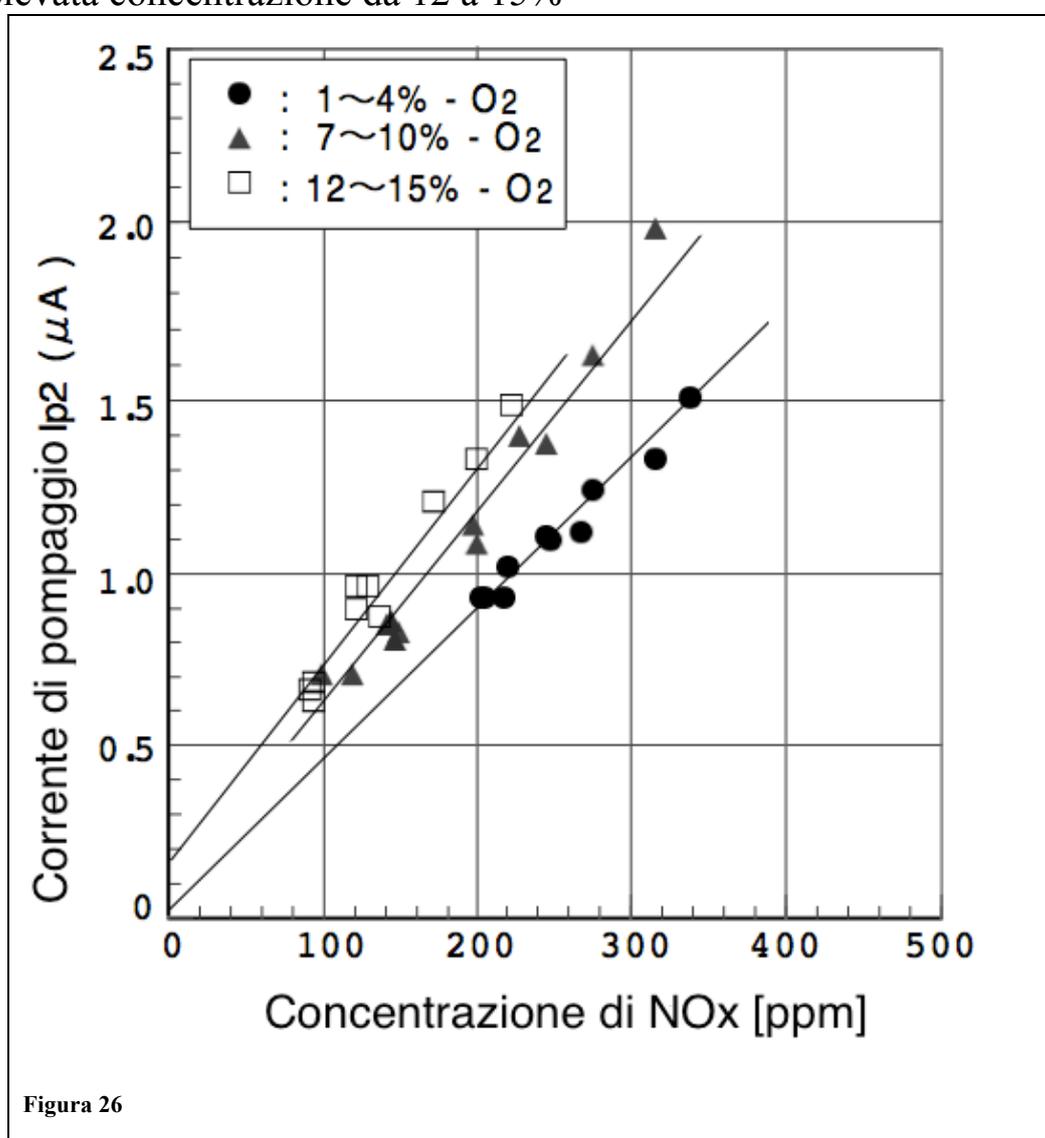
In figura è mostrata la relazione tra la concentrazione di NOx misurata con il CLD e il sensore di NOx su un motore Diesel Giapponese (Toyota), 2.5 di cilindrata e senza alcun catalizzatore. Il livello di NOx è controllato regolando: i giri del motore, la coppia e la quantità di EGR. In questo test, la temperatura dei gas in corrispondenza del sensore variava tra i 180 e 730°C.

Problematiche riscontrate

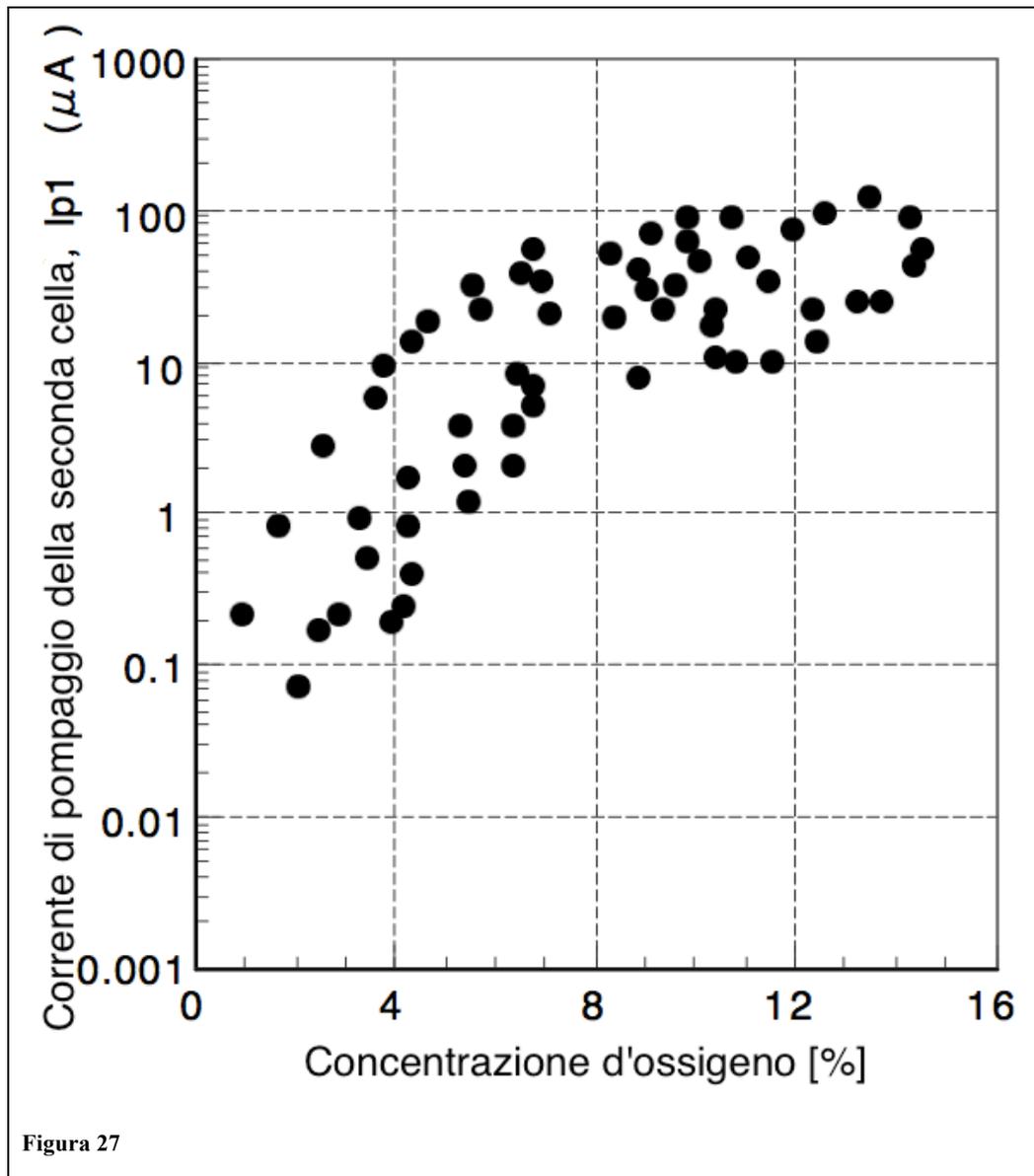
L'errore generato dal sensore sulle misurazioni del motore Diesel è ben più alto rispetto al test precedente, arriva a ± 35 ppm a 100 ppm che equivale a un $\pm 35\%$. Un errore così elevato non è accettabile per la misurazione di basse quantità di NOx poiché il livello approssimativo di NOx post catalizzatore è di $\approx 10 \div 200$ ppm.

Per quanto riguarda i dati raccolti essi possono essere divisi in tre gruppi, basandosi sulla concentrazione d'ossigeno presente nei gas:

- bassa concentrazione da 1 a 4%
- media concentrazione da 7 a 10%
- elevata concentrazione da 12 a 15%



Si nota chiaramente che la sensibilità a elevati livelli di concentrazione è maggiore di quella a bassa. Oltre alla sensibilità va però misurata anche la dipendenza dell'offset, si è visto così che essa è più elevata per i gruppi a maggior concentrazione d'ossigeno.



In figura si vede l'andamento della corrente di pompaggio della seconda cella (I_{p1}), essa aumenta all'aumentare della concentrazione d'ossigeno. L' I_{p1} rappresenta l'ossigeno residuo penetrato fino alla seconda cavità interna poiché la seconda cella di pompaggio non è in grado di decomporre gli NO , CO_2 , H_2O e l'ossigeno ad esclusione dell' O_2 . Se dei residui d'ossigeno sono presenti nella prima cavità, essi si diffondono anche nella seconda e la seconda cella di pompaggio li espelle.

Si presume quindi che a un incremento della concentrazione d'ossigeno corrisponda un relativo aumento dei residui presenti e di conseguenza dell' I_{p1} come mostrato dai risultati registrati. Da quanto emerso, la causa dell'elevata accuratezza nei motori benzina può essere imputata alla bassa concentrazione d'ossigeno (rispetto ai diesel). Nei benzina infatti, la concentrazione è di solo 6,4% rispetto al 14,5% dei diesel.

Analisi della dipendenza dall'ossigeno utilizzando modelli di gas

Per riconfermare la dipendenza dell'ossigeno si sono utilizzati dei modelli di gas.

La corrente di pompaggio della cella di misurazione degli NO_x, Ip₂, è testata variando la concentrazione d'ossigeno e di NO da 0,02 al 20% e da 0 a 1000 ppm rispettivamente, con un apposito apparato.

Il gas a temperatura ambiente, proveniente da delle bombole è mandato in tubo di diametro \varnothing pari a 30 mm a una portata di 5000 cc/min, ottenendo i seguenti risultati.

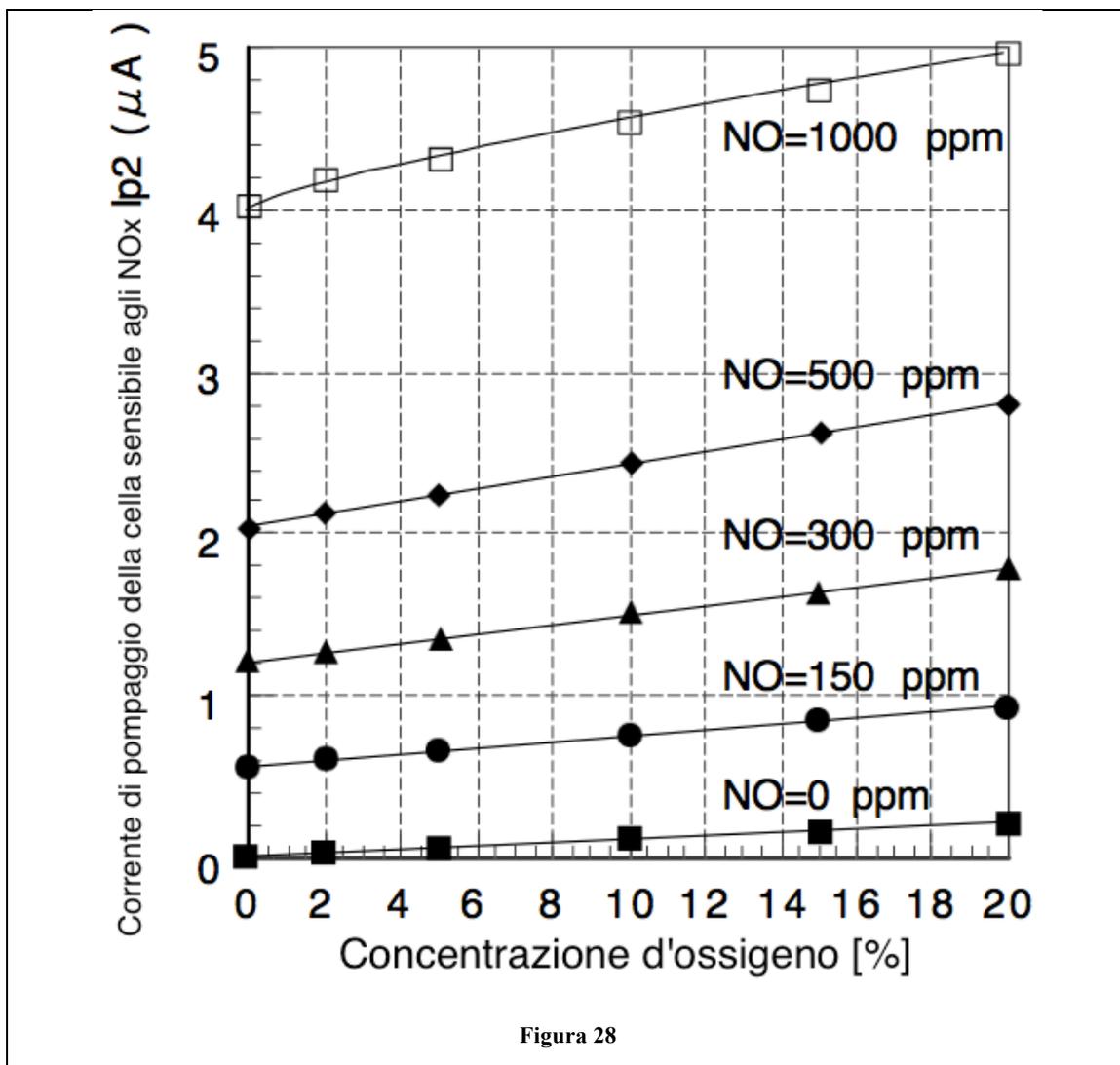
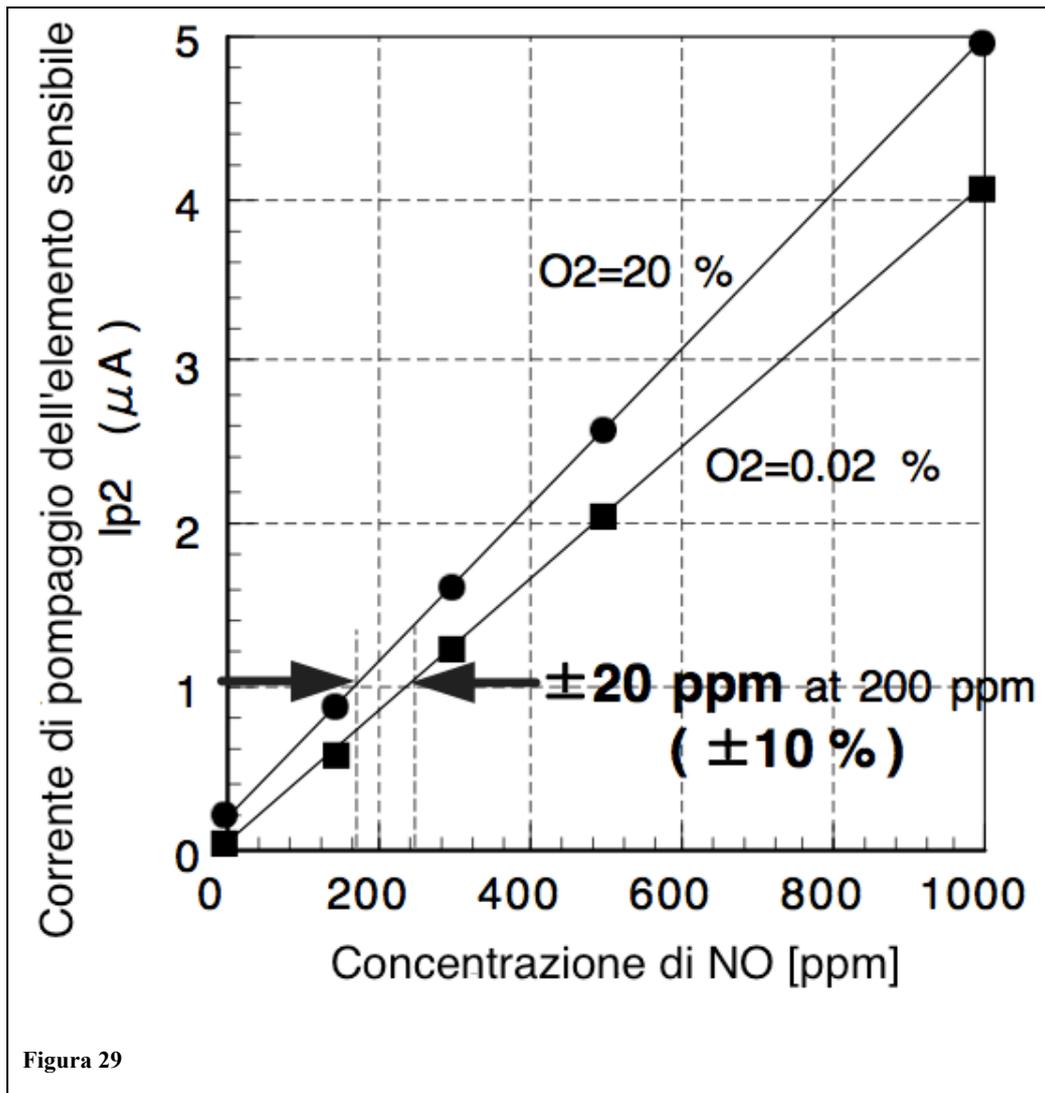


Figura 28

Nel grafico viene mostrata la dipendenza dell'offset della corrente (della cella sensibile alla quantità di NO_x, alla concentrazione di 0ppm), il quale varia approssimativamente di 20 ppm quando l'ossigeno passa dallo 0 al 20%.



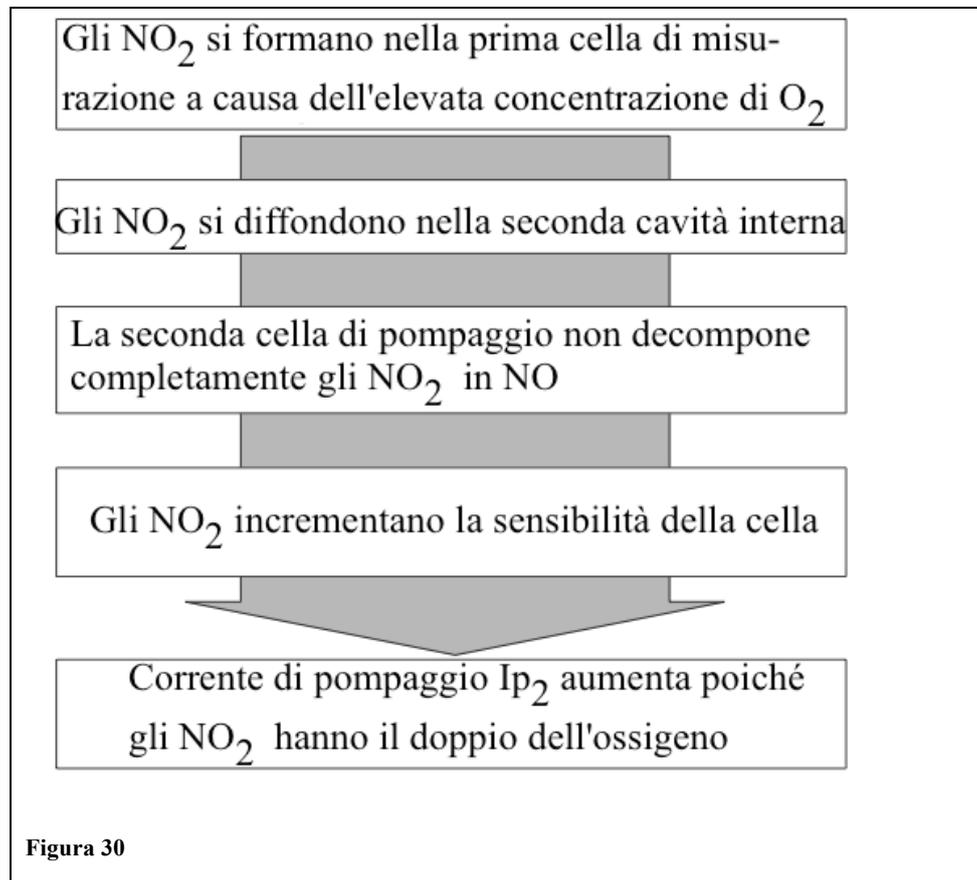
In questo secondo grafico è invece mostrata la sensibilità (I_{p2}/NO) del sensore NO_x all'aumentare dell' O_2 . La sensibilità (I_{p2}/NO) è di approssimativamente $4.8 \mu A/ppm$ al 20% di O_2 e di $4.0 \mu A/ppm$ a 0,002% di O_2 . L'incremento del rapporto ($\Delta I_{p2}/I_{p2}$) è costante quando la concentrazione d'ossigeno è costante, anche se a un ΔI_{p2} corrisponde un incremento di NO .

Meccanismo con cui l'ossigeno influenza i risultati prodotti.

Il primo dei due fenomeni appena presentati (la dipendenza dell'offset dall'ossigeno) può essere spiegato come segue: anche se la prima cella di pompaggio espelle l'ossigeno in eccesso dalla prima cavità interna, dei residui d'ossigeno penetrano comunque nella seconda. Sebbene la maggior parte dell'ossigeno penetrato nella seconda cella venga pompato fuori, si hanno comunque dei residui che vengono misurati dalla cella di misurazione degli NO_x .

All'aumentare della concentrazione di ossigeno, anche i residui di conseguenza aumenteranno, assieme alle due correnti di pompaggio.

La spiegazione del secondo fenomeno analizzato in precedenza (la dipendenza della sensibilità dalla concentrazione d'O₂) non è invece facile da capire quanto il primo poiché la corrente di pompaggio della cella sensibile agli NO_x (I_{p2}) aumenta tanto più quanto maggiore è la coesistenza dell'NO e dell'O₂. Perché la sensibilità aumenta all'aumentare della concentrazione di ossigeno? La “causa/meccanismo” del fenomeno può essere così schematizzata:



Verifica delle ipotesi, “causa/meccanismo”, riguardanti l’influenza dell’ossigeno

Per verificare che effettivamente la causa del secondo fenomeno sia la formazione di NO₂ all’interno della prima cavità, conseguenza dell’elevata concentrazione d’ossigeno, si procede come segue:

1. La corrente di pompaggio della prima cella (I_{p0}) cala per via dell’elevata concentrazione d’ossigeno che va ad aggregarsi agli NO presenti formando NO₂.
2. Controllando la quantità di ossigeno nella prima cavità interna è possibile vedere se le variazioni su I_{p0} sono causate dalla formazione di NO₂.

Al fine di verificare che quanto ipotizzato corrisponda a realtà si è monitorato con cura l’I_{p0}. I risultati, come si vede dai diagrammi, si mantengono coerenti con le ipotesi fatte:

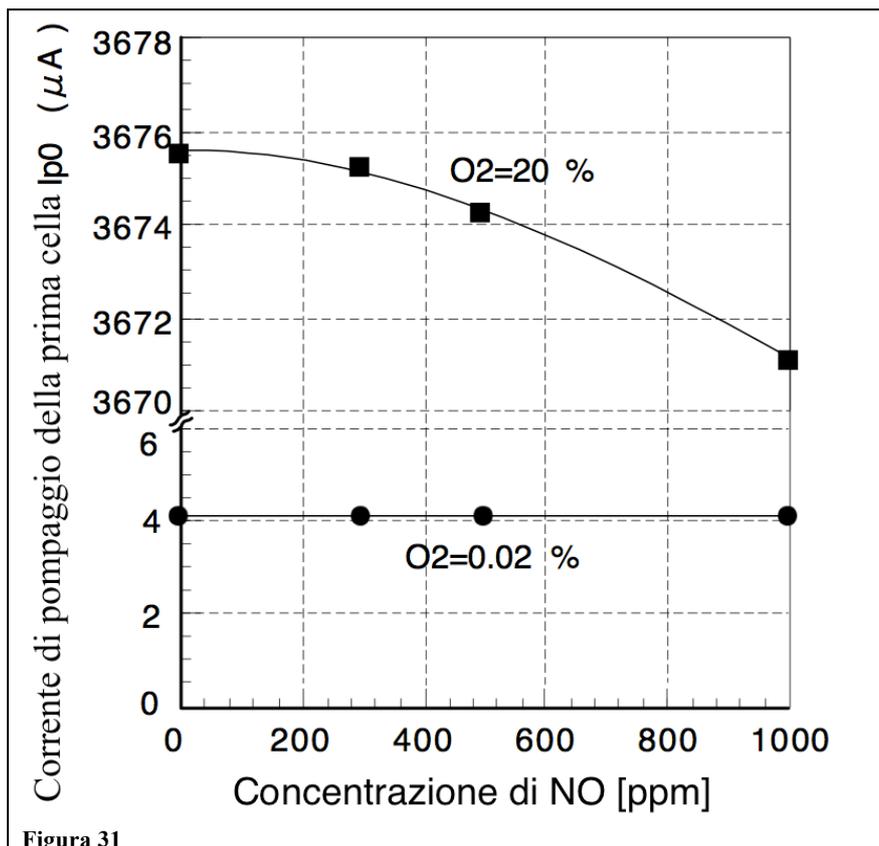


Figura 31

Dalla figura si vede l'andamento decrescente della corrente di pompaggio I_{p0} , all'aumentare della concentrazione di NO e ossigeno. Questo concorda con il comportamento ipotizzato in precedenza e verifica quindi l'ipotesi che si formi dell' NO_2 nella prima cella di pompaggio dell'ossigeno.

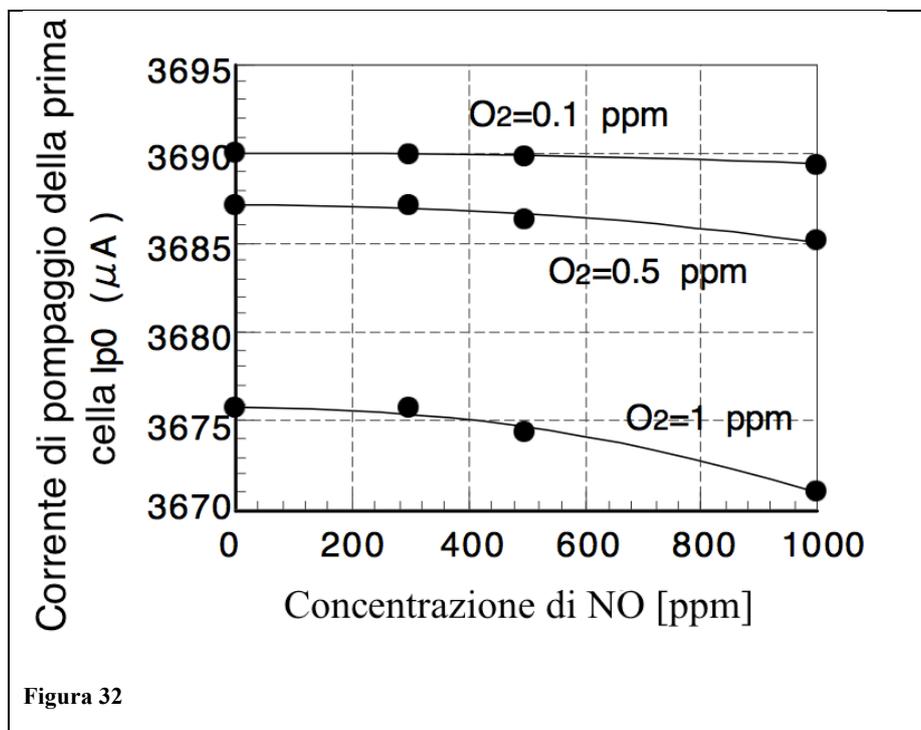


Figura 32

Questa seconda figura è il risultato del monitoraggio del decremento dell' I_{p0} al variare della quantità di ossigeno. Anche questa serie di risultati conferma il comportamento ipotizzato.

Dai test di verifica, dell'ipotesi causa/meccanismo effettuata, si sono tratte le seguenti conclusioni:

- L'ossigeno residuo presente nella prima cavità incrementa quando la concentrazione d'ossigeno allo scarico aumenta.
- L'ossigeno residuo si diffonde nella seconda cavità interna provocando un incremento della corrente destinata alla rilevazione dell'ossigeno liberato dall'ossido d'azoto.
- Nella prima cella si forma dell' NO_2 per via dell'elevata concentrazione d'ossigeno.
- Gli NO_2 creatisi, si diffondono nella seconda cella e liberano il doppio dell'ossigeno alterando i risultati.
- Tuttavia il catalizzatore presente nella cella di misurazione degli NO non è in grado di decomporre completamente gli NO_2 poiché più stabili, quindi non è detto che lo scostamento dei risultati sia sempre positivo

Risoluzione delle problematiche attuando un set di modifiche al sensore denominato "Ip₁ control"

Al fine di minimizzare gli effetti prodotti dall'ossigeno residuo, si può incrementare la precisione del controllo nella prima cavità interna. In aggiunta a questo si può cercare di minimizzare la composizione di NO_2 nella prima cavità, e incrementare la decomposizione nella seconda, pompando l' O_2 prima che alteri la misurazione. Per raggiungere tali miglioramenti la forza elettromotrice, V_0 , della prima cella di rilevazione d'ossigeno, è regolata in modo tale che la corrente di pompaggio della seconda cella I_{p1} si mantenga a un livello costante. Inoltre, il valore di V_1 (fem della seconda cella sensibile alla concentrazione di ossigeno, posta nella seconda cavità interna) è incrementato di 50 mV passando da 400 a 450 mV, così da aumentare anche la capacità di decomposizione dell' NO_2 della seconda cella di pompaggio. Di seguito si riporta il diagramma del circuito di controllo in grado d'eseguire le modifiche sopra citate. precisando che non sono state apportate variazioni alla cella di misurazione degli NO.

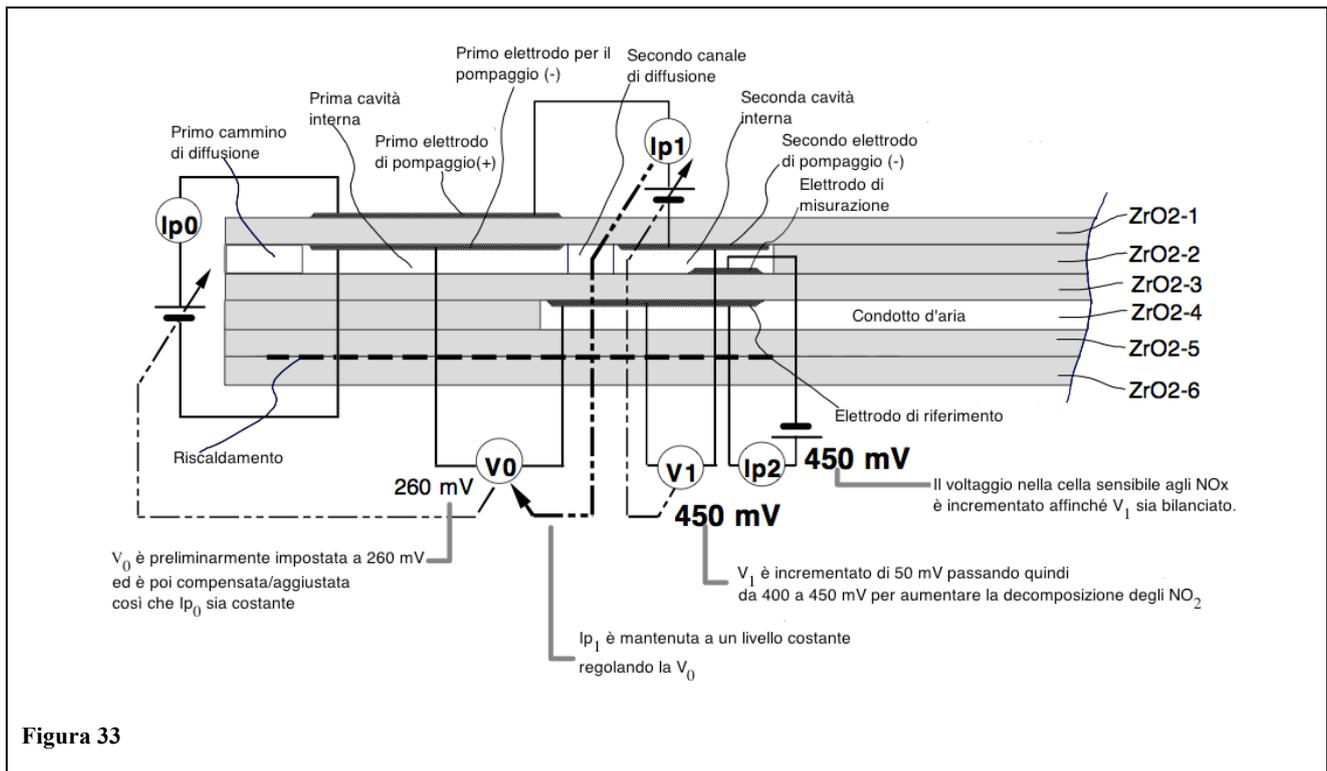
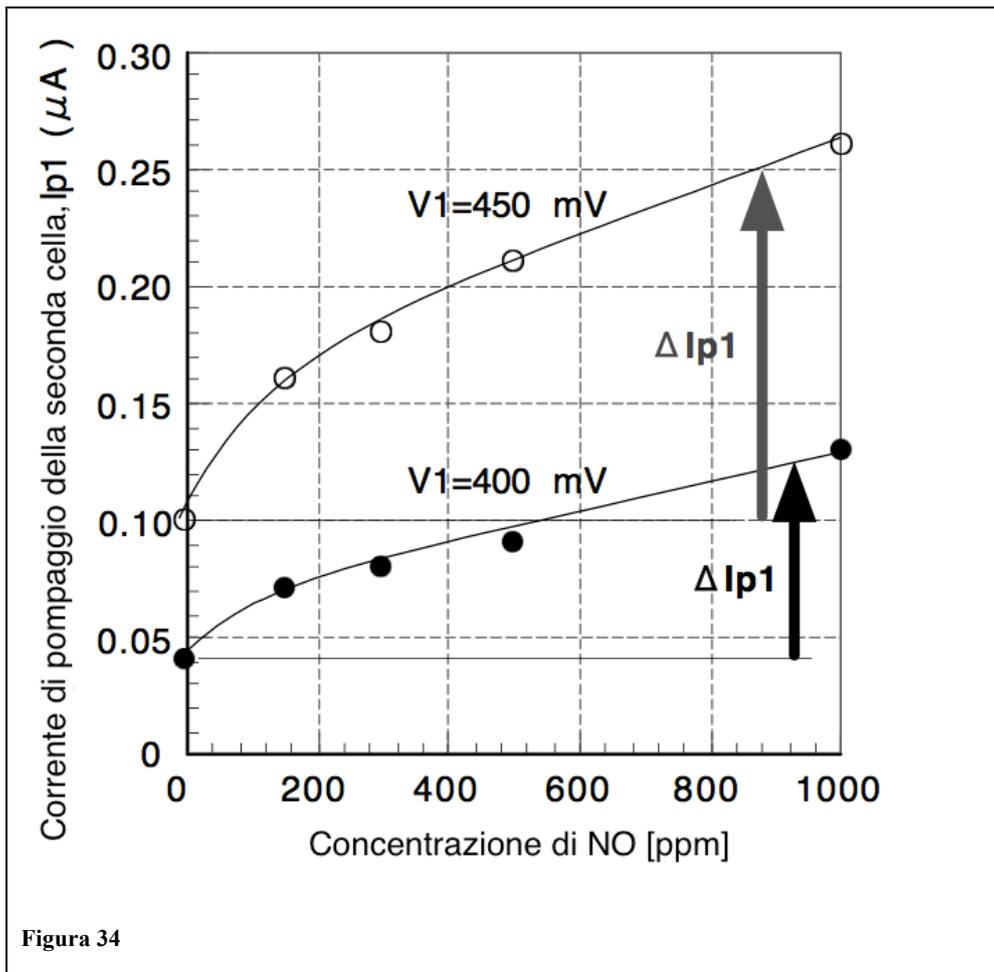


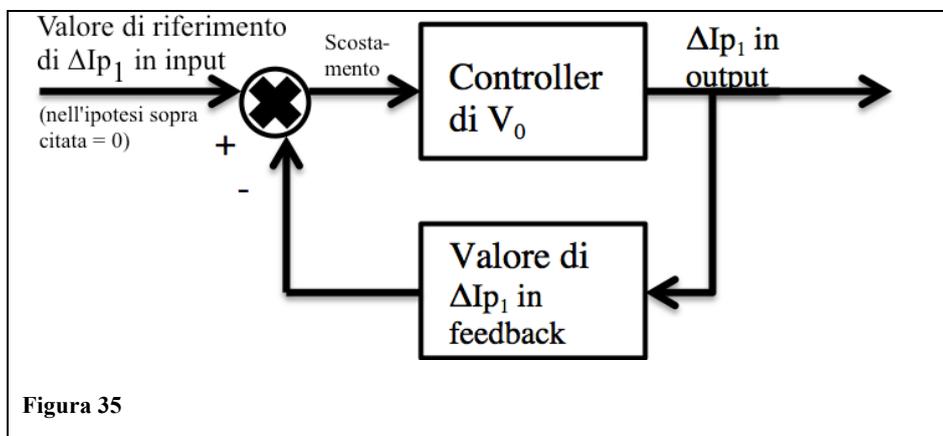
Figura 33

Questo nuovo metodo di controllo, chiamato “Ip₁ controll”, mantiene costante l’Ip₁ regolando V₀. Se l’Ip₁ aumenta a causa dell’ossigeno presente nella cavità, V₀ è incrementato per ridurre i residui d’ossigeno. Con questo genere di controllo è possibile ottenere un offset di corrente trascurabile e stabile. Inoltre “Ip₁ controll” è in grado di ridurre la formazione di NO₂ a elevate concentrazioni d’ossigeno e di aumentarne la decomposizione di tale molecola, nella seconda cella di pompaggio. Se dell’NO₂ si diffonde nella seconda cavità interna, la maggior parte di esso è decomposto nella seconda cella di pompaggio in NO e $\frac{1}{2}O$, la restante parte è invece decomposta dal catalizzatore della cella sensibile agli NO_x. Quando l’NO₂ penetra all’interno della seconda cavità interna, il valore dell’Ip₁ aumenta. Questo significa che quando aumenta il grado di concentrazione di NO₂ penetrati nella seconda cavità, anche Ip₁ aumenta.

L’incremento di Ip₁ e ΔIp₁ provoca l’aumento anche di V₀ (a basse concentrazioni d’ossigeno) e riduce la composizione di NO₂ nella prima cavità interna, questo si traduce una minor dipendenza della sensibilità di misurazione dovuta alla presenza di NO₂.



In figura è possibile vedere la dipendenza dell' I_{p1} sulla concentrazione di NO per elevate quantità d'ossigeno, $\approx 20\%$. Gli elevati valori di NO a elevate I_{p1} si possono ricondurre alla decomposizione degli NO_2 . Si nota inoltre, che per elevati valori di V_1 si ha un incremento dell' I_{p1} (ΔI_{p1}), poiché in tali condizioni è facilitata la decomposizione degli NO_2 . È anche possibile utilizzare il valore di ΔI_{p1} per un controllo in anello chiuso che intervenendo su V_0 , la mantenga costantemente pari a zero (se $V_0 \uparrow$, composizione di $NO_2 \downarrow$).



Come risultato, la dipendenza sulla sensibilità di misurazione è sensibilmente ridotta.

Effetti dell'“Ip₁ Control”

Dipendenza dell'Ip₂ dalla quantità d'ossigeno, utilizzando l'Ip₁ Control.

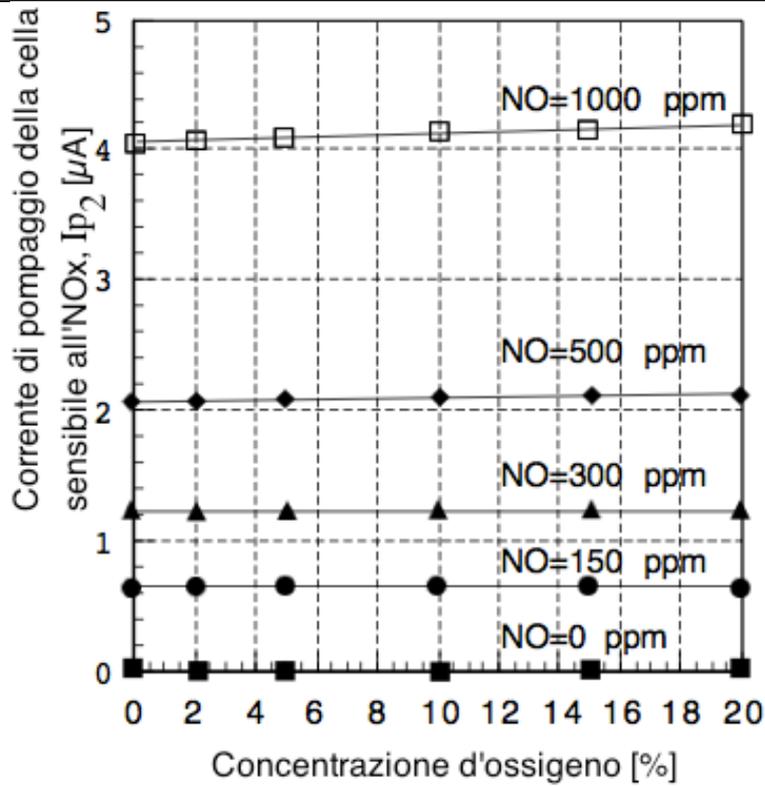


Figura 36

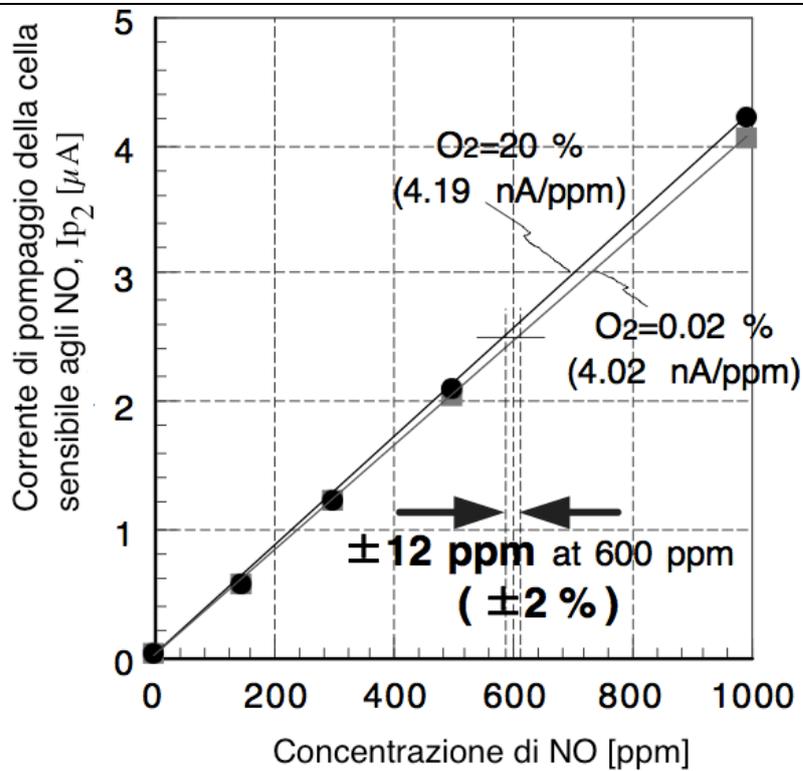


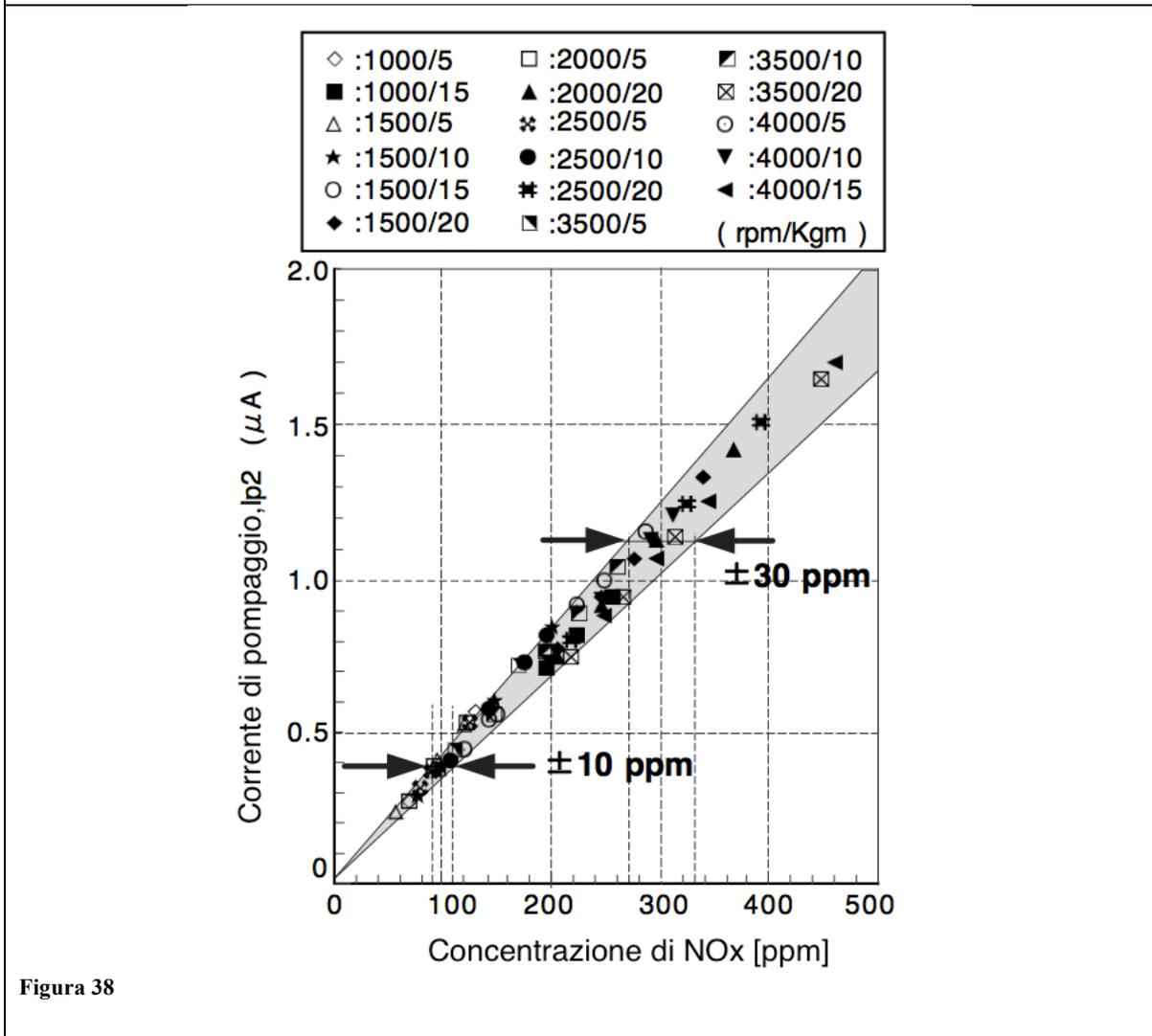
Figura 37

Ripetendo i test già fatti ma con l'impiego dell'Ip₁ Control, per eseguirne il

confronto, si vedono chiaramente i benefici apportati, sulla dipendenza dell'offset e della sensibilità:

- La dipendenza dell'offset è di soli 2 ppm quando la concentrazione d'ossigeno varia dallo 0,02% al 20%.
- La dipendenza della sensibilità di misurazione, è ridotta da un $\pm 10\%$ a $\pm 2\%$ quando la quantità d'ossigeno parte da uno 0,02% e arriva fino al 20%.

Output del sensore NO_x utilizzando l'Ip₁control su un motore Diesel.



I test, come in precedenza quando non si utilizzava l'Ip₁control, sono stati effettuati anche su un motore Diesel, il risultato ottenuto è un netto miglioramento dell'errore di misurazione che è ridotto a soli ± 10 ppm contro i precedenti ± 35 ppm a 100 ppm di NO_x.

Questi ± 10 ppm a 100 ppm di NO_x rendono accettabile la misurazione anche per rilevare la concentrazione di NO_x post catalizzatore, su motori in cui avvengono combustioni magre, sebbene è preferibile un ± 5 ppm (a 100 ppm).

Output del sensore on-board sul motore Toyota, equipaggiato col catalizzatore ad assorbimento di NOx

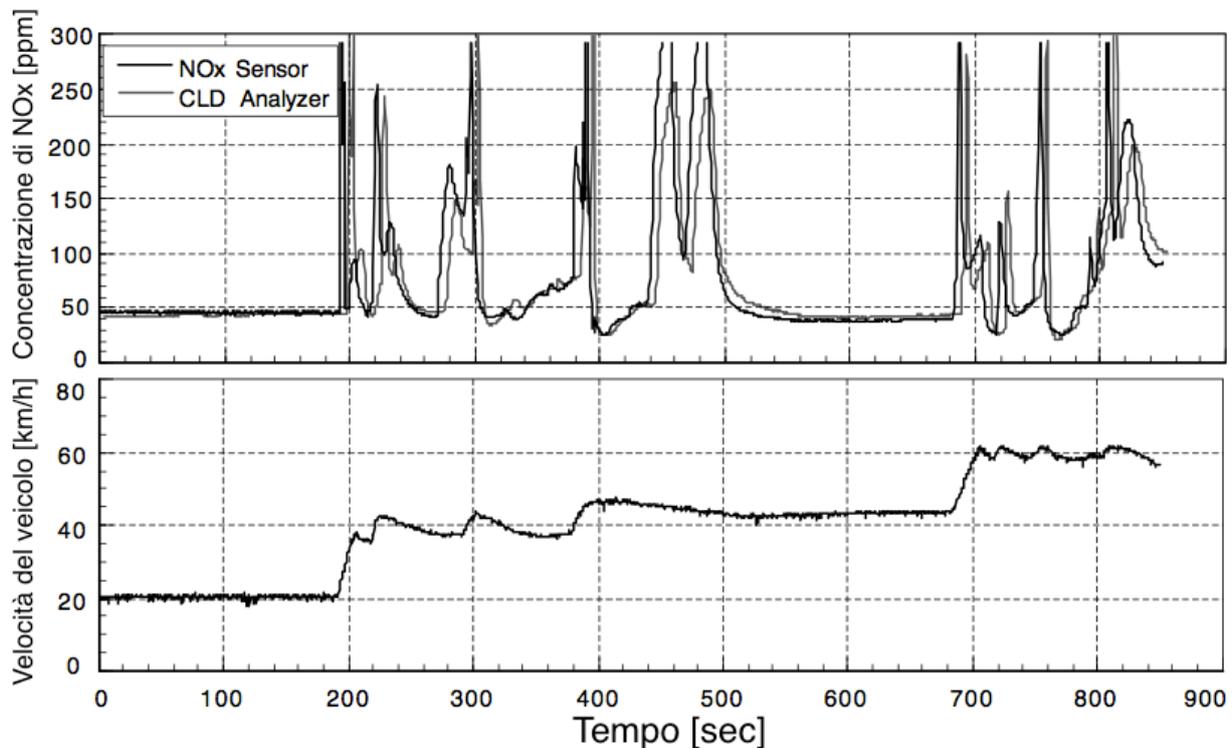


Figura 39

In figura si vedono i risultati dei test on-board dell'Ip1 control sul TOYOTA D-4 (Diesel, quattro cilindri), il quale è equipaggiato con un catalizzatore ad assorbimento di NOx. La vettura è fatta funzionare in condizione di regime a 20, 40 e 60 km/h. Il sensore NOx è installato dopo il catalizzatore e monitora le quantità di Nox emesse dalla vettura.

Ne risulta che il sensore di NOx, con applicato l'Ip1 control, è in grado di rilevare anche concentrazioni inferiori ai 100ppm, e può essere utilizzato per controllare l'assorbimento di NOx in sistemi di diagnosi on-board.

Altri benefici del "Ip1 control"

Un'altra funzione chiave del sensore NOx è il controllo della concentrazione d'ossigeno presente nella prima e seconda cavità interne. Se il valore di Ip1 va al di fuori del range di controllo il sensore e in particolare la prima cella di pompaggio, possono danneggiarsi o deteriorarsi, per via dell'eccessivo raffreddamento del sensore causato anche dalla condensa, (che si forma all'accensione) in grado di creare crepe da stress termico. Poiché un controllo errato dell'Ip1 finisce col danneggiare il sensore, l'Ip1 controll può essere usato come OBD dello stesso sensore. Inoltre il monitoraggio dell'Ip1 può fornire informazioni riguardanti la prontezza del sensore, poiché il sensore si ritiene pronto a misurare gli NOx quando il valore dell'Ip1 assume il valore prestabilito.

Conclusioni

1. La dipendenza del sensore NO_x può essere ridotta applicando un set di modifiche chiamato Ip₁ control.
2. Il sensore NO_x può così monitorare anche le basse concentrazioni di NO_x, con un errore di misurazione di soli ± 10 ppm a 100 ppm su di un motore Diesel nel funzionamento magro, ed equipaggiato con un catalizzatore ad assorbimento di NO_x.
3. Il sensore così modificato permette un utilizzo anche per OBD.
4. L'Ip₁ control studiato dai ricercatori dell'NGK può essere vantaggioso anche per un OBD del sensore stesso in grado di valutare la prontezza del sensore.

2.2.3 Sonde lambda a ingombro ridotto

[BIBLIOGRAFIA](#) indice 7

Sonda lambda OZAS-S3 per motocicli: è attualmente la più piccola sonda lambda del mondo



Figura 40

Valori limite attuali per motocicli				
	Validi a partire dal...	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx
Euro I	06/1999	13,00	3,00	0,30
Euro II	04/2003	5,50	1,00	0,30
Euro III	01/2007	2,00	0,30	0,15



Figura 41

Anche i costruttori di moto han dovuto fare i conti con norme sempre più rigorose in materia di gas di scarico, di conseguenza una quota crescente di questi veicoli sono dotati di un catalizzatore e di una sonda lambda per il mantenimento di un'elevata efficienza del catalizzatore:

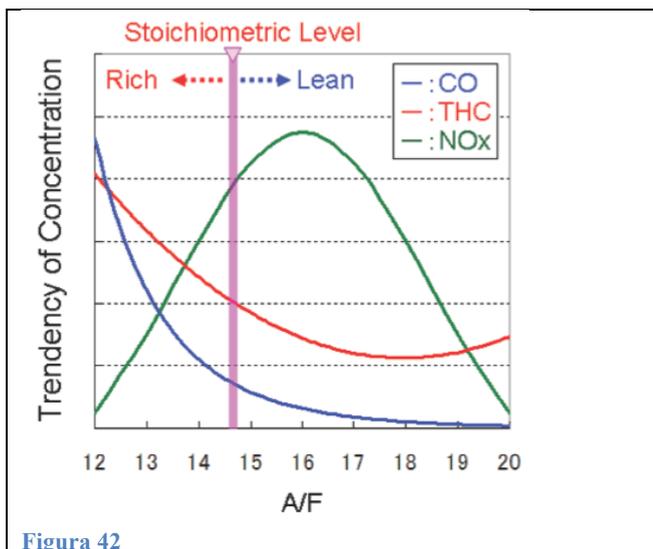


Figura 42

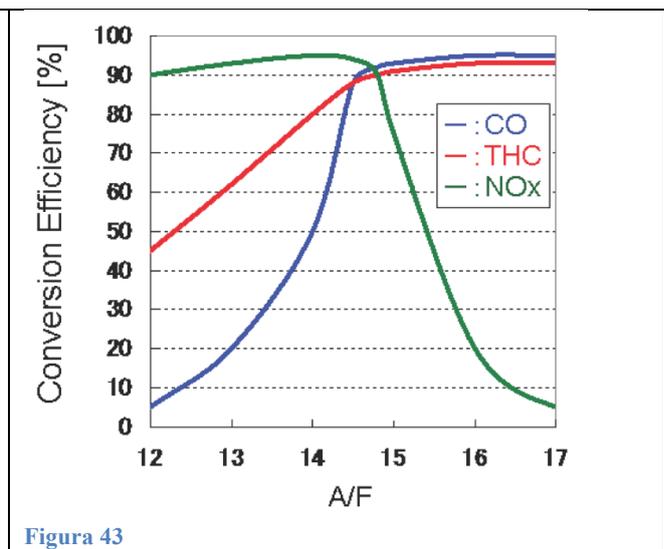


Figura 43

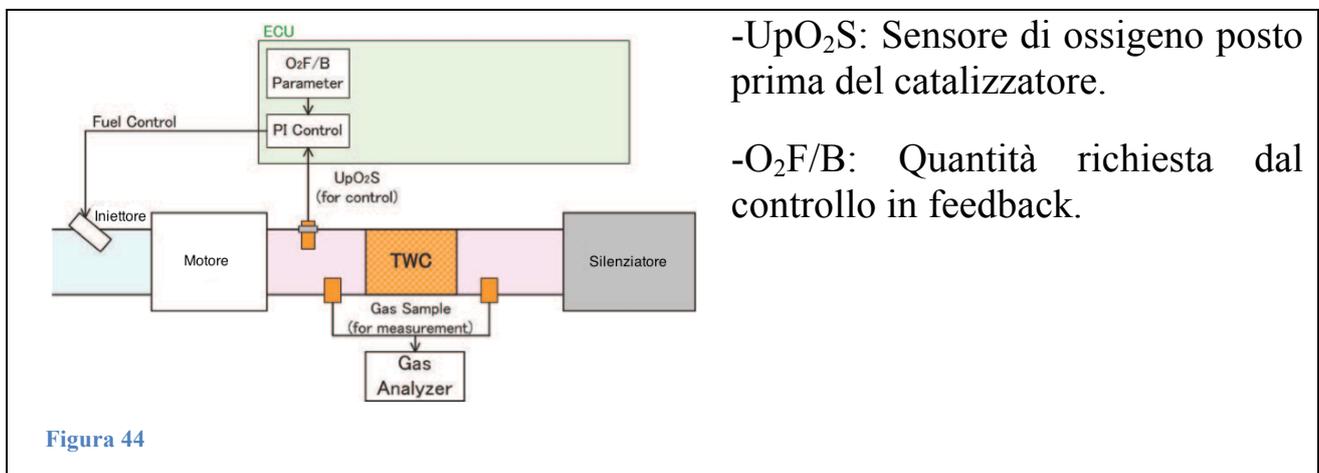
Analisi delle misurazioni di una sonda λ a ingombro ridotto per il controllo dell'AFR su moto.

Per queste applicazioni sono necessarie sonde lambda specifiche caratterizzate da: ingombri ridotti, robustezza, compattezza e in grado di raggiungere molto rapidamente la temperatura d'esercizio.

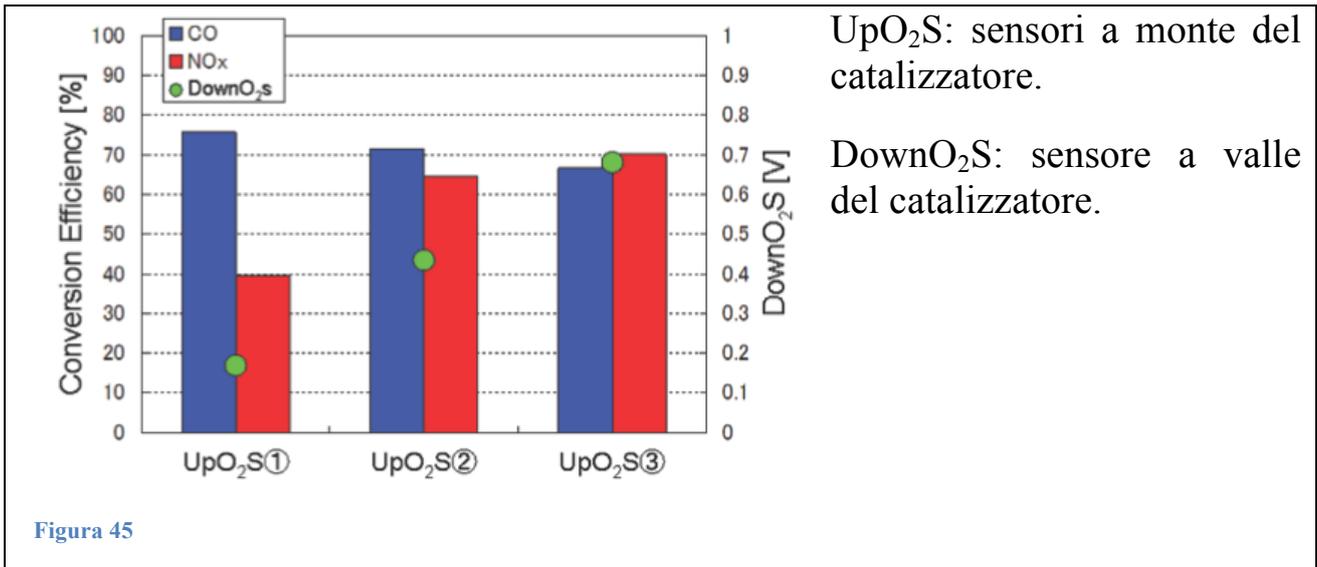
L'elemento sensibile di queste sonde ha dimensioni ridotte, permettendo così di raggiungere la temperatura d'esercizio necessaria anche senza l'ausilio di un riscaldatore e di essere installate in condotti con diametri assai ridotti, in prossimità delle valvole di scarico.

Problematiche

Un sistema di controllo dotato di una singola sonda posta prima del catalizzatore (come da figura) non è sufficiente a garantire una misurazione corretta, a causa degli incombusti presenti allo scarico.



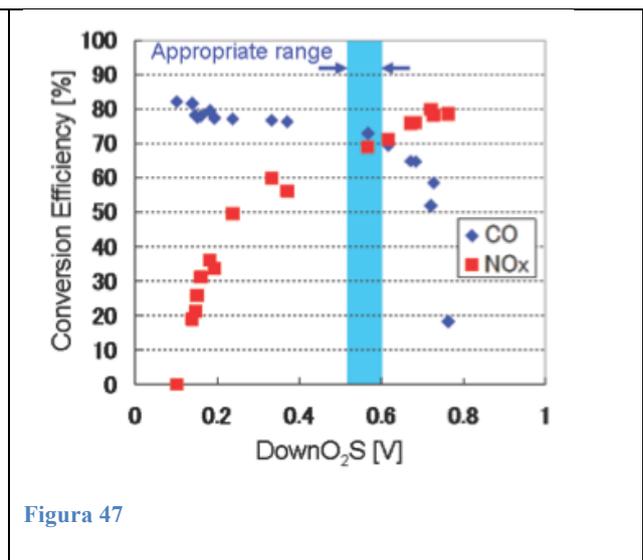
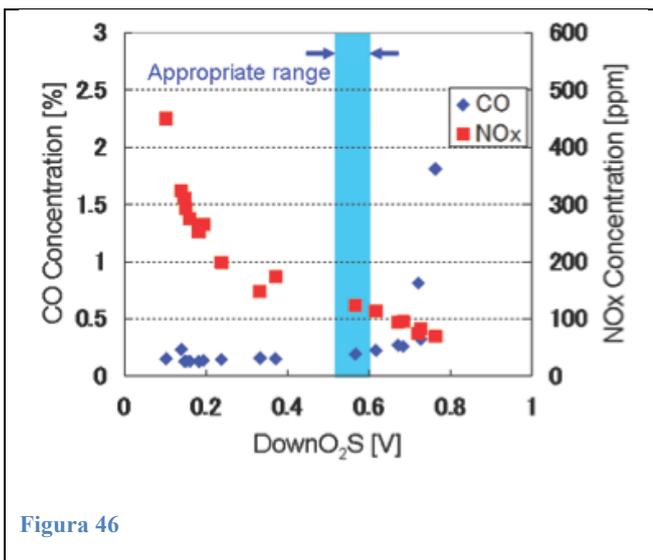
Una misura dell'errore, generato dalle particelle d'incombusti, si può vedere nel grafico sottostante frutto dell'acquisizione degli output di tre sensori d'O₂ (poste prima del catalizzatore), nel funzionamento a velocità costante (115 km/h), su di un motore 1000cc a quattro cilindri in linea, di origine Kawasaki. Si sono poi acquisiti gli output di una sonda posta a valle, per misurare l'efficienza del catalizzatore nei tre diversi casi.



Come visibile nel grafico i tassi di conversione del catalizzatore (controllando la composizione della miscela con i tre sensori) misurati col sensore posto a valle del catalizzatore sono sensibilmente diversi, solo per uno dei tre si raggiunge un risultato accettabile (l'UpO₂S3). È necessario quindi risolvere questa problematica per un controllo più accurato.

Soluzioni

Una possibile soluzione del problema appena visto è l'implementazione, nel sistema di controllo, dell'output generato da una seconda sonda posta a valle del catalizzatore. Dalla correlazione fra l'output del sensore di O₂ (posto a valle del catalizzatore) e l'efficienza di quest'ultimo, si riesce a determinare un valore del voltaggio in uscita da tale sensore per cui le emissioni sono minime:



Occorre dunque modificare lo schema di controllo visto in precedenza in cui si utilizzava una sola sonda. Nel nuovo schema dovrà esser presente un comparatore che confronti l'output del secondo sensore (a valle), con il valore di riferimento in ingresso al sistema e che attraverso un controller generi l'input

per il controller già visto.

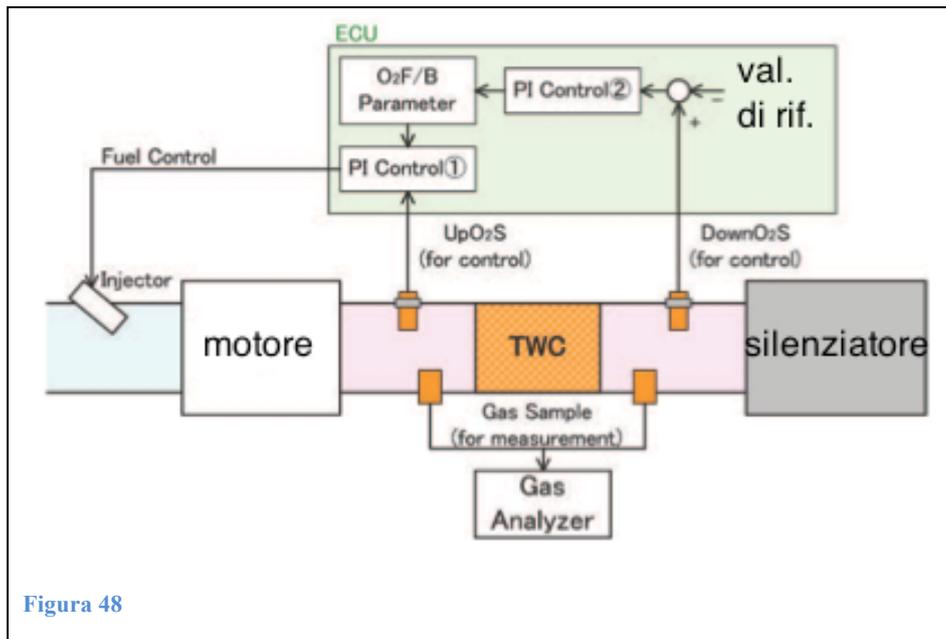


Figura 48

Il controller di tipo PI, riceve in ingresso l'errore del sistema (differenza fra valore di riferimento e valore reale misurato) e esegue la somma dei due contributi: uno proporzionale e uno integrale ad esso.

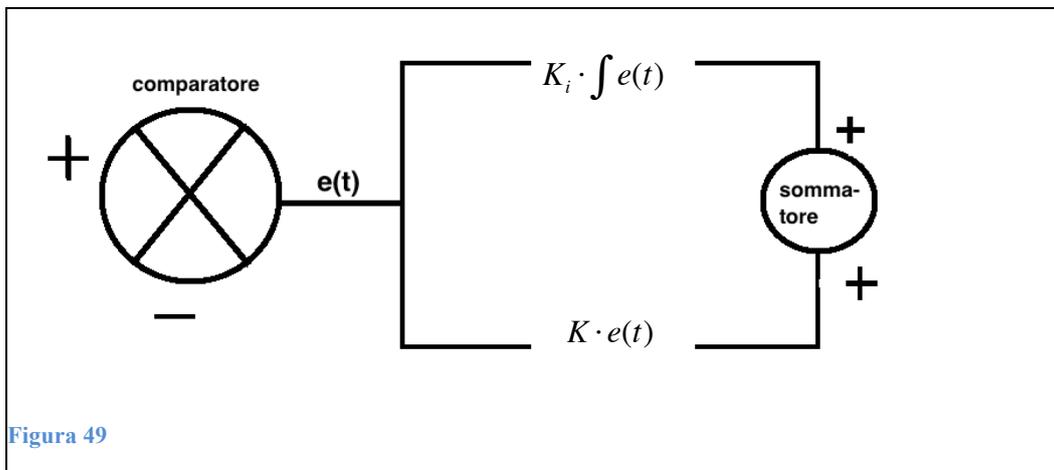


Figura 49

Per raggiungere lo scopo di controllare l'OSC e quindi l'assorbimento e deassorbimento di O₂ è necessario impiegare un controllo sul parametro A/F, a valle e monte del catalizzatore e misurare il ritardo e lo scostamento nella misurazione delle sonde come da diagramma sottostante:

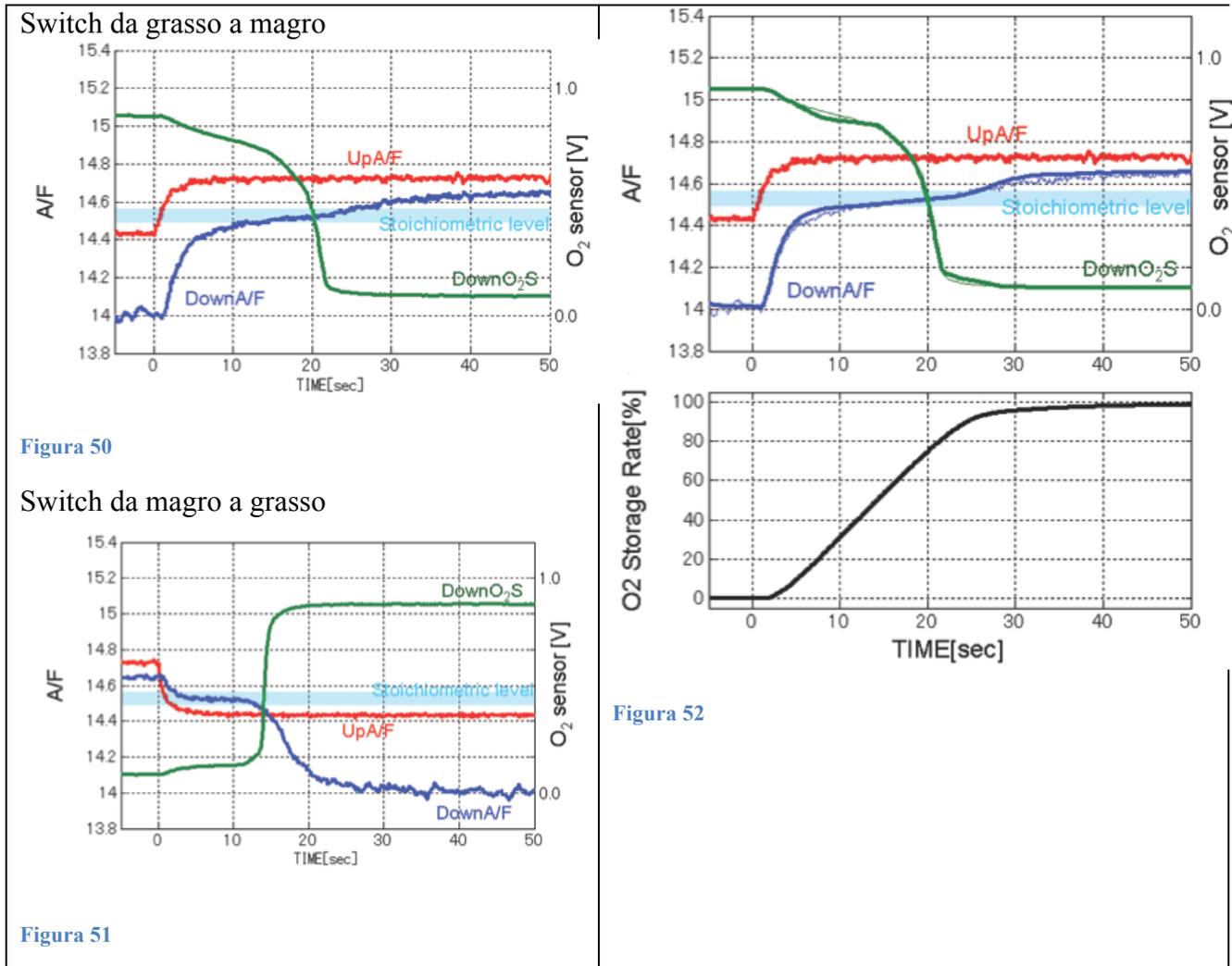


Figura 50

Switch da magro a grasso

Figura 51

Figura 52

Dal grafico emerge la scarsa reattività della sonda per miscele grasse, questo comportamento si ritiene sia imputabile all'OSC del catalizzatore.

Una volta raccolti tutti questi dati, è possibile creare un modello del catalizzatore al fine di utilizzare il sistema a due sonde finora descritto. Montando il tutto sul motore e dando 0,5 Volt come valore di riferimento, si è ripetuto l'esperimento iniziale utilizzando le tre sonde a monte nel funzionamento a velocità costante (115 km/h).

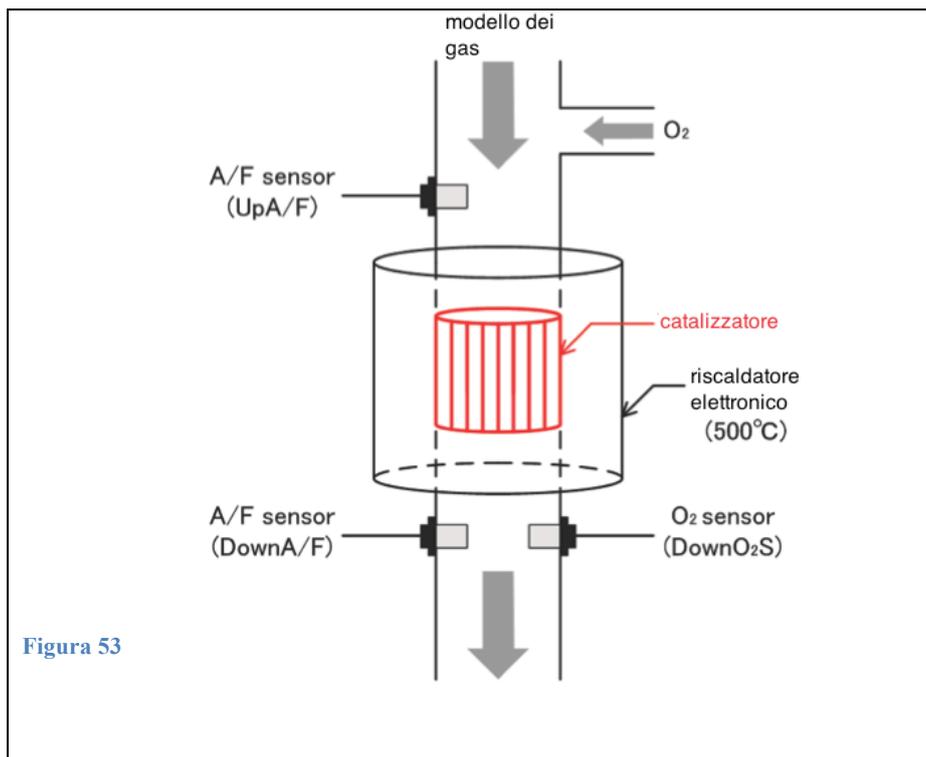


Figura 53

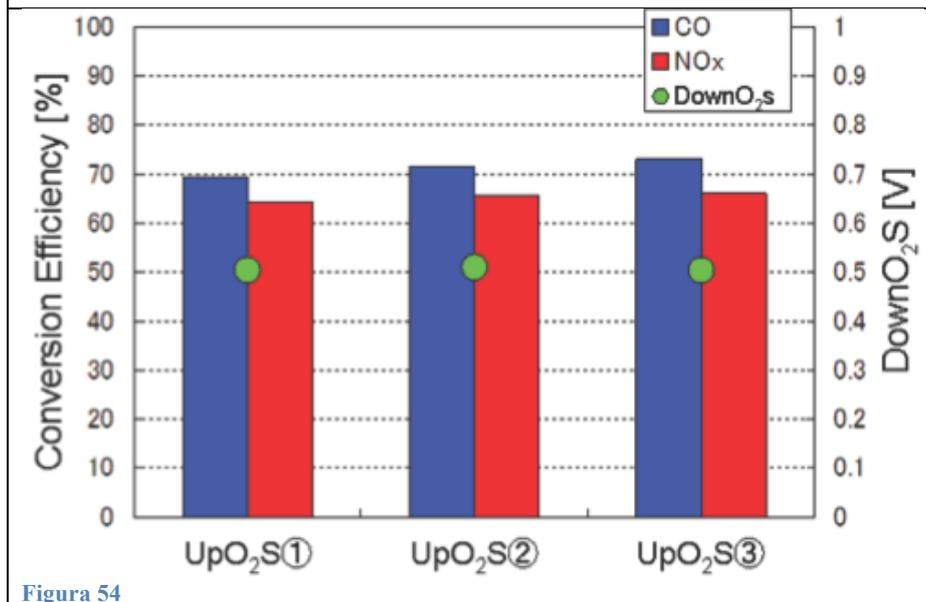


Figura 54

Come ci si aspettava, sono emersi notevoli miglioramenti in termini di efficienza del catalizzatore, riconducibili al controllo più accurato grazie al sensore a valle.

2.2.4 Sonde “Racing”

Spesso nelle corse la vittoria o la sconfitta dipende dalle prestazioni del motore. La sonda lambda permette di garantire un consumo corretto di carburante, oltre al raggiungimento delle massime prestazioni. Le sonde “racing” si differenziano da quelle viste finora per via degli ambienti in cui si trovano a funzionare, con vibrazioni e pressioni particolarmente elevate, che potrebbero danneggiare la sonda stessa o falsare il risultato della misura.

2.3 POSIZIONAMENTO DELLE SONDE λ :

I veicoli più moderni si hanno a disposizione almeno due sonde lambda: una a monte del catalizzatore e un'altra (a seguito dell'introduzione della diagnosi on board - OBD) a valle del catalizzatore utilizzata per un controllo in feedback del funzionamento del catalizzatore.

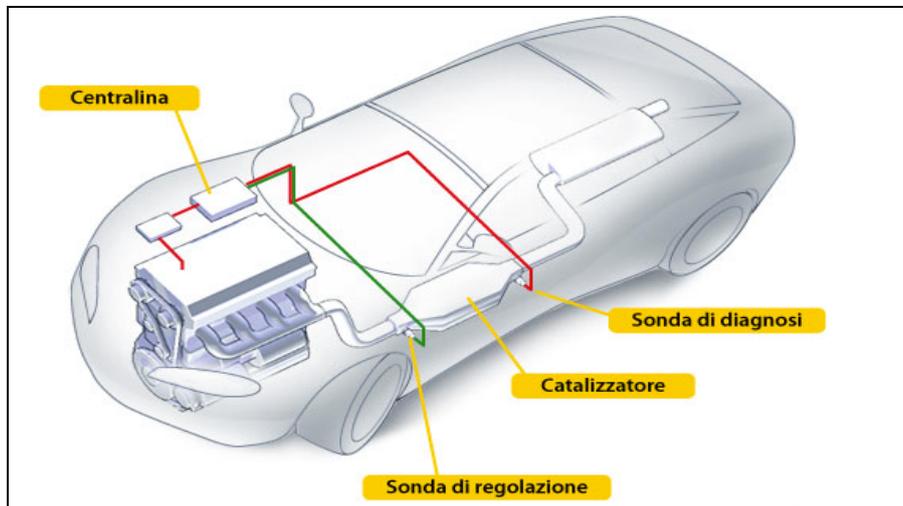


Figura 55

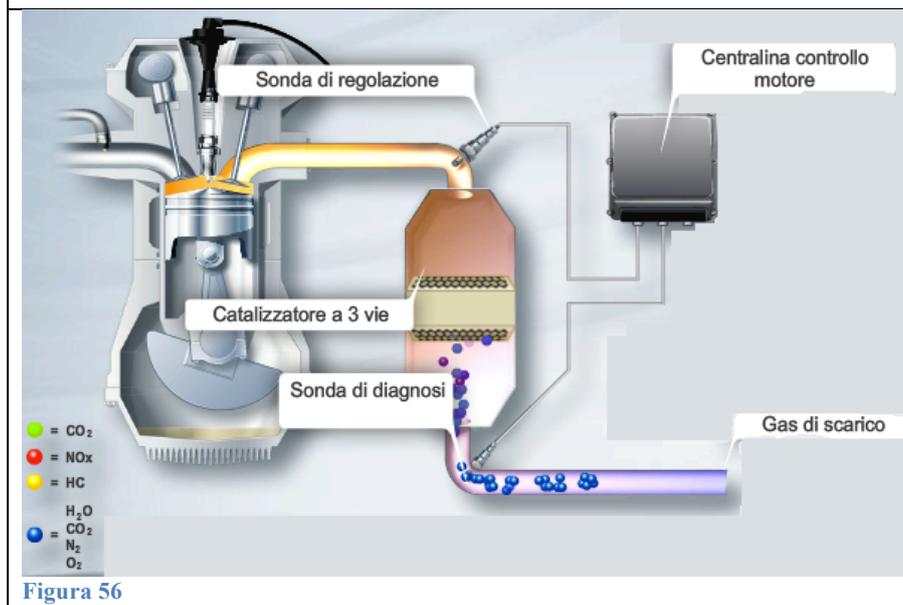


Figura 56

La sonda di regolazione misura l'ossigeno residuo nei gas di scarico prima che entrino nel catalizzatore e in funzione della concentrazione dell'ossigeno residuo, genera un segnale che la centralina utilizza per variare il rapporto aria-combustibile della miscela.

La sonda di diagnosi, invece, misura l'ossigeno residuo nel gas di scarico dopo il trattamento avvenuto nel catalizzatore. Sulla base del suo segnale la centralina può identificare e segnalare al conducente i difetti di funzionamento rilevanti per il gas di scarico, attraverso l'accensione di una spia sul quadro.

3 PROBLEMATICHE DEI SENSORI UEGO

Sebbene lo sviluppo tecnologico abbia migliorato notevolmente le caratteristiche dei sensori odierni, durante le seguenti condizioni di funzionamento si ha un calo dell'affidabilità della misurazione:

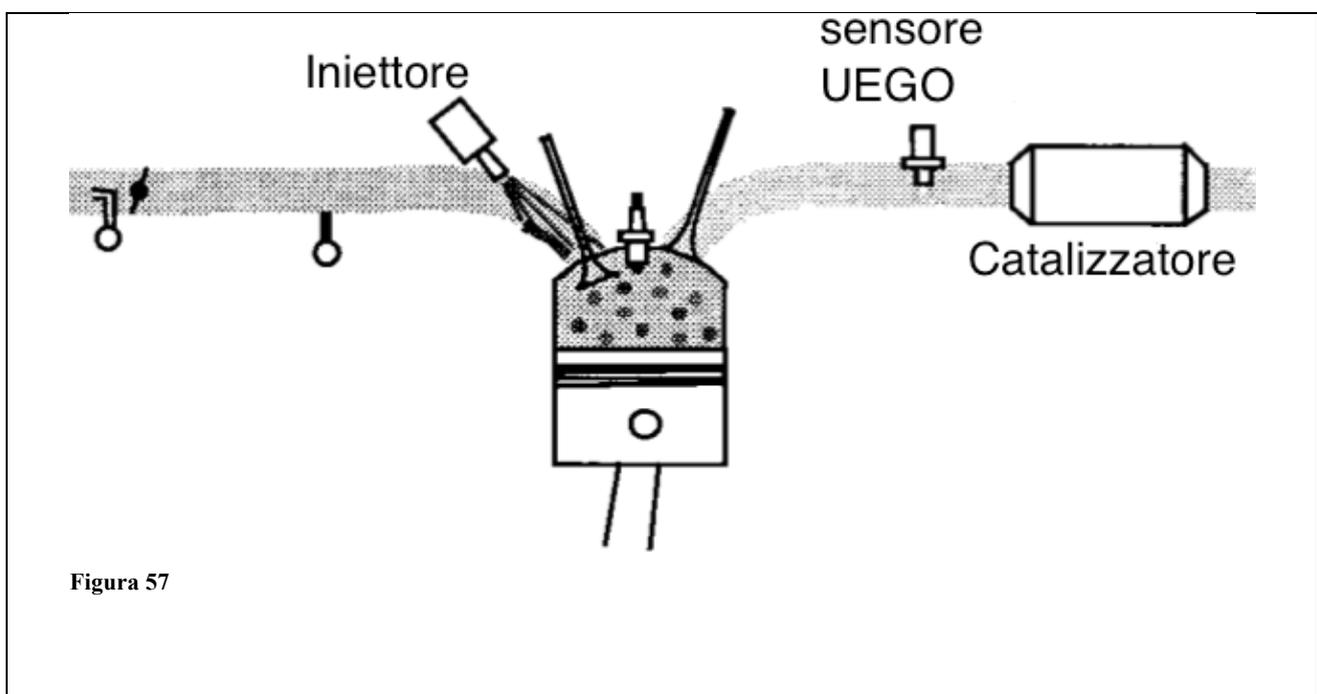
- Transitori d'AFR dovuti alla variazione della quantità di combustibile iniettato, in particolare quelli stechiometrici che passano da un valore di λ maggiore di uno a uno minore di uno o viceversa.
- Transitorio d'accensione del motore "a freddo".
- Composizione dei gas di scarico ad elevata concentrazione di H_2 o HC pesanti (a seguito di misfire ad es...)
- Avvelenamento del sensore

3.1 ANALISI DEI TRANSITORI STECHIOMETRICI DEL RAPPORTO A/F

BIBLIOGRAFIA indice 7

Variando il valore di λ da magro a grasso o in particolare da grasso a magro si misurano dei picchi inaspettati che possono avere delle conseguenze sulle emissioni.

Al fine di quantificare l'influenza di questi picchi sul controllo delle emissioni si sono eseguiti dei test con un controllo ad anello aperto con l'impiego di un solo sensore posto prima del catalizzatore.



Il motore impiegato per i test è un SI 1800 di cilindrata, quattro cilindri, nel funzionamento a regime con velocità costante pari a 2000rpm e pressione all'aspirazione di 45 kPa. I dati così acquisiti sono poi stati campionati ogni 10 gradi di manovella e plottati nel dominio del tempo per maggiore chiarezza.

Caratterizzazione dei picchi

Per caratterizzare l'entità dei picchi, la durata dell'iniezione è fatta variare tra i 3800 e i 2800 μs ogni 350 μs per secondo, in questo modo si ottiene una transizione dell'AFR attraverso il valore stechiometrico. La posizione della valvola a farfalla e la velocità del motore sono mantenute costanti, ottenendo così una caratteristica triangolare dell'AFR come in figura:

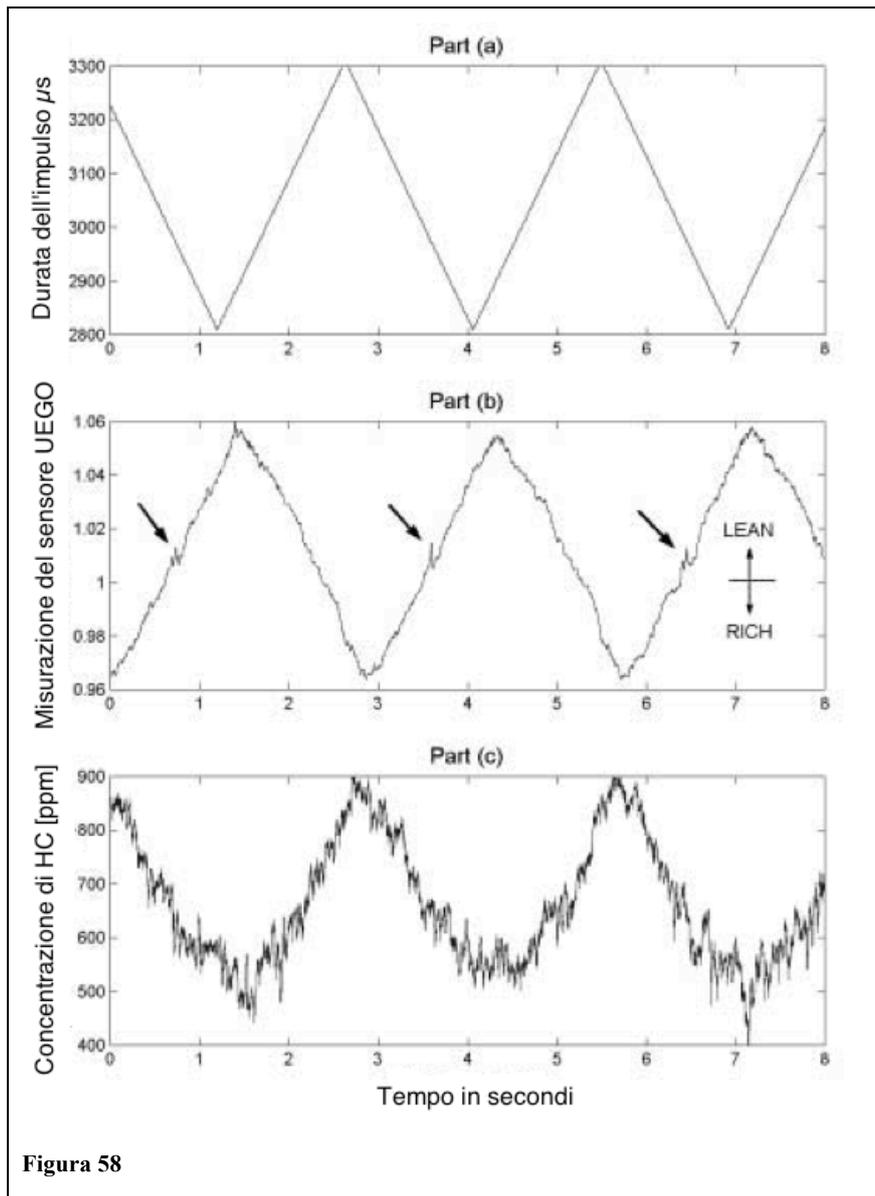
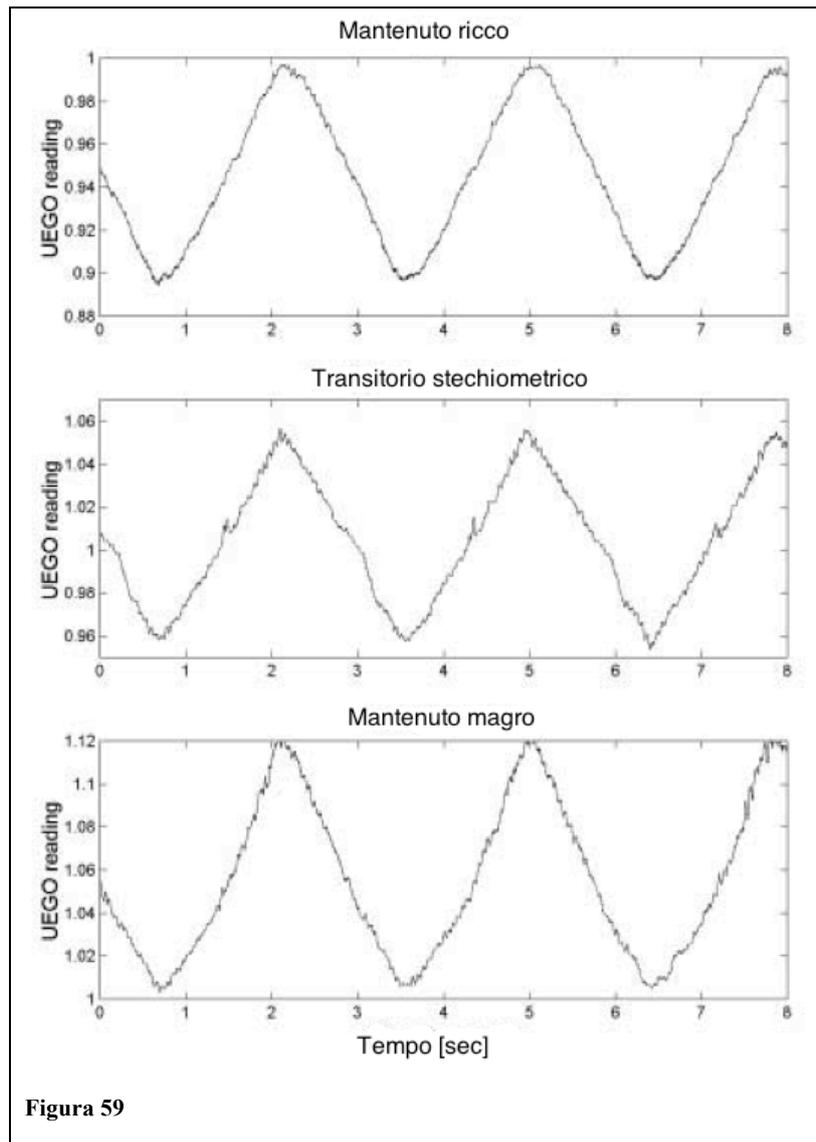


Figura 58

I picchi indicati con le frecce qui sopra non possono essere attribuiti alla dinamica grezza dell'alimentazione poiché la pressione all'aspirazione è mantenuta costante. Per essere certi che tali distorsioni siano dovute al sensore e non alla dinamica dell'alimentazione, si sono compiuti dei test in cui si è variato il valore dell'AFR:

- Mantenendolo grasso
- Attraversando il valore stechiometrico
- Mantenendolo magro



Dai test si nota subito che i picchi sono presenti solo nel transitorio stechiometrico escludendo così una correlazione con la dinamica dell'alimentazione, resta quindi da supporre che tale distorsione sia prodotta dal sensore UEGO, un'altra verifica è stata fatta utilizzando sensori fast HC e NO_x, ma a causa del rumore presente nelle misurazioni, esse non possono essere considerate significative.

Per verificare che il sensore utilizzato non fosse difettoso, si sono verificati tre sensori UEGO di tre diversi costruttori tra cui due di essi ("a" e "c") hanno però lo stesso elemento sensibile. Ripetendo il test si sono ottenuti i seguenti risultati:

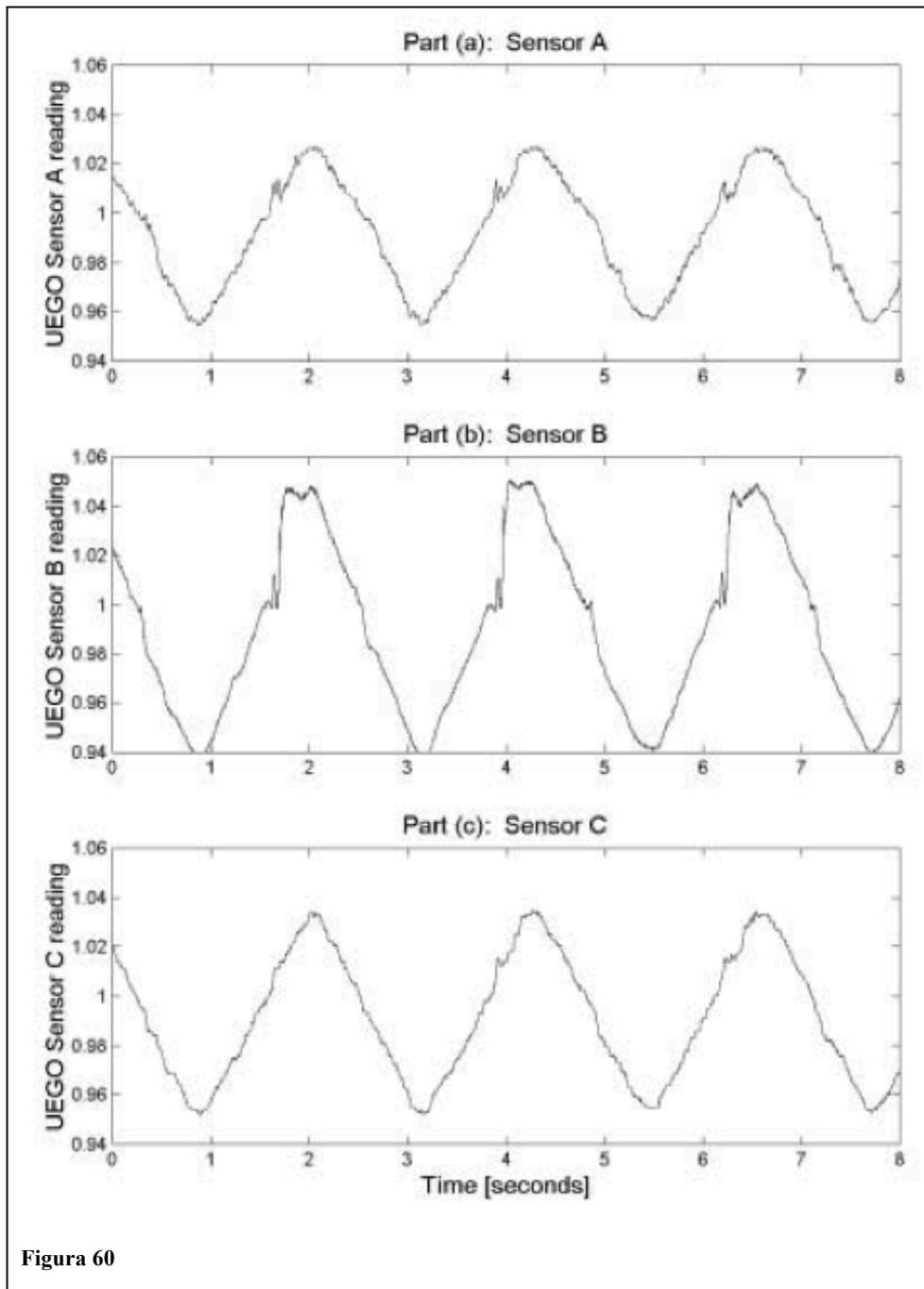


Figura 60

Si sono poi eseguiti anche dei test a gradino per vedere il comportamento non periodico e il tempo di risposta dei tre sensori:

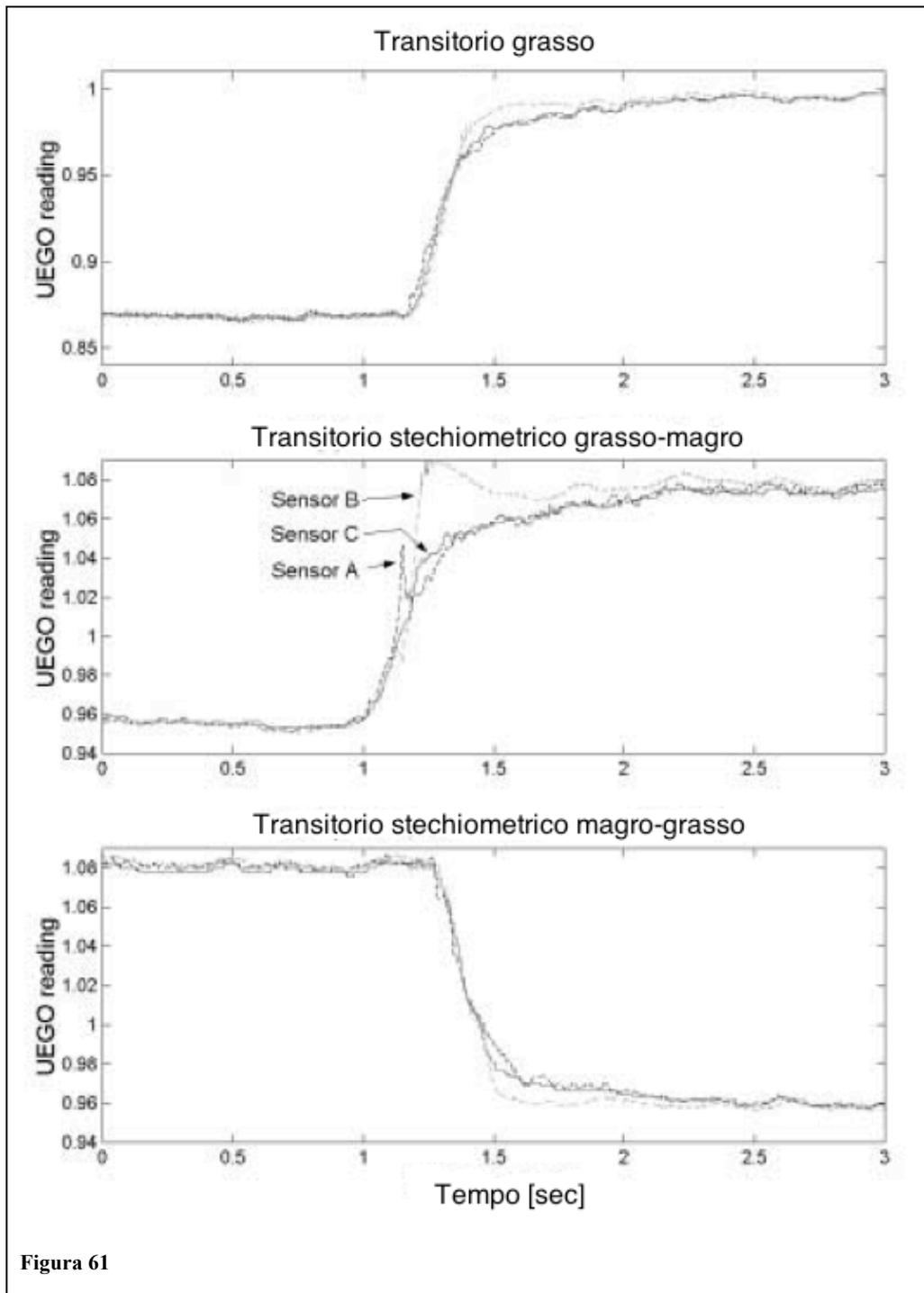


Figura 61

Resta da capire come i picchi presenti su tutti e tre i sensori, durante il transitorio stechiometrico, siano influenzati da alcuni parametri come la portata massica dei gas, la velocità di variazione dell'AFR ecc....

Eseguendo delle misurazioni (noto il reale rapporto aria-combustibile) in condizioni di regime, cioè con una durata dell'impulso d'iniezione e pressione d'aspirazione costanti, si sono confrontati i risultati dei tre sensori. In tali condizioni di regime non si sono misurati picchi d'AFR così da imputare i picchi alle sole condizioni di transitorio.

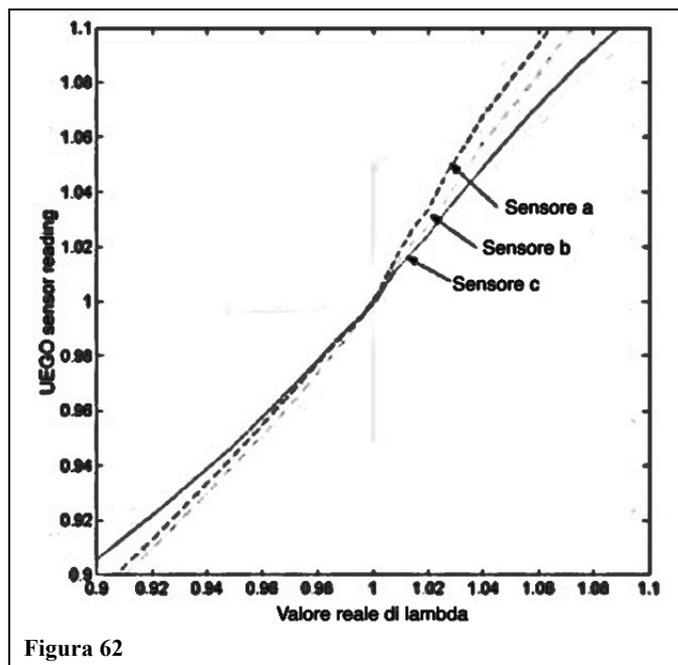


Figura 62

Influenza della pressione d'aspirazione

Al fine di valutare l'influenza di tale parametro sulle misurazioni si sono eseguiti tre test a tre diverse pressioni d'aspirazione ottenute variando la posizione della valvola a farfalla. Con l'aumentare della pressione aumenta anche la portata d'aria e l'iniezione di carburante va regolata di conseguenza. Dai risultati così ottenuti si vede che le variazioni di pressione hanno un'influenza pressoché irrilevante sui picchi:

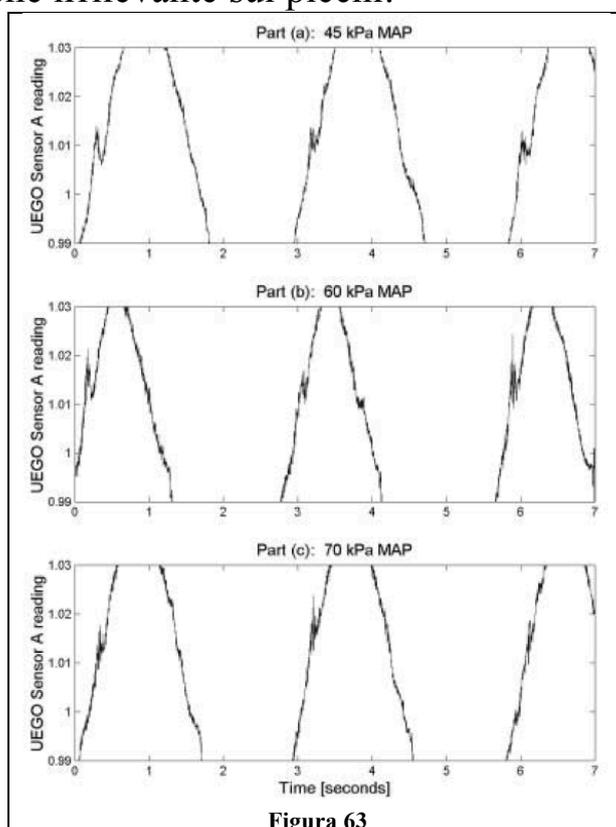


Figura 63

A causa delle differenze presenti fra i quattro cilindri del motore, si hanno misurazioni grezze da parte dei sensori che rendono meno visibili i picchi. Per evitare tale fenomeno si può utilizzare un filtro passa-banda che presenti la seguente funzione di trasferimento:

$$\frac{z^2 - 2 \cdot \cos(a) \cdot z + 1}{z - 2 \cdot \cos(a) \cdot \omega_n z + \omega_n^2} \cdot \frac{1 - 2\cos(a)\omega + \omega_n^2}{2 - 2\cos(a)}$$

dove $a = 2\pi / T$ è la frequenza di taglio del filtro, T invece rappresenta il numero di istanti campionati fra due iniezioni, tale valore è pari a 72 poiché un ciclo ha una durata di 720 gradi di manovella e le acquisizioni avvengono ogni 10, ω_n il cui valore è compreso fra 0 e 1 determina l'ampiezza della banda di frequenza tagliata, nei test settato arbitrariamente a 0,95.

Influenza dello scostamento dal valore stechiometrico sui picchi di misurazione.

Al fine di verificare se l'ampiezza dello scostamento dal valore stechiometrico dell'AFR influenza i picchi misurati dai sensori, si sono eseguiti dei test a tre diverse ampiezze ottenendo i seguenti risultati visibili in figura (simili per tutti e tre i sensori):

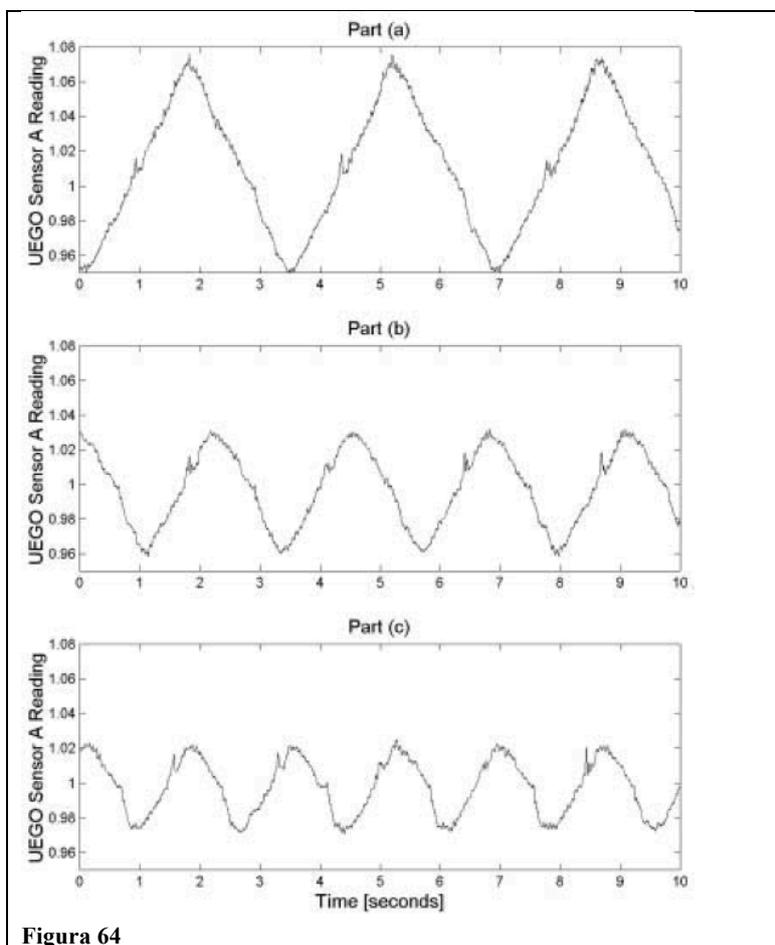


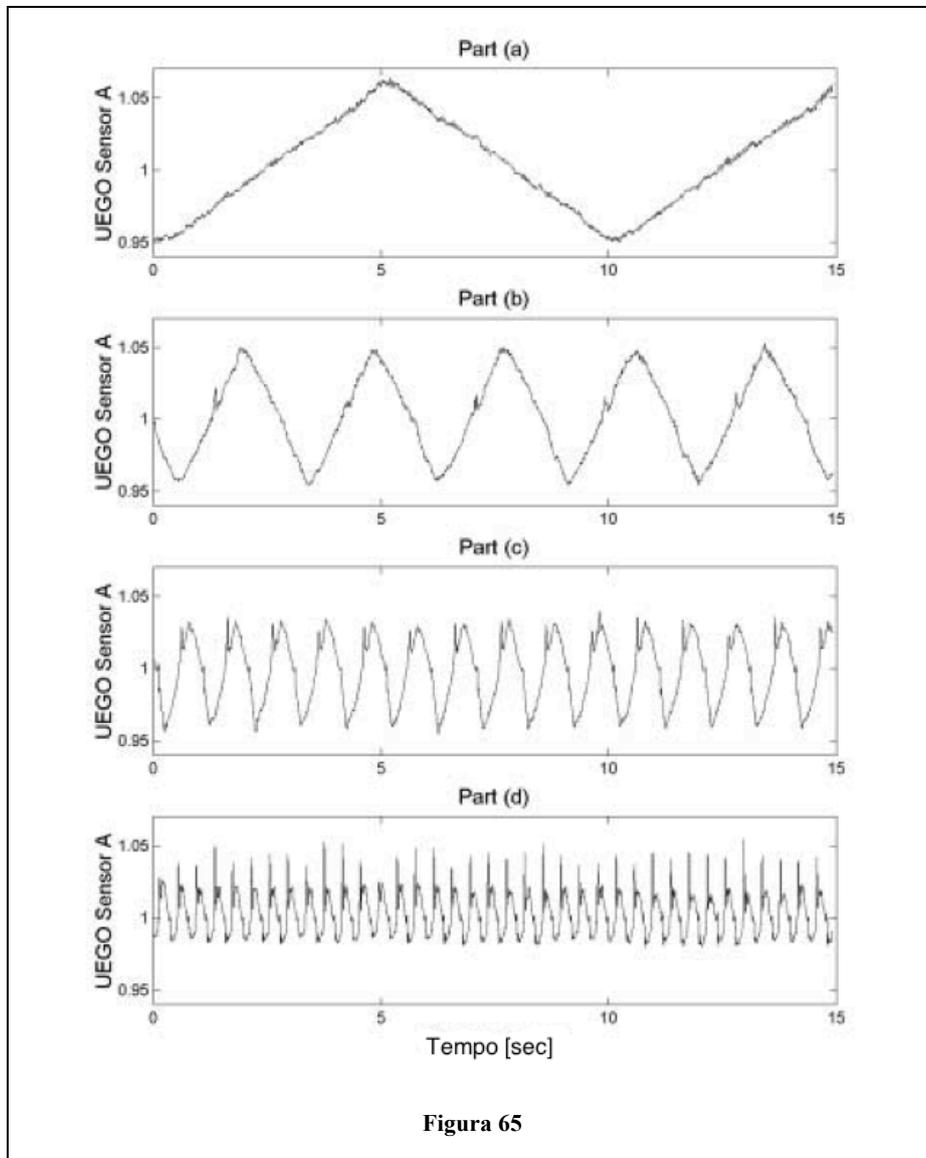
Figura 64

L'ampiezza dello scostamento dalla stechiometria non ha quindi una rilevanza rilevante sul valore dei picchi.

Effetto della velocità di variazione dell'AFR

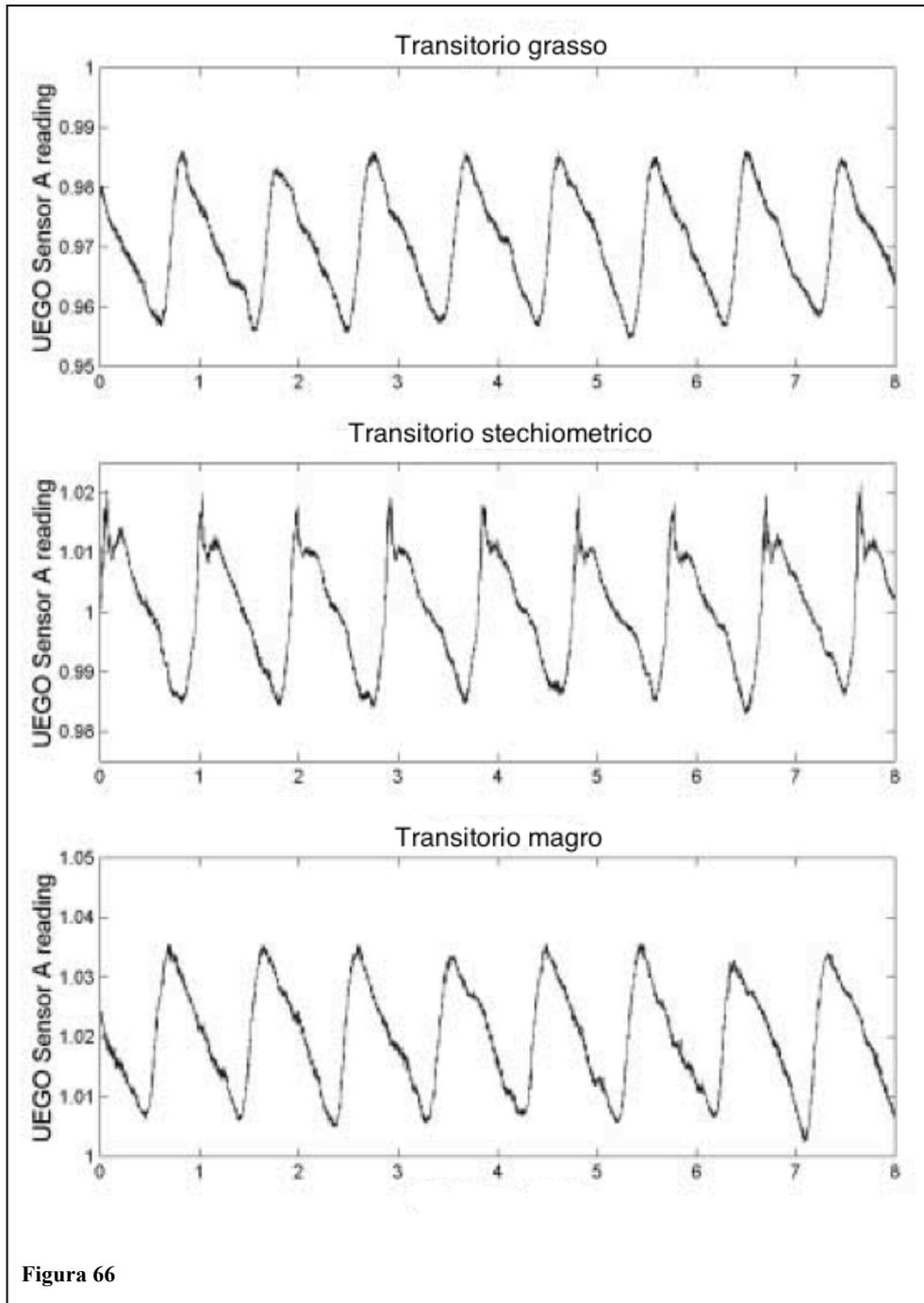
Per verificare quanto la pendenza delle rampe che costituiscono la caratteristica periodica triangolare della variazione dell'AFR, influenzi il valore dei picchi si sono eseguiti dei test variando per l'appunto la pendenza delle rampe e notando una dipendenza da essa.

All'aumentare della pendenza delle rampe, i picchi di pressione generati dalla dinamica del sensore tendono ad aumentare, tanto da superare i vertici della caratteristica triangolare, conseguenza dovuta anche al filtro che contribuisce all'attenuazione di quest'ultimo.



Conseguenze sul controllo in feedback

I picchi misurati dal sensore possono seriamente destabilizzare le performance di un controller che usi il sensore UEGO in feedback. Per verificare quanto può essere influenzato il sistema si è impiegato un controller progettato per segnali periodici, accoppiato con il sensore “a” in feedback.



Anche in questo caso il sensore misura i picchi nei soli transitori stechiometrici, restando quindi stabile durante quelli magri e grassi. L'instabilità è dovuta alla lettura di una miscela magra rispetto al valore prefissato, il controller quindi cercherà di iniettare più combustibile, spostando il picco d'AFR prima di quanto prefissato.

A tal punto allora riduce notevolmente l'iniezione di combustibile, provocando una rampa di discesa non omogenea. Tale instabilità è purtroppo così elevata da portare anche a misfire, incrementando così le emissioni inquinanti e riducendo le prestazioni del motore.

Conclusioni

Sulla base delle osservazioni sperimentali fatte finora, non è possibile individuare quale sia la causa dei picchi misurati dalla sonda UEGO.

I sensori UEGO sono dispositivi complessi, che coinvolgono nella misurazione sia un elemento sensibile, sottoposto a reazioni chimiche, sia un box contenente componenti elettroniche. Il sensore opera in modi diversi a seconda che la composizione dei gas sia ricca o magra; se ricca l'ossigeno è pompato in una cella di commutazione, se è magro invece viene pompato fuori. Per far ciò ogni sensore deve avere annesso un componente per selezionare in quale delle due modalità operare, tale meccanismo è incorporato nella centralina, coinvolgendone hardware e/o software. Poiché i picchi avvengono subito dopo un transitorio da ricco a magro, una delle possibili cause viene da pensare che sia proprio questo dispositivo di commutazione.

Tuttavia poiché questo non è stato ancora verificato, i picchi possono essere attribuiti anche all'elemento sensibile stesso. A causa della composizione non omogenea dei gas di scarico è altrettanto possibile che alcune componenti vengano rilasciate con un certo ritardo, in tal caso ci si aspetterebbe un lettura ricca subito dopo quella magra, ed esaminando i picchi più da vicino, a seguito di una lettura magra spesso si verificano punte grasse anche se di minor entità.

L'esecuzione di più esperimenti può di certo aiutare a identificare la causa dei picchi. Se questi fossero dovuti alla disomogeneità dei gas di scarico, eseguendo dei test a diversa temperatura si dovrebbe notare un'influenza sui picchi, poiché la temperatura influenza la composizione della miscela.

Osservando le diverse misurazioni dei sensori e ricordando che i sensori A e C possiedono controller diversi ma lo stesso elemento sensibile, le marcate diversità fra le misurazioni dei sensori "a" e "c" con quelle di "b", lasciano pensare che i picchi siano causati dall'elemento sensibile posto sulla testa del sensore.

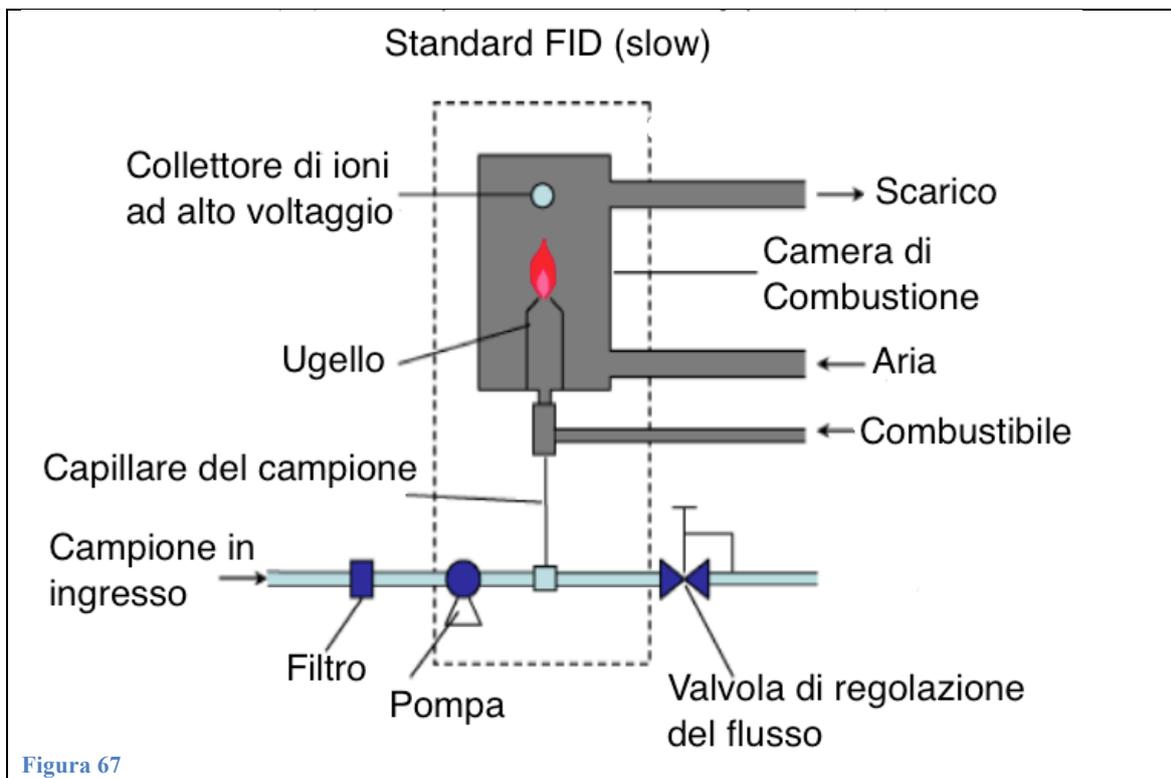
3.2 PROBLEMATICHE DURANTE I TRANSITORI D'ACCENSIONE: CONFRONTO UEGO-FFID

[BIBLIOGRAFIA](#) indice 8.

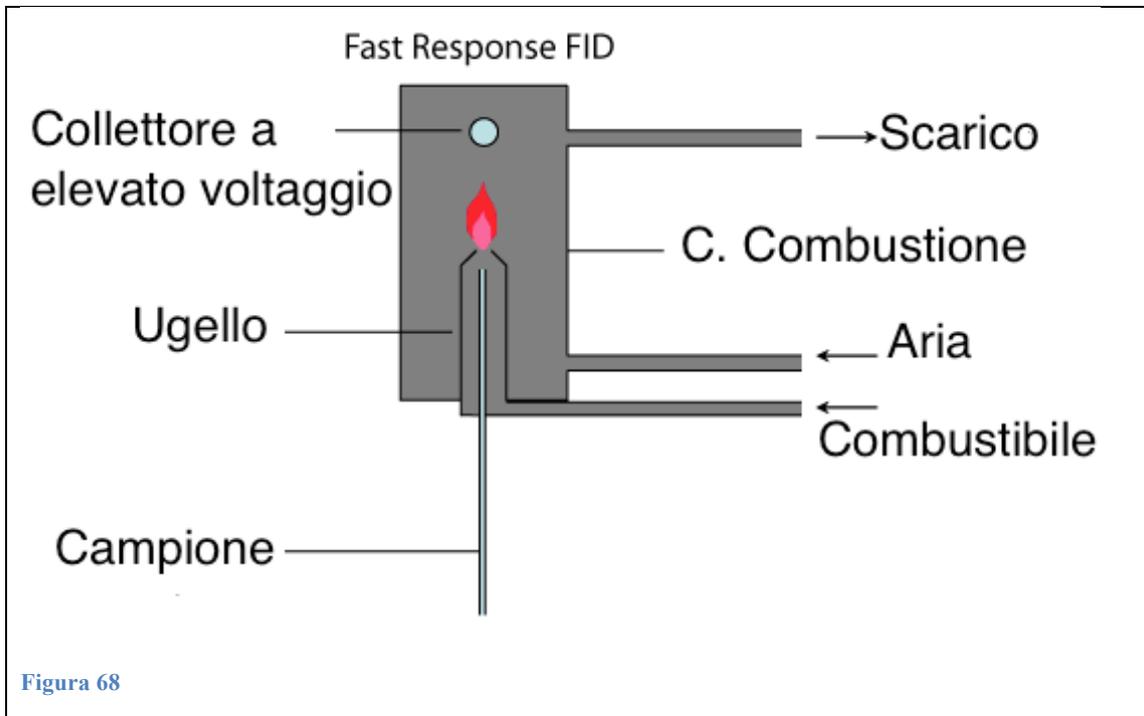
Com'è già stato approfondito nel capitolo [1.2 SISTEMI PER L'ABBATTIMENTO DELLE EMISSIONI](#), una delle principali problematiche riguardanti le emissioni di un motore a combustione interna è il controllo dell'AFR durante il transitorio d'accensione. Al fine di ottenere una misura dell'affidabilità del sensore durante questo tipo di transitorio si è utilizzato sia il metodo tradizionale, che prevede l'impiego di un sensore UEGO con relative problematiche, sia un metodo più innovativo, che prevede l'utilizzo di un sensore in camera FFID.

Sensori in camera FFID

Il gas da analizzare fluisce verso una fiamma a idrogeno dentro il FID. Ogni idrocarburo del campione introdotto, mentre è bruciato, produrrà ioni che saranno poi rilevati da un collettore metallico al quale è applicato un elevato voltaggio. La corrente che attraversa il collettore è così proporzionale alla quantità di ioni, proporzionali a loro volta alla quantità d'idrocarburi, correlata all'AFR della miscela. Il processo di ionizzazione nei FID "lenti" è comunque rapido e impiega circa 1-2 secondi.



Per una più rapida risposta del sensore è in commercio anche una variante del sensore chiamato per l'appunto "Fast" FID, in grado di impiegare pochi millisecondi per generare l'output desiderato.



Questa variante del sensore è dotata di un doppio canale dei gas in ingresso per l'analisi di due campioni, provenienti ad esempio dalla camera e dallo scarico post catalizzatore. È poi presente un'unità di controllo per selezionare quale gas analizzare.

Svolgimento dei test

Il motore utilizzato per i test è stato un Ford Zetec a tre diverse temperature: 0, 20 e 90°C. I sensori UEGO sono quelli maggiormente utilizzati in quest'ambito di ricerca per via della loro facilità d'installazione, infatti, basta semplicemente eseguire un foro sullo scarico e saldare su di esso un tubo opportunamente maschiato, inoltre ha un costo relativamente basso rispetto ad altri sensori più di nicchia. I principali produttori di questi sensori sono Bosch, Ntk e Horiba, essi classificano la prontezza di risposta di tali sensori riportando la costante di tempo (definita come tempo necessario perché il segnale raggiunga il 63,2% del valore a regime); va precisato che essa varia in funzione dell'applicazione. Il sensore utilizzato per questo studio è stato un Horiba con una costante di tempo pari a 100 msec che può essere ridotta fino a 60 msec rimuovendo il tubo metallico protettivo dell'elemento sensibile. Anche la posizione del sensore ha un'importanza rilevante sui risultati, per cui bisogna fare attenzione ad esempio a non collocarlo nei tratti curvilinei, dove il flusso è disturbato dalla deviazione.

Nelle fast FID invece la costante di tempo è 1ms per il solo sensore e di alcuni millisecondi per l'intero processo di campionamento, inoltre anziché la quantità di ossigeno si misura quella d'idrocarburi per ricavare l'AFR.

Settaggio iniziale dei test

- Il motore Zetec è un quattro cilindri in linea, con una cilindrata di 2.0 litri, un rapporto di compressione di 9.6, un alesaggio di 85mm, una corsa di 88 ed è equipaggiato con un'apposita centralina per il controllo in condizioni dinamiche.
- Il cilindro studiato è stato il numero 4 poiché è il più accessibile.
- Il motore e anche il dinamometro a correnti parassite (AG80) ad esso collegato, sono stati inseriti all'interno di un contenitore isolato termicamente al fine di mantenere controllata la temperatura e portarla al valore desiderato all'accensione.
- La valvola a farfalla controllata tramite PC, durante i test effettuati, è stata mantenuta chiusa all'accensione.
- Il combustibile utilizzato è stato quello normalmente in commercio in California durante la seconda parte dell'estate.
- Il controllo dell'iniezione è stato calibrato verso miscele leggermente grasse.

Le posizioni iniziali del motore all'accensione sono state in tutto cinque. Quattro di queste (A, B, C ed E) sono le posizioni naturali all'arresto di un motore a quattro cilindri. La posizione A è durante la corsa di compressione, la B durante la fase di combustione, la C durante la corsa di scarico e la E durante la corsa di aspirazione. La posizione D è stata aggiunta per via della sua posizione interessante prima della corsa di aspirazione. Nelle prime posizioni (ad esempio "a") il motore si accende più velocemente e quindi il motorino d'avviamento impiega un minor tempo a porre in rotazione le masse fino all'accensione.

La UEGO Horiba MEXA-110 λ è stata posizionata sul collettore di scarico del quarto cilindro, a una distanza di 10 cm dalla valvola di scarico, il sensore è stato preriscaldato prima dell'accensione del motore per almeno trenta secondi così da essere a regime. Per $\lambda=1$ i costruttori garantiscono un'accuratezza del $\pm 1\%$.

La FFID Combustion HFR 400, dotata di una precisione di misurazione del $\pm 1\%$ e con un tempo di risposta di pochi msec, è stata sistemata nella camera di combustione del cilindro 4.

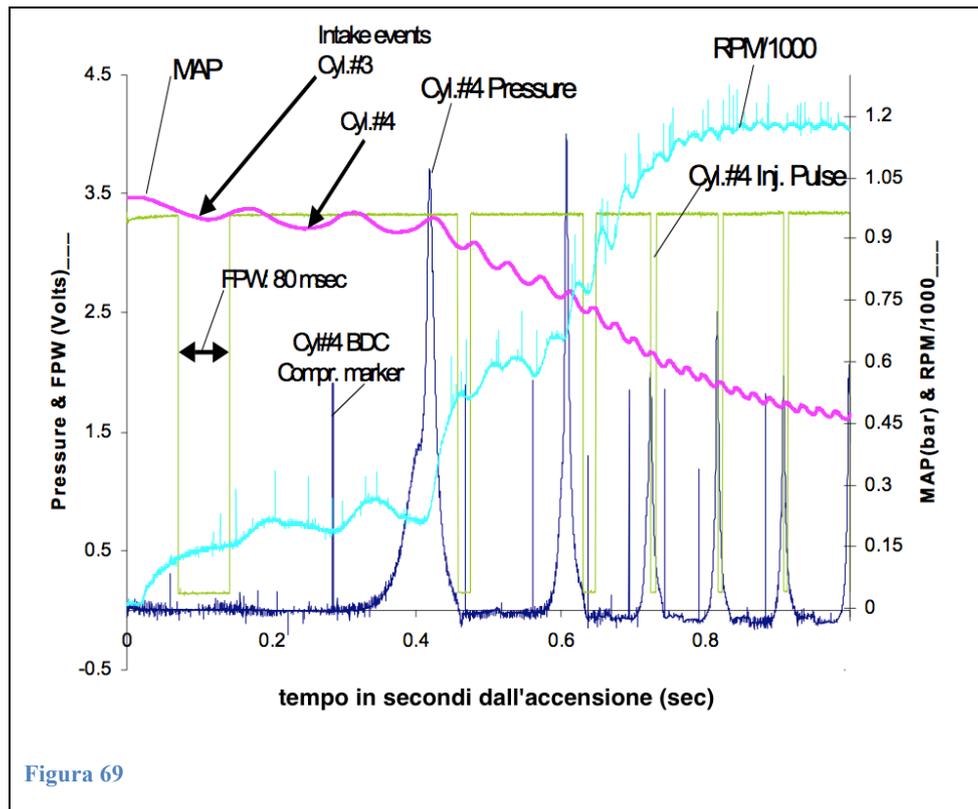


Figura 69

Dalle caratteristiche dei principali parametri del motore durante il primo secondo dall'accensione si osserva che:

- La MAP dalla pressione atmosferica si dimezza in soli cinque cicli circa.
- Gli RPM aumentano a step
- La durata dell'iniezione influenza i picchi di pressione

Non è stato riportato il segnale del sensore FFID per maggiore chiarezza.

Risultati nei test a caldo (90°C)

I primi dati raccolti sono stati quelli riguardanti la partenza a 90°C e posizione iniziale "a", dalle informazioni così raccolte si sono costruite e paragonate le caratteristiche dei segnali λ relativi ai sensore UEGO e FFID più l'andamento degli RPM, il tutto in funzione del numero di cicli .

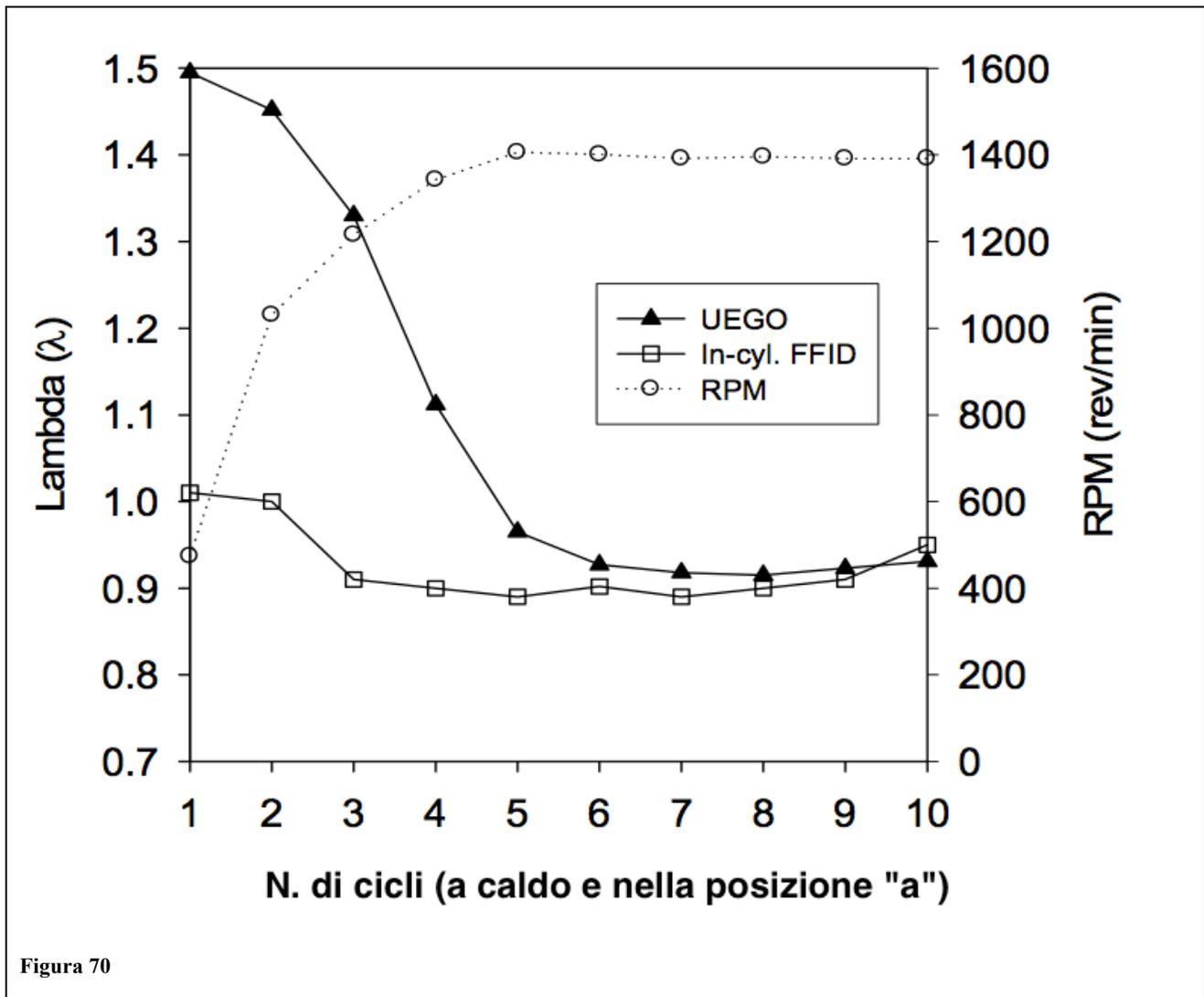
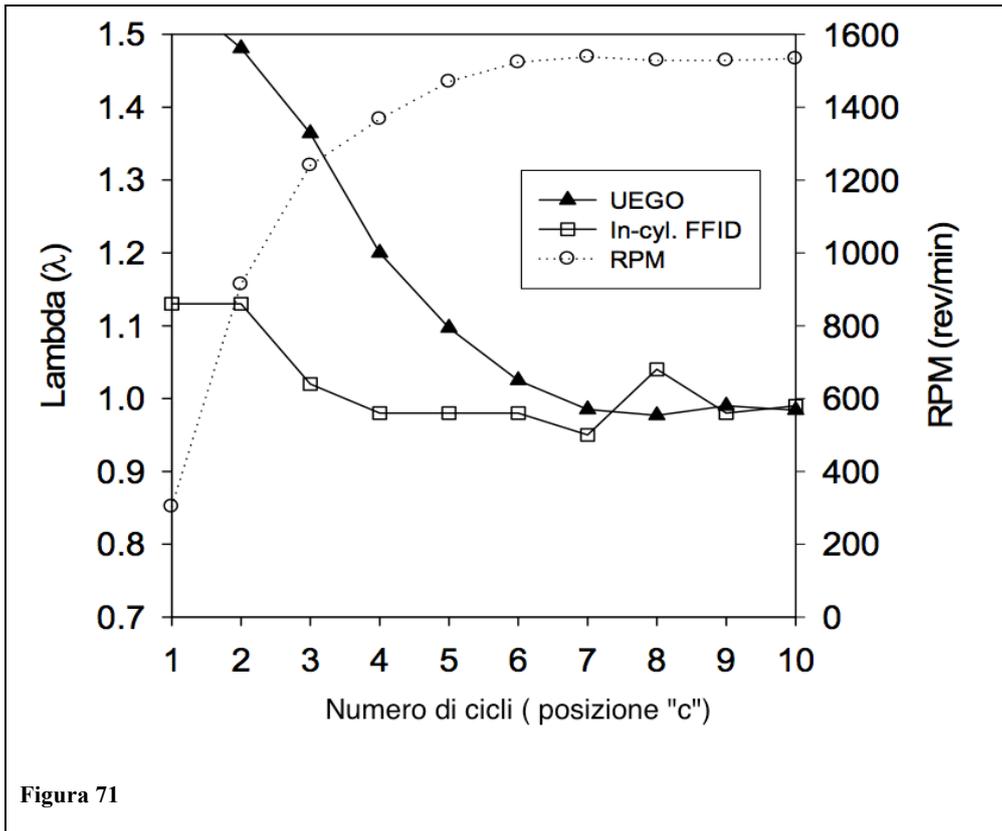


Figura 70

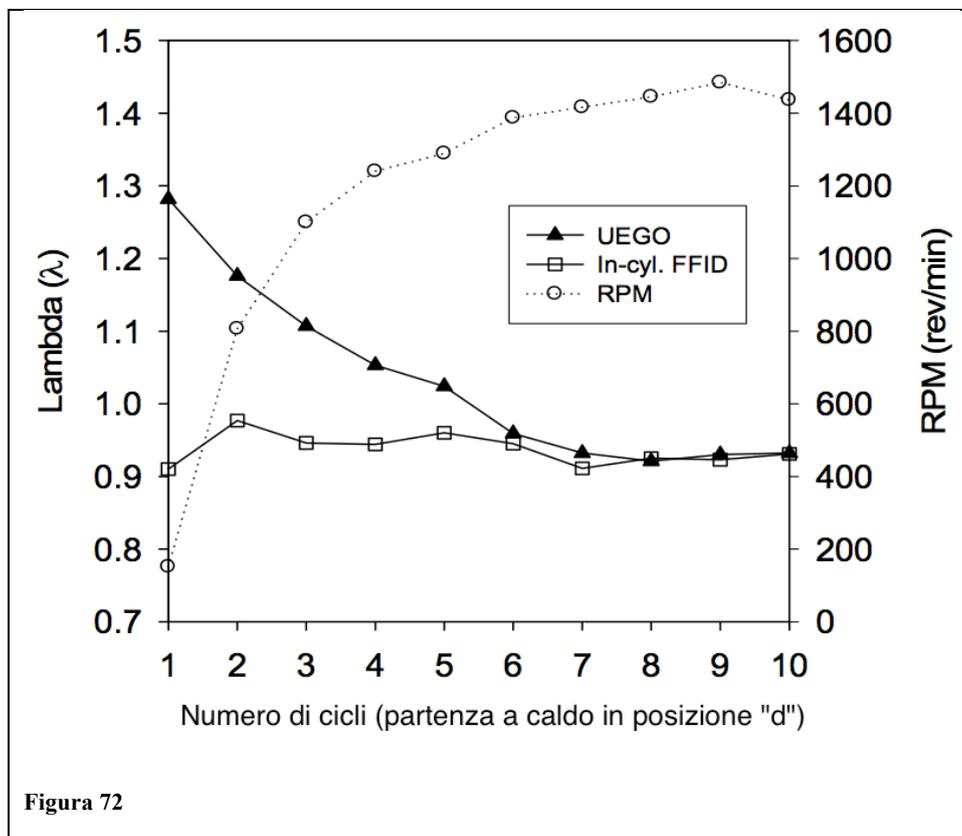
Dalle caratteristiche così costruite si nota che il sensore UEGO parte da un valore di $\lambda=1,5$. L'andamento, decrescente per circa cinque-sei cicli, tende ad assestarsi in quelli successivi nell'intorno di $\lambda=0,9$. La misurazione effettuata tramite FFID si vede subito essere sensibilmente più precisa fin dall'inizio e in grado di raggiungere la condizione di regime in appena tre cicli, la metà di quelli impiegati dalla UEGO.

Il segnale inizialmente magro misurato dal sensore UEGO è imputabile all'inerzia del motore che in seguito al comando di spegnimento interrompe l'iniezione di combustibile, ma continua a girare compiendo tre cicli circa prima di fermarsi completamente (sei rivoluzioni). In tale intervallo è pompata aria pura che rende fortemente magra l'atmosfera allo scarico. Si ha così un ritardo dovuto al tempo che il flusso (in uscita dalla valvola di scarico) impiega per raggiungere il sensore posto a valle del catalizzatore.

Ripetendo i test ma dalla posizione iniziale del pistone "c", i risultati dei dati raccolti hanno fatto emergere una dilazione del numero di cicli, necessari affinché l'output diventi accettabile pari a sette.

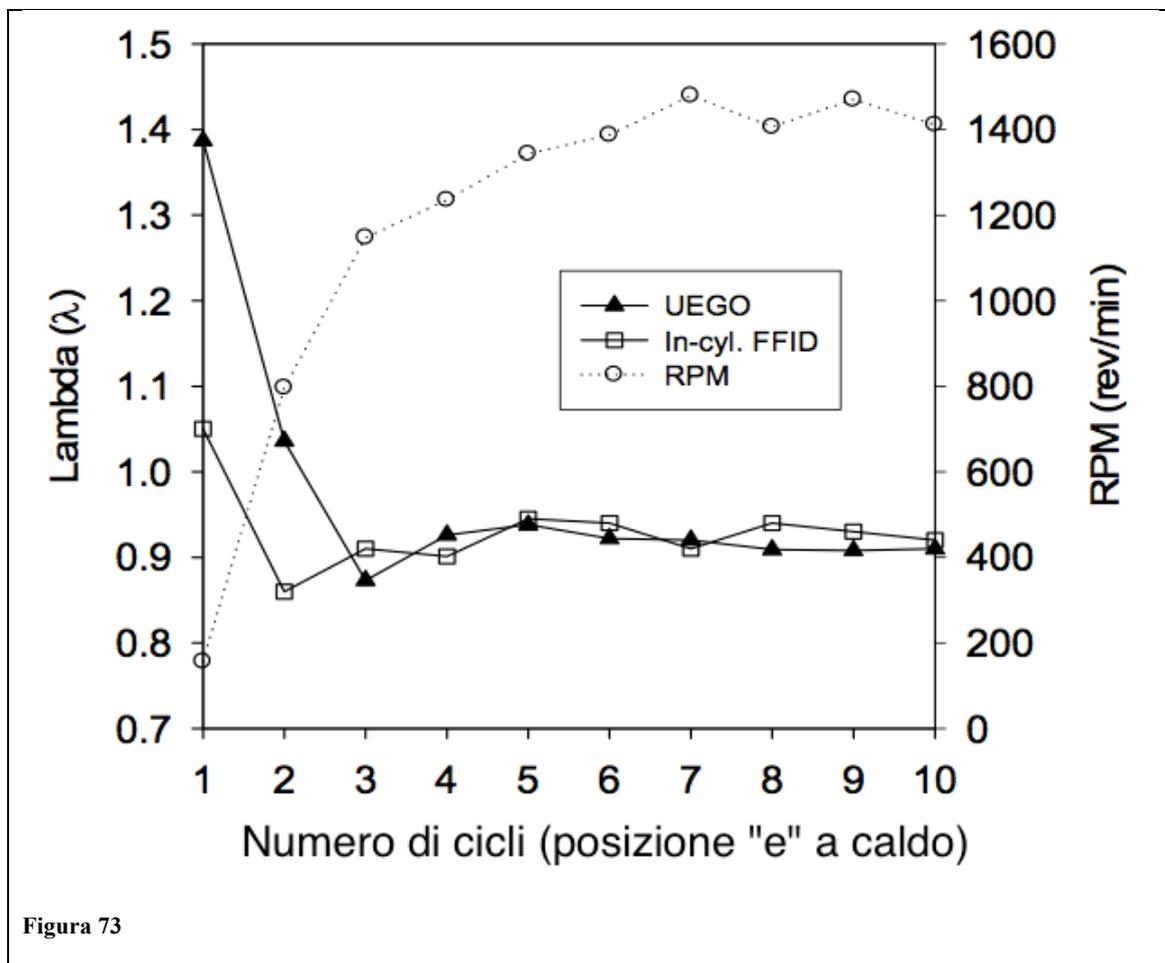


Risultati simili sono prodotti compiendo i test a caldo partendo dalla “d”, poco prima della corsa di aspirazione, l’unico scostamento rilevante dai test precedenti è il valore di λ iniziale che è di due-tre decimi più grasso.



Risultati sensibilmente diversi da quelli visti finora si hanno in corrispondenza di una partenza dalla posizione “e”. La misurazione del sensore UEGO tende a sovrapporsi a quella effettuata tramite FFID in appena tre cicli. Ciò è dovuto al ritardo col quale avviene l'accensione, che si traduce in una velocità ridotta ai primi cicli. All'accensione, infatti, si misurano solo 150 RPM che corrispondono alla velocità del motorino d'accensione, mentre per la posizione “a” se ne avevano ben 600 RPM. Grazie a ciò i primi cicli hanno una durata sufficientemente elevata da far convergere i risultati dei due sensori in un minor numero di cicli.

La posizione “e” corrisponde all'istante in cui si è a metà dell'apertura della valvola d'aspirazione, e porta alla formazione di un elevato numero di HC.



Risultati nei test a temperatura ambiente (20°C)

I test effettuati a 90°C sono poi stati eseguiti a 20°C ottenendo i seguenti risultati per le posizioni “a”, “c” e “d”. La posizione “b” non è stata riportata poiché del tutto simile alla “a”.

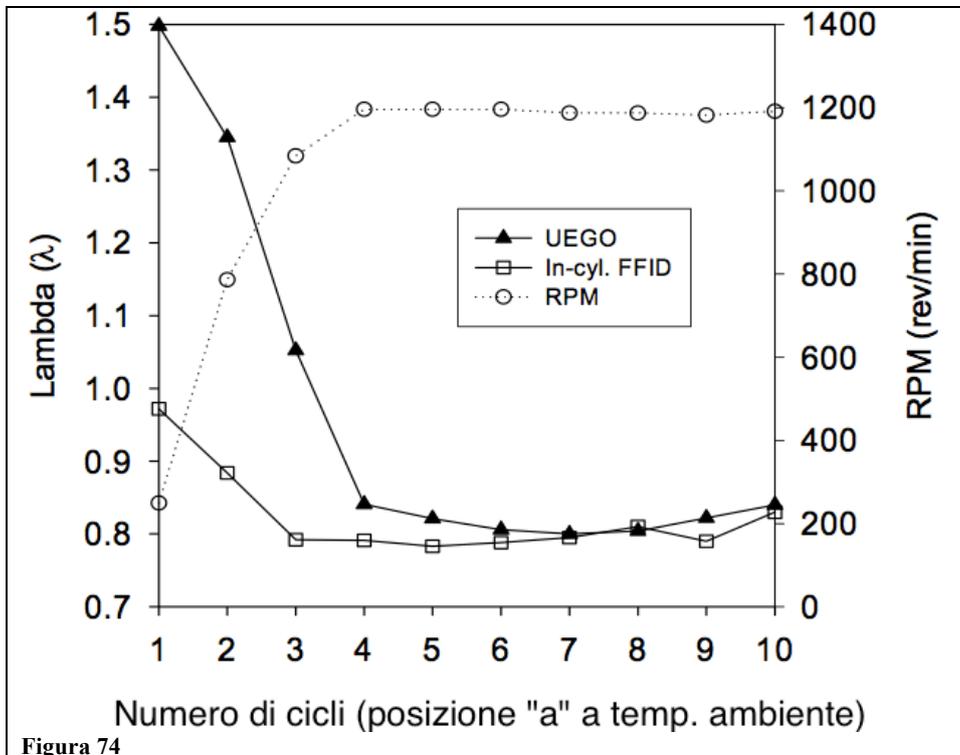


Figura 74

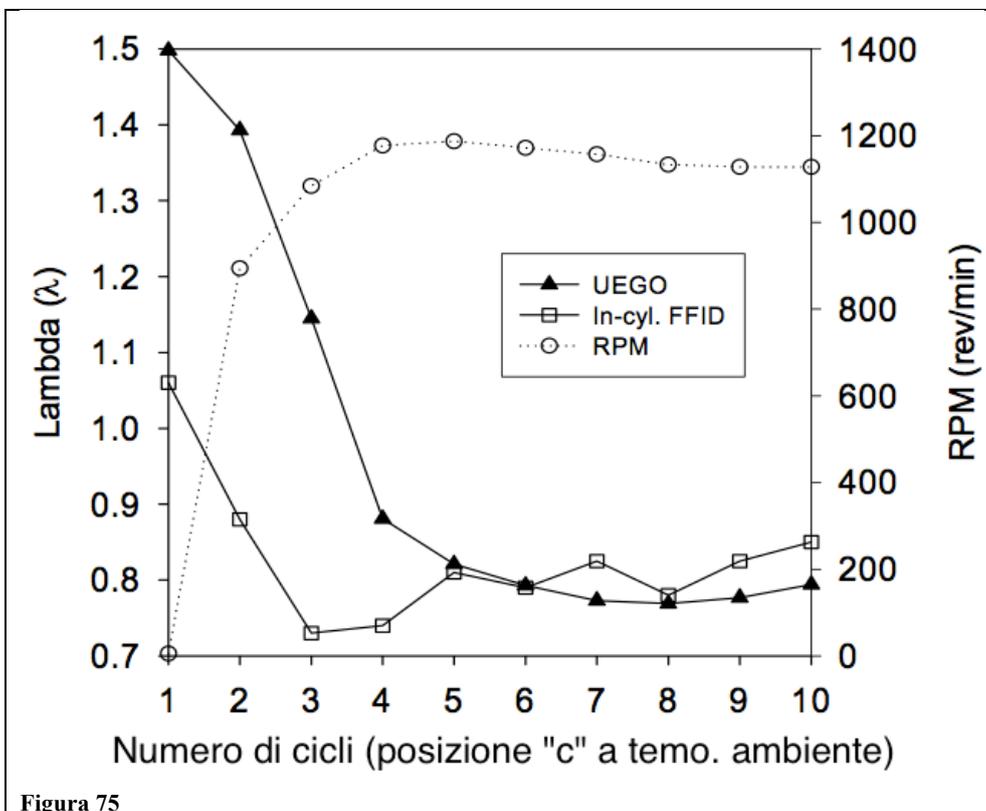
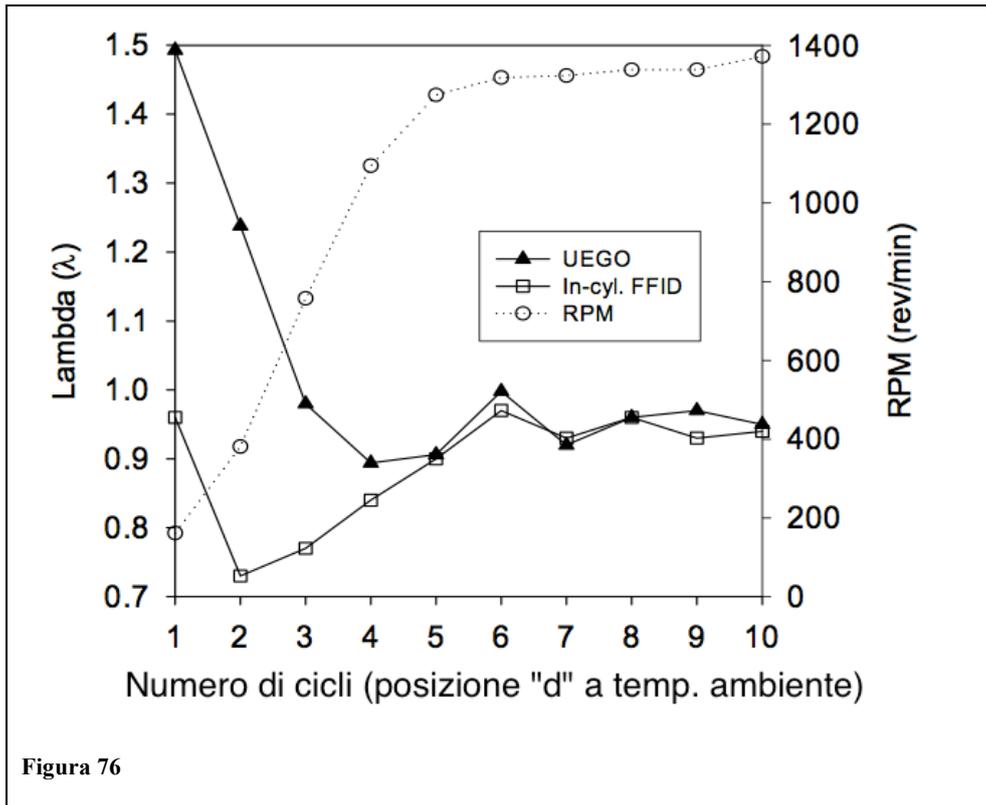


Figura 75

Dai test effettuati si nota che i risultati dei due sensori tendono a sovrapporsi dopo 5-6 cicli, un ciclo in meno rispetto alle prove a caldo, questo è dovuto alla minor velocità del motore (dovuta alla presenza di maggiori attriti) nei cicli iniziali che, com'è già stato detto, concede al sensore UEGO più tempo per generare un output affidabile.

Un buon esempio di quanto è stato detto sono i risultati della partenza dalla posizione "d":



Risultati nei test a bassa temperatura (0°C)

Infine si sono eseguiti una serie di test alla temperatura di 0°C, sulla sola posizione di partenza "a". Si è osservato che gli output dei due sensori tendono a sovrapporsi dopo 5 cicli, ovvero circa uno in meno della serie di test a temperatura ambiente. Anche in questo caso ciò è dovuto all'incremento degli attriti che riducono la velocità del motore nei primi cicli successivi all'accensione. Di seguito si riportano due test col motore in posizione "a" al fine di verificare anche la ripetibilità delle prove:

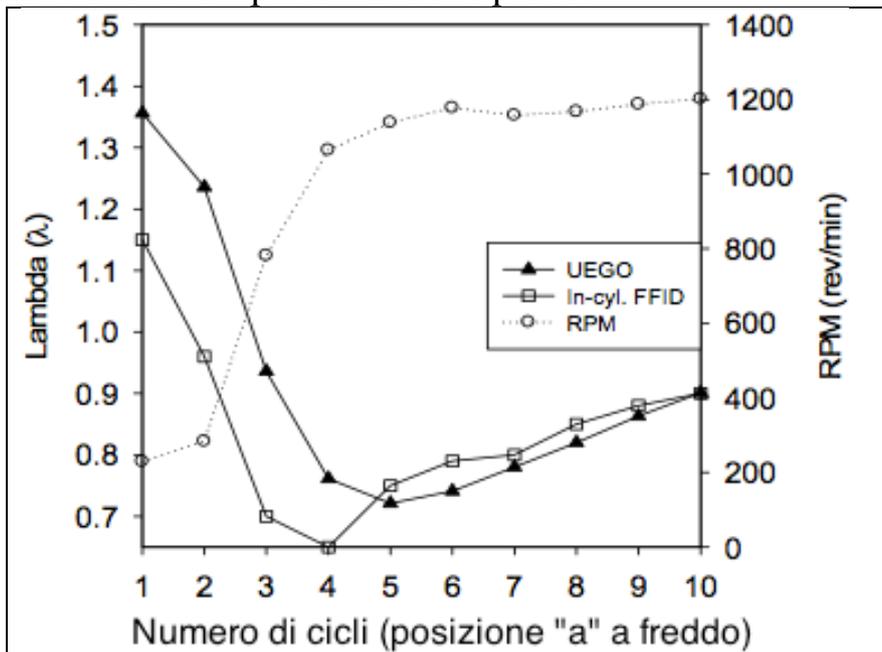


Figura 77

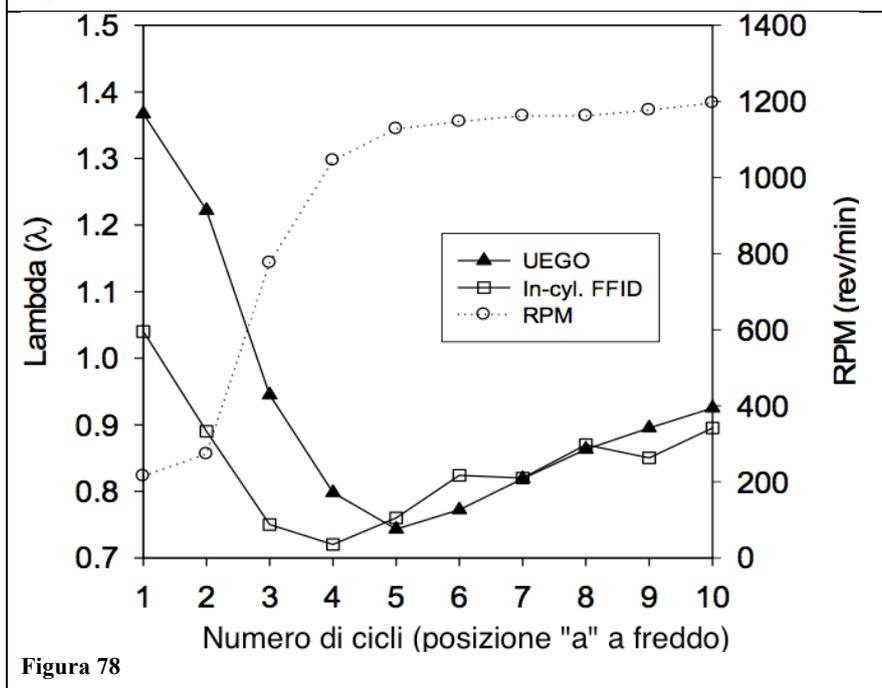


Figura 78

Errori nella misurazione di λ

Per tutti i test effettuati si sono misurati gli errori prodotti dalla misurazione del sensore UEGO confrontandolo col FFID. Gli errori così valutati sono stati riportati in funzione del tempo, come istante iniziale si è scelto la fine del primo ciclo per omogeneizzare quanto il più possibile la prova svincolandola dagli effetti prodotti dalla posizione di partenza.

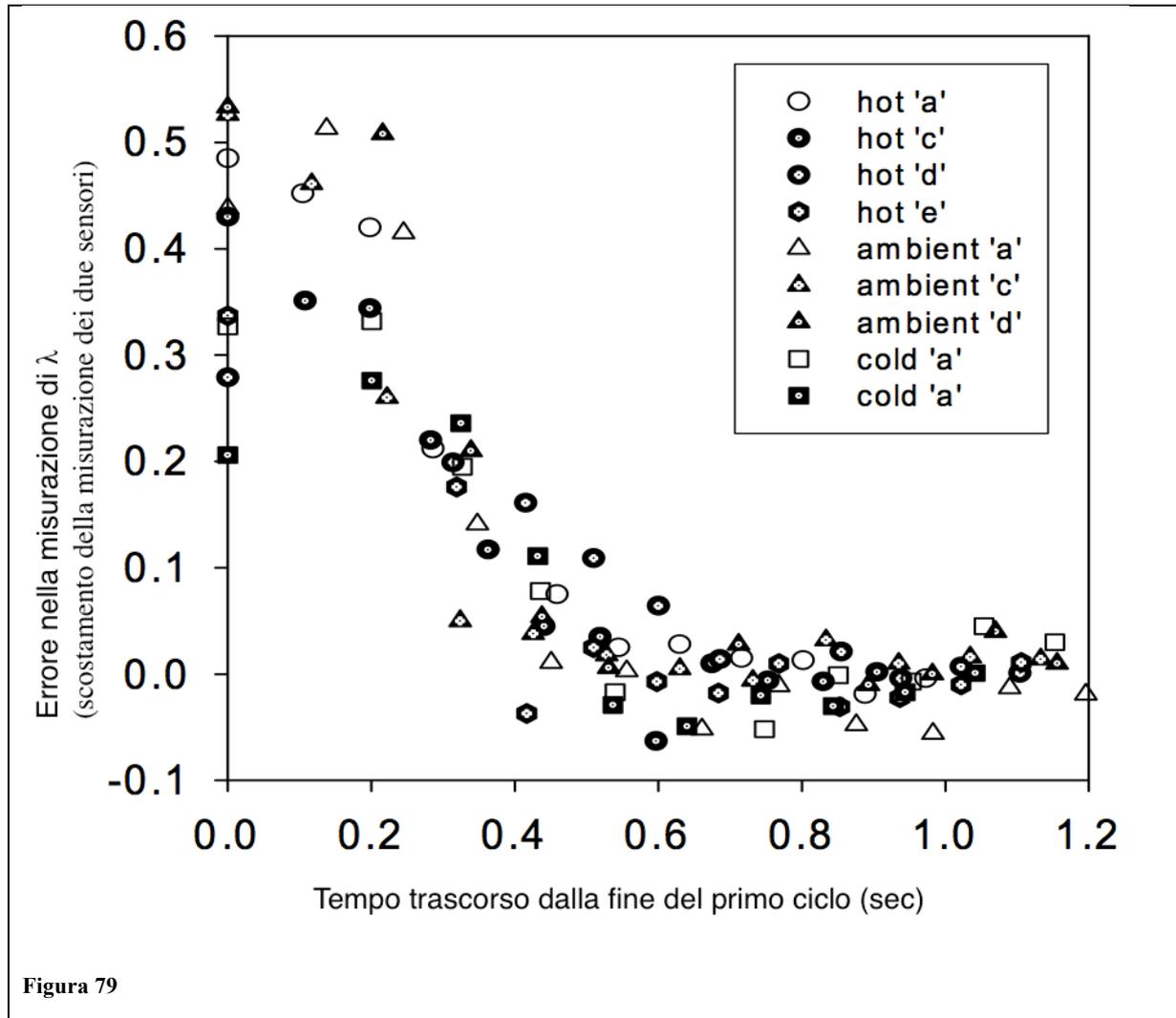


Figura 79

Si può notare come i dati riportati in questa forma non presentino gli effetti generati dalla posizione di avviamento e dalla temperatura. L'errore per una sonda UEGO in genere è ritenuto accettabile quando si mantiene inferiore al 5%, tale valore varia comunque in funzione dell'esigenza specifica.

Dati filtrati

Infine, poiché la sonda UEGO ha anche la funzione di filtro, è interessante osservare l'effetto di un filtro digitale passa-basso applicato al FFID. Nella figura sottostante sono riportati i risultati del test utilizzando un filtro con una costante di tempo di circa 200 msec. Tale valore rappresentativo è di grande importanza per il confronto dei due sensori. I risultati così osservati hanno una forma simile a quelli generati dalla UEGO. Questo risultato suggerisce che la costante di tempo per questa sonda UEGO unita a quella del sistema motore, è di circa duecento millisecondi, con un tempo di risposta complessivo di circa 300 millisecondi.

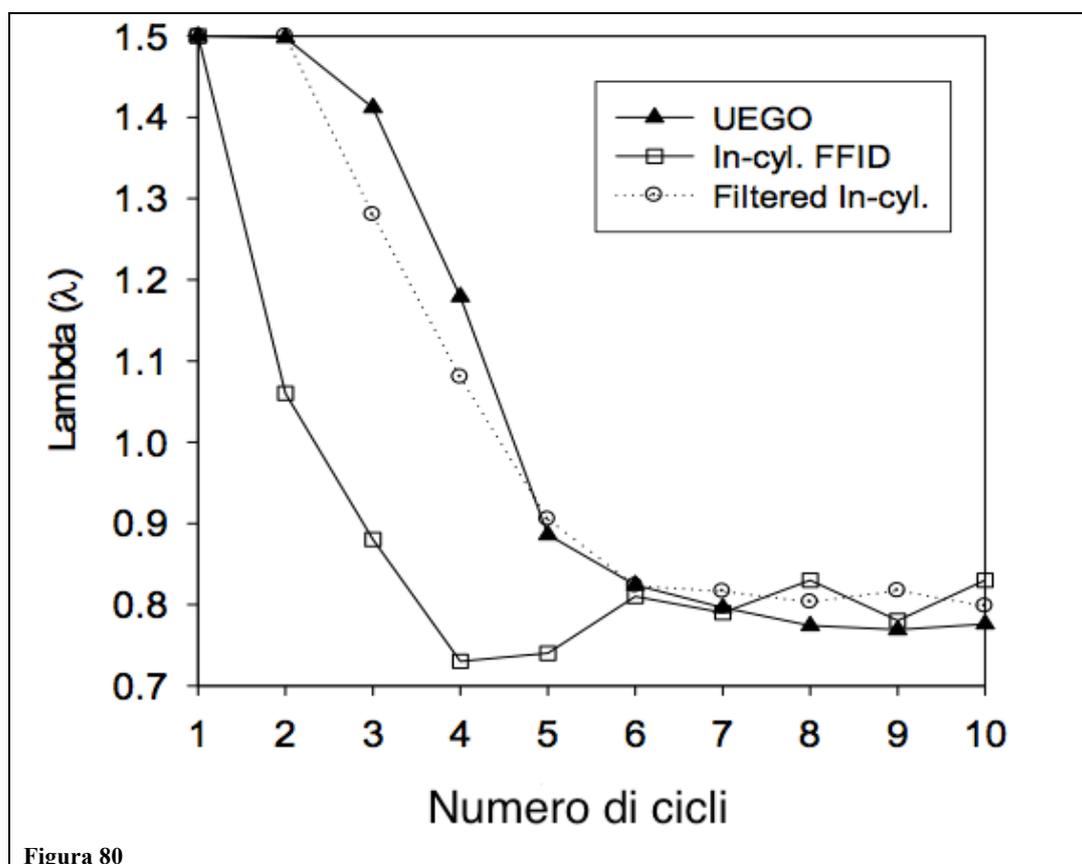


Figura 80

Conclusioni tratte:

Questo studio ha fornito tutti i dati necessari per valutare il numero di cicli che occorrono a un tradizionale sensore UEGO per generare un risultato valido, da questo studio si possono così trarre le seguenti conclusioni:

- Il numero di cicli impiegati per generare un output valido è funzione della posizione di partenza e della temperatura iniziale del motore.
- In termini di tempo invece, un sensore UEGO impiega circa mezzo secondo prima di generare un output valido. E tale periodo così calcolato non risente né della temperatura né della posizione iniziale del pistone nel cilindro.

3.3 INTERAZIONI FRA I SENSORI D'O₂ E LA COMPOSIZIONE DEI GAS ALLO SCARICO

BIBLIOGRAFIA indice 9.

Tra i diversi fattori che alterano il funzionamento dei sensori d'ossigeno (con conseguente aumento delle emissioni) ve ne sono alcuni dovuti alla composizione dei gas di scarico, tra cui:

- Shock termici, in genere causati dalla condensa formatasi nei primi cicli, in grado di danneggiare il rivestimento in ceramica porosa che circonda il sensore.
- Depositi di P, Pb, S, Si provenienti dalla benzina e altri olii lubrificanti che possono collegare i pori della ceramica o avvelenare gli elettrodi.
- Interazioni dei gas di scarico a contatto col sensore

Le interazioni dei gas di scarico sono state esaminate studiando due sensori d'ossigeno commerciali (sia riscaldati che non), in primo luogo si sono utilizzate miscele di gas semplici, per poi passare ad altre a complessità maggiore. I risultati sono il frutto dell'analisi di due sensori HEGO (Binari o switching che dir si voglia) uno nuovo e uno "vecchio", entrambi disponibili sul mercato e di uso corrente su alcuni veicoli.

La particella che influenza maggiormente le prestazioni del sensore è l'H₂; tipicamente presente nei gas di scarico con una concentrazione in volume che varia tra lo 0,1 e lo 0,3% .

La molecola d'idrogeno è in grado di ingannare il sensore, facendo passare per grassa una miscela stechiometrica, questo può portare a regolare la combustione verso miscele magre incrementando il livello di NO_x emessi.

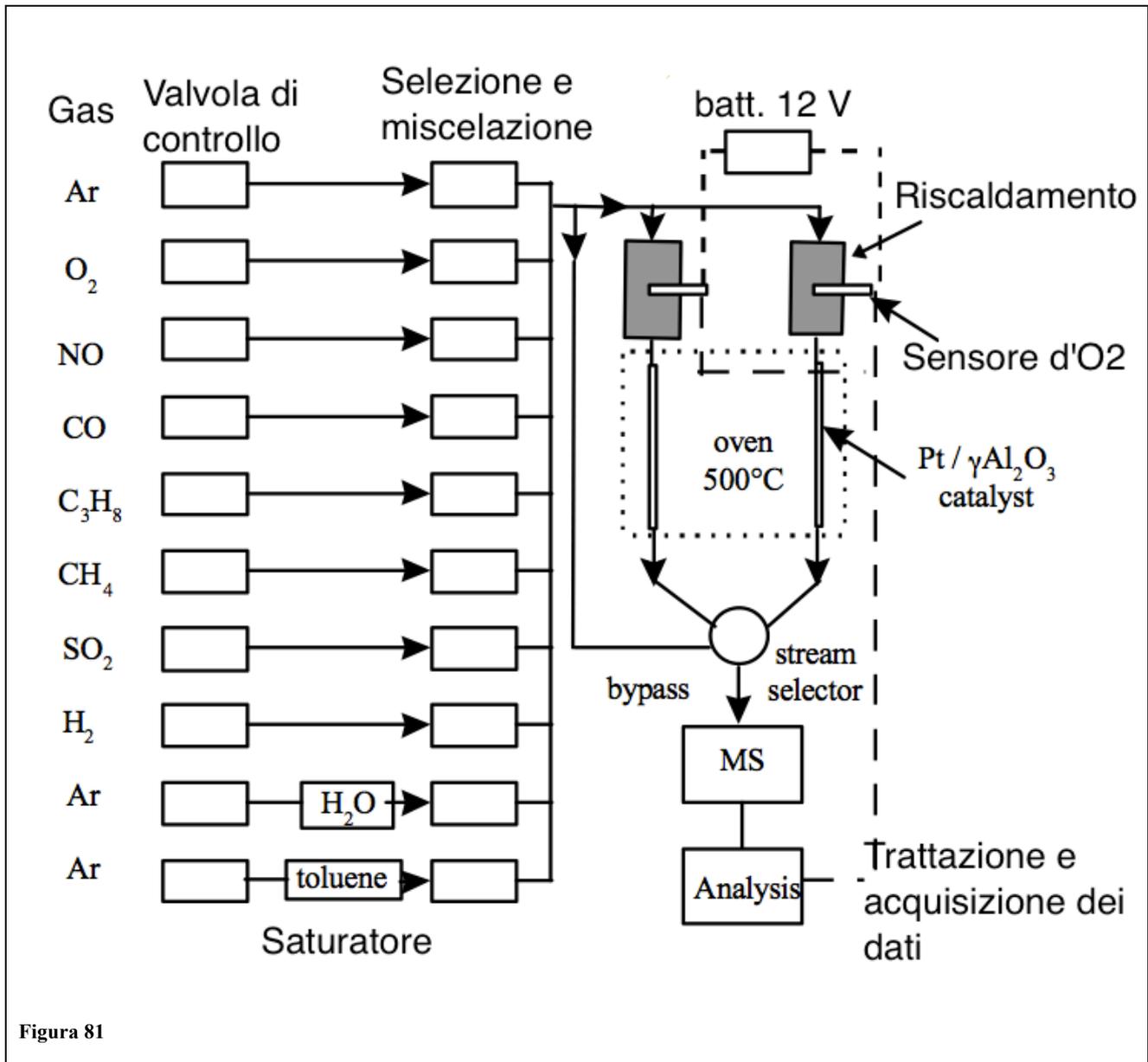
Di seguito si riporta uno studio che va ad approfondire gli effetti sulle prestazioni del sensore da parte delle seguenti classi di specie chimiche:

- Paraffine (miscela d'idrocarburi solidi)
- Olefine (idrocarburo insaturo che contiene nella molecola un doppio legame fra due atomi di carbonio)
- Aromatiche (composti organici che contengono uno o più anelli aromatici nella loro struttura).
- Inorganiche (in particolare l'H₂)

Il sensore datato, la cui storia non è nota ha un kilometraggio approssimativo pari a 60000km; si ritiene che sia stato sostituito per via del calo di prestazioni.

Apparecchiature e procedimento dei test

Per consentire la caratterizzazione dei due sensori in parallelo si è modificato un impianto in cui scorre un nanoflusso di gas campione.



L'impianto è dotato di una vasta gamma di miscele di gas in cui l'Ar è utilizzato come gas inerte di trasporto e serve a rappresentare l'N₂ del gas di scarico reale.

Tipicamente, gli esperimenti sono stati eseguiti in condizioni statiche (senza oscillazioni di A/F) a una pressione assoluta di circa 1,25 bar e una velocità del flusso dei gas di circa 120 ml/min (velocità maggiori non sono consentite dall'impianto a disposizione per i test), tale valore corrisponde a una velocità di

circa 0,3 m/s. Il sensore d'ossigeno è stato montato in un blocco d'acciaio (lo stesso tipo d'acciaio utilizzato per i tubi di scarico) dotato di riscaldamento. La temperatura del blocco è controllata al fine di simulare al meglio i gas di scarico reali. La batteria a 12 V serve ad alimentare il sensore e il riscaldamento interno di cui è dotato.

Al fine di ottimizzare i test e definire un adeguato standard di temperatura dei gas di scarico per lo studio del sensore, si è monitorata la temperatura attraverso la risposta di un sensore EMF (Forza Elettro Motrice). In questo modo (mantenendo spento il riscaldamento interno) è stato possibile definire la temperatura alla quale il sensore è in grado di generare il segnale alto, tipico delle miscele grasse.

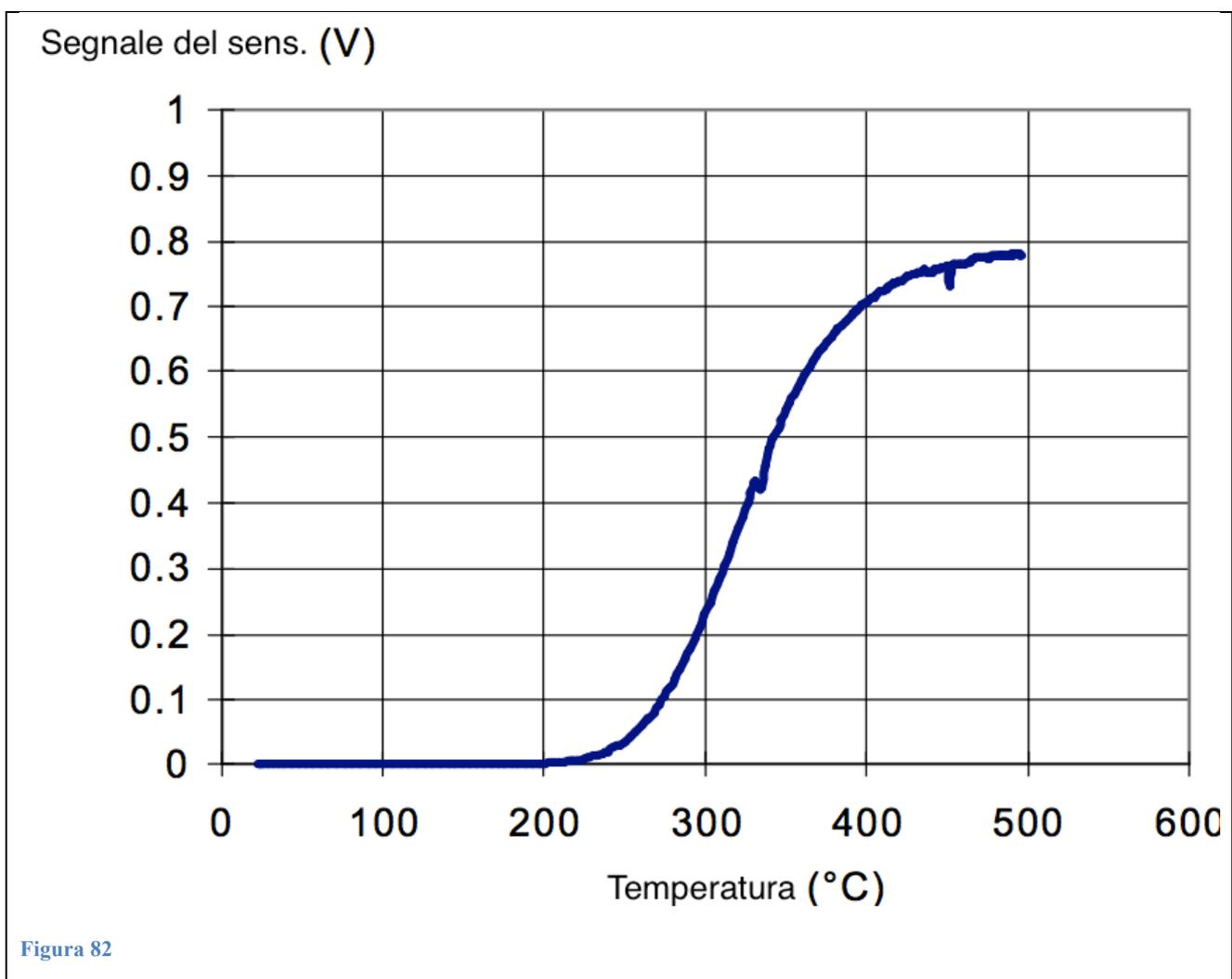


Figura 82

Si è così visto che il sensore nuovo ha bisogno di una temperatura di almeno 450°C prima di generare un segnale “alto” e costante tipico delle miscele ricche. Da queste considerazioni si è imposta una temperatura dell'apparecchiatura pari a 500°C.

I sensori sono stati testati come segue; si è definito un gas di scarico e si è

mantenuta costante la composizione di tutti gli elementi tranne che per la concentrazione di ossigeno, fatta variare da magra a grassa attraverso il valore stechiometrico. A ogni diversa concentrazione di ossigeno si sono confrontati i risultati misurati dal sensore con quelli misurati dall'apparecchiatura dei test (che va a formare l'asse delle ascisse).

La quantità di ossigeno presente all'aspirazione è stata misurata dai due sensori e dall'apparecchiatura attraverso la valvola di bypass che porta il gas direttamente all'analizzatore, inoltre a valle dei sensori vi è un catalizzatore al platino in grado di ridurre e ossidare le specie chimiche che vengono poi anch'esse analizzate.

Una volta misurata la quantità d'ossigeno, per correlarla a λ si è utilizzata la formula di Van de Brink:

Equazione 3.3-1

$$\lambda = \frac{[20.0 + O_2(\text{input}) - O_2(\lambda = 1, \text{stech.})]}{20}$$

dove $O_2(\text{input})$ è la concentrazione d'ossigeno espressa come % in volume all'aspirazione e $O_2(\lambda=1)$ è la concentrazione che si ha all'aspirazione per una miscela stechiometrica. Questo punto si calcola plottando la quantità di ossidanti in eccesso in funzione dell'ossigeno presente all'aspirazione. Il valore degli ossidanti in eccesso è dato dalla seguente formula:

Equazione 3.3-2

$$4 \cdot [O_2] + 2 \cdot [NO] - 2 \cdot [CO] - 2 \cdot [H_2] - (4x+y) \cdot [C_xH_y]$$

data dal bilancio dell'equazioni di ossidazione e riduzione degli elementi e dove [] indica la concentrazione dell'elemento al suo interno. L'intersezione di questa linea con l'asse delle ascisse (ponendo l'equazione 3.3-2 pari a zero) fornisce la concentrazione all'aspirazione per $\lambda=1$.

Il valore di λ così calcolato è poi plottato in funzione del voltaggio del sensore per ogni diversa composizione dei gas. S'introduce un parametro chiamato lambda shift ($\Delta\lambda$) definito come la differenza tra il "vero" valore stechiometrico ($\lambda=1.0000$) e il punto di commutazione grasso \leftarrow \rightarrow magro del sensore che corrisponde a un voltaggio di 0,4 V:

Equazione 3.3-3

$$\Delta\lambda = 1.0000 - \text{valore_di_}\lambda_di_commutazione(0.4V)$$

questo parametro si può utilizzare come indice dell'accuratezza del sensore, dove la perfezione è rappresentata dal valore $\Delta\lambda=0$ ed indica una

determinazione accurata del valore stechiometrico. Se $\Delta\lambda < 0$ allora si ha uno scostamento magro del valore stechiometrico, viceversa se $\Delta\lambda > 0$ si ha uno scostamento grasso del punto di switching. L'accuratezza dell'impianto su cui si sono eseguiti i test, espressa come $\Delta\lambda$, è di circa $\pm 0,0005$.

Si sono quindi eseguite due tipologie di esperimenti: il primo tipo è binario e serve a valutare la risposta del sensore a un singolo agente riducente soggetto a variazioni d'ossigeno. Gli esperimenti sono stati eseguiti utilizzando una matrice di gas di scarico con valori costanti: 500v.ppm NO, 6900v.ppm CO, 710v.ppm propano, 6,5 % in vol. di H₂O, e variando le concentrazioni di H₂ e toluene (che è scelto come rappresentante delle specie aromatiche). L'Ar è stato utilizzato come gas di trasporto inerte per rappresentare gli inerti presenti allo scarico (N₂ e CO₂). In alcuni esperimenti sono stati aggiunti anche 30v.ppm di SO₂.

Risultati dei test sulle specie inorganiche

In figura è mostrata la risposta statica dei due sensori (nuovo e usato), per 9500 ppm di CO, tipica concentrazione nei gas di scarico di un motore.

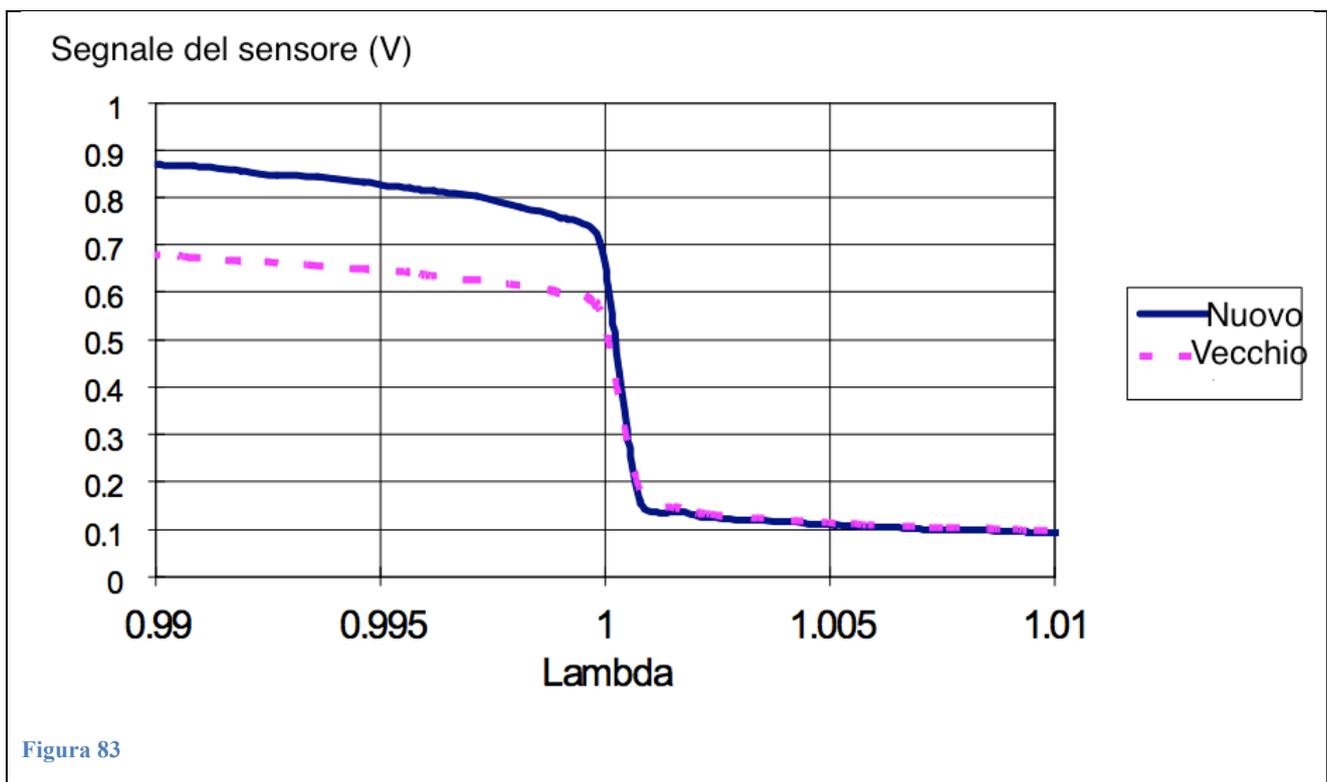


Figura 83

La commutazione del sensore da grasso a magro si ha in corrispondenza di un valore veramente vicino allo stechiometrico e quindi $\Delta\lambda$ assume un valore sufficientemente basso da affermare che questa concentrazione di CO non altera le prestazioni del sensore.

L'NO_x è un ossidante così come l'O₂ e per tale motivo non è possibile studiare l'effetto dei soli NO_x al variare della quantità d'ossigeno, si può invece effettuare la misurazione in presenza di soli NO con l'aggiunta di CO; il risultato ottenuto è del tutto simile a quello della figura sopra riportata. Da quanto osservato è dunque possibile affermare che gli NO e probabilmente anche gli NO₂ non influenzano le performance del sensore. Uno studio simile è stato compiuto utilizzando 30 ppm di SO₂/CO e un 6% in volume di H₂O/CO e in tutti i casi il punto di switching non è stato influenzato dalla presenza delle componenti inorganiche addizionali. Si può quindi affermare dallo studio dei modelli di gas che le specie inorganiche tipicamente presenti allo scarico non hanno effetti sulla risposta statica del sensore nuovo.

Va aggiunto che nella realtà l'andamento del rapporto A/F presenta delle forti oscillazioni, tali oscillazioni sono influenzate dall'SO₂ durante i transitori, mentre in questo genere di prove, statiche, non pare avere alcuna influenza.

Influenza dell'idrogeno

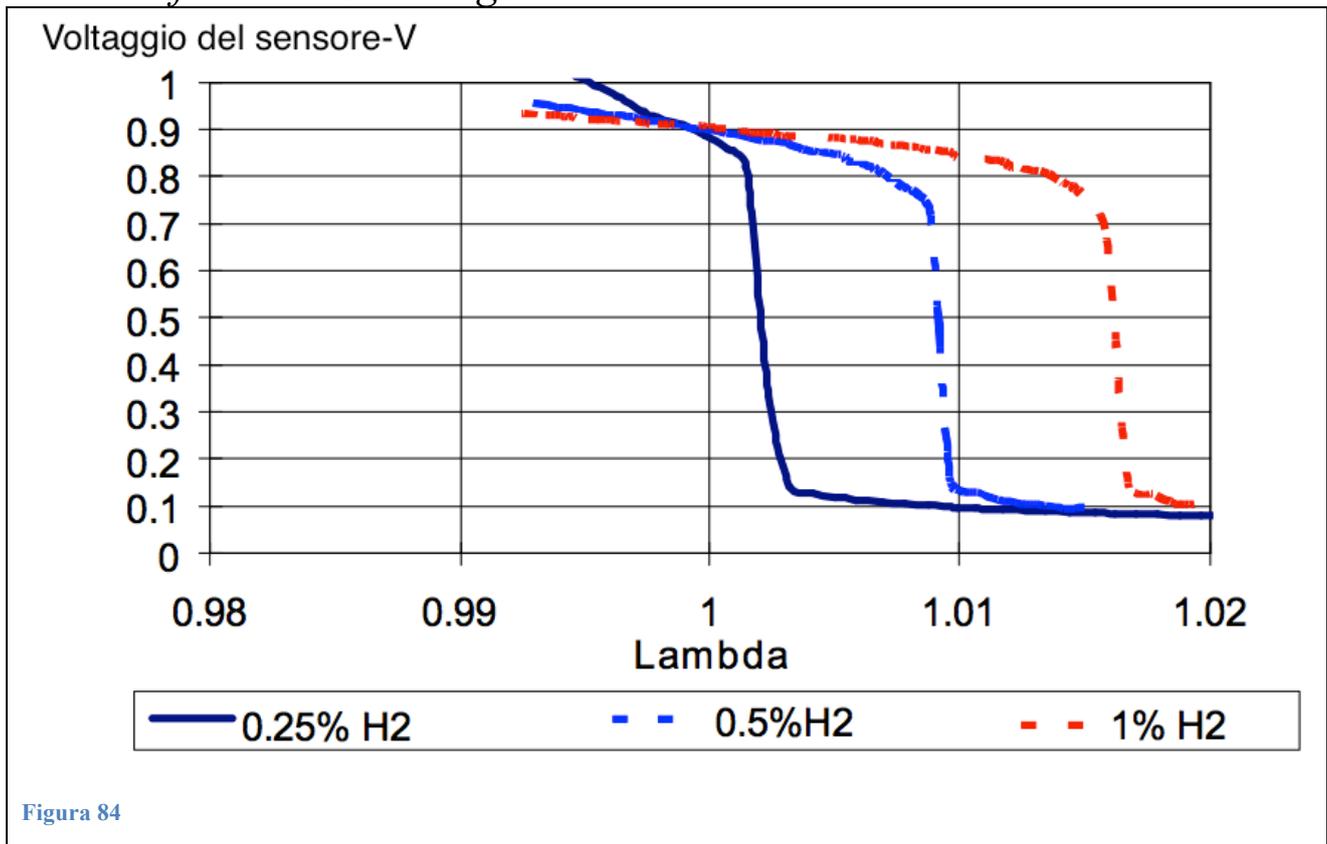


Figura 84

In fig. 84 si vede la risposta del sensore nuovo nell'esperimento a tre differenti concentrazioni di H₂. Il valore negativo di $\Delta\lambda$ indica che il punto di switching è spostato verso il campo magro, inoltre si può vedere che tale fenomeno

aumenta con l'aumentare della concentrazione d'idrogeno. Questa traslazione verso valori magri può essere spiegata come segue: al vero valore stechiometrico ($\lambda=1$), l'eccessiva concentrazione di H riducente, fa sì che gli elettrodi del sensore continuino a percepire una miscela grassa. Solo per miscele magre il sensore percepisce un egual bilanciamento tra riducenti H_2 e O_2 e di conseguenza commuta il voltaggio da alto a basso. Diviene quindi necessario incrementare l'eccesso di O_2 per controbilanciare gli effetti dell'idrogeno. Nelle miscele reali si ha una concentrazione d' H_2 tipicamente dello 0.2%vol, questo comporta un $\Delta\lambda \approx 1,003$.

Un esperimento simile è stato eseguito utilizzando il sensore datato, i risultati riportati in fig.85 comparano la risposta dei due sensori.

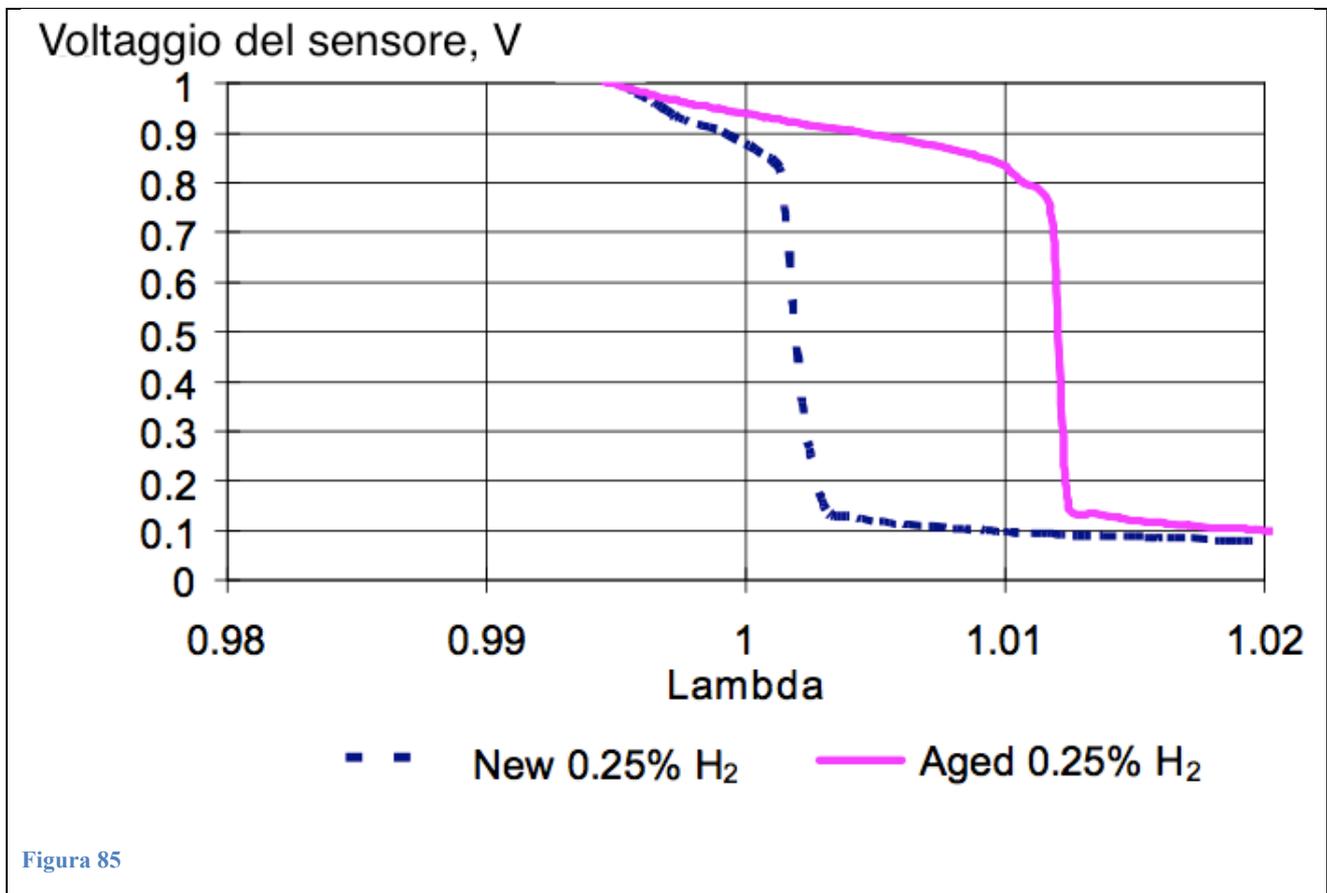
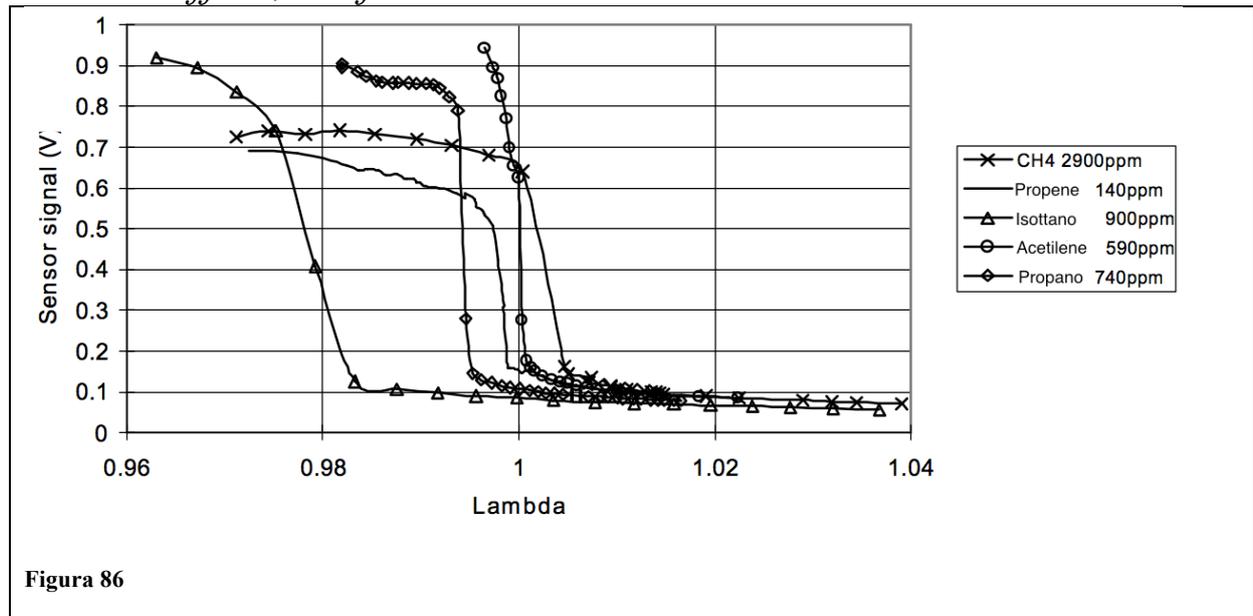


Figura 85

Si nota evidentemente la diversa influenza dell' H_2 nel sensore datato il quale presenta uno scostamento ben maggiore, lo scostamento funzione della concentrazione di ppm ha un andamento ragionevolmente lineare, è quindi possibile introdurre un *fattore di sensibilità*, SF calcolato come $\Delta\lambda/\text{ppm}$ di H_2 questo fattore vale 1.5×10^{-6} per il sensore nuovo e -5×10^{-6} per quello datato, dove il segno negativo indica che gli scostamenti sono magri.

Paraffine, Olefine e Acetileniche

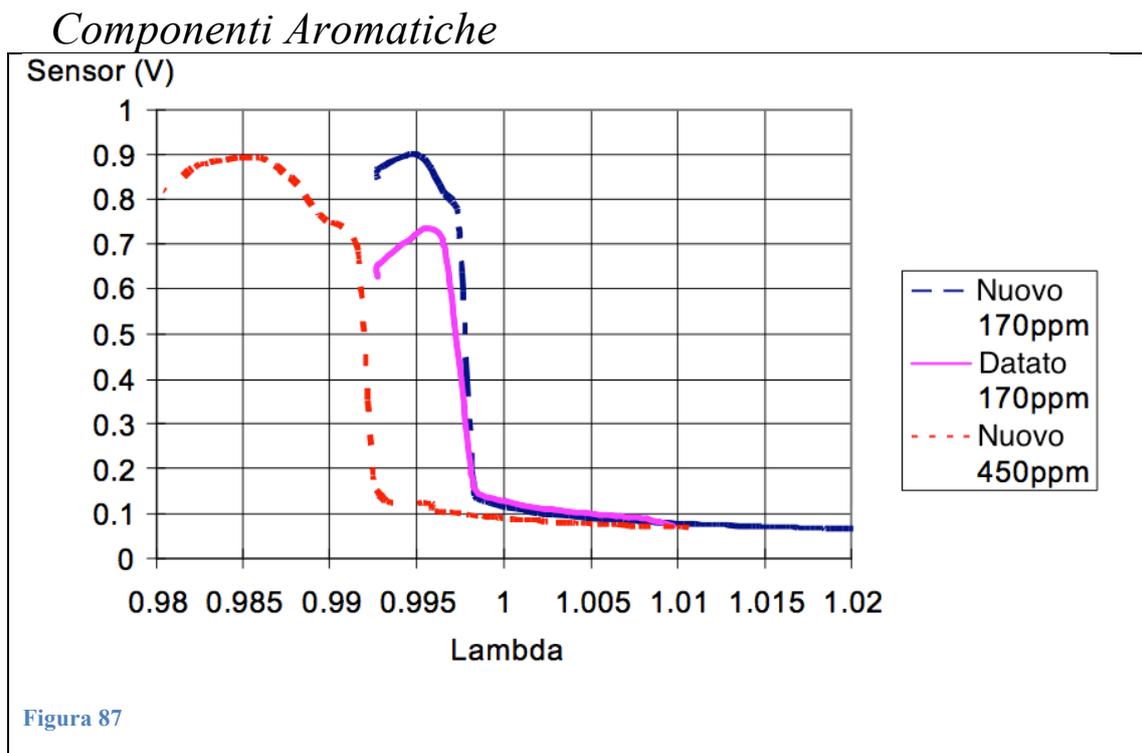


In figura sono riportate le risposte dei sensori ottenute usando varie concentrazioni di propene, propano, metano (CH₄), isottano e acetilene. Si sono poi calcolati i relativi fattori di sensibilità che descrivono l'andamento lineare dello scostamento di lambda, i valori ricavati sono poi stati inseriti nella tabella sottostante.

Tabella 4

Componente allo Scarico	Fattore di sensibilità riferito al nuovo sens. (SF) 10 ⁻⁶ /ppm	Fattore di sensibilità riferito al vecchio sens. (SF) 10 ⁻⁶ /ppm	Massa molecolare
H ²	-1.5	-5	2
acetilene, C ₂ H ₂	0		26
CO	-0.02	-0.02	28
NO	0		30
O ₂	0	0	32
metano, CH ₄	-0.8		16
propene C ₃ H ₆	4.7		42
propano, C ₃ H ₈	7.8		44
hexane, C ₆ H ₁₄	23.6		86
toluene, C ₆ H ₅ CH ₃	17.8	18	92
iso-octane, C ₈ H ₁₈	23.9		114
SO ₂	0		64
H ₂ O	0		18

Il metano e l'acetilene hanno una minor influenza, quasi nulla, sulle performance del sensore, tutti gli altri idrocarburi (HC) causano invece un rilevante scostamento del punto di switching. Fisicamente, i $\Delta\lambda$ ricchi possono essere interpretati come segue: il sensore percepisce un bilanciamento stechiometrico tra gli HC e l'O₂ quando la miscela è in realtà ancora ricca e commuta per valori di O₂ inferiori allo stechiometrico.



In fig. 87 è rappresentato l'output del sensore nuovo a diverse concentrazioni di toluene, gli scostamenti di $\Delta\lambda$ nel campo grasso si mantengono in linea con gli scostamenti visti per gli altri HC. Si è poi ripetuto il test anche sul sensore datato notando che gli scostamenti dalle misurazioni effettuate con quello nuovo sono minori rispetto ai test effettuati con l'idrogeno.

Osservazioni

Dai test così eseguiti si è potuto quantificare l'influenza sulle presentazioni del sensore, da parte di alcune componenti presenti nei gas di scarico. In particolare si sono notati gli effetti prodotti dall'idrogeno e dagli idrocarburi che producono scostamenti di segno opposto.

I riducenti possono essere classificati come segue:

Scostamenti magri rilevanti:

H₂

Scostamenti irrilevanti o assenti

CO, HC leggeri come propene, propano.

Scostamenti grassi rilevanti

HC pesanti (aromatici, isottano)

I gas riducenti confrontati con l'ossigeno hanno diversi tassi di permeabilità passando dallo strato poroso, ceramico, all'esterno del sensore all'elettrodo al Pt. Queste differenze offrono una spiegazione dei diversi SF determinati in questo lavoro.

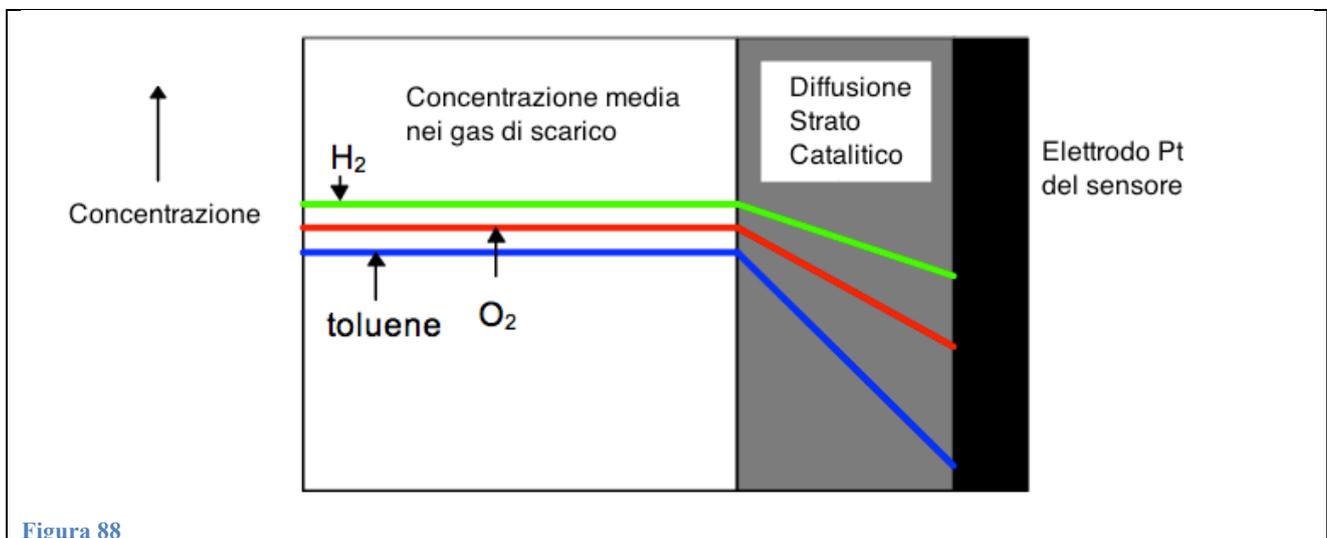


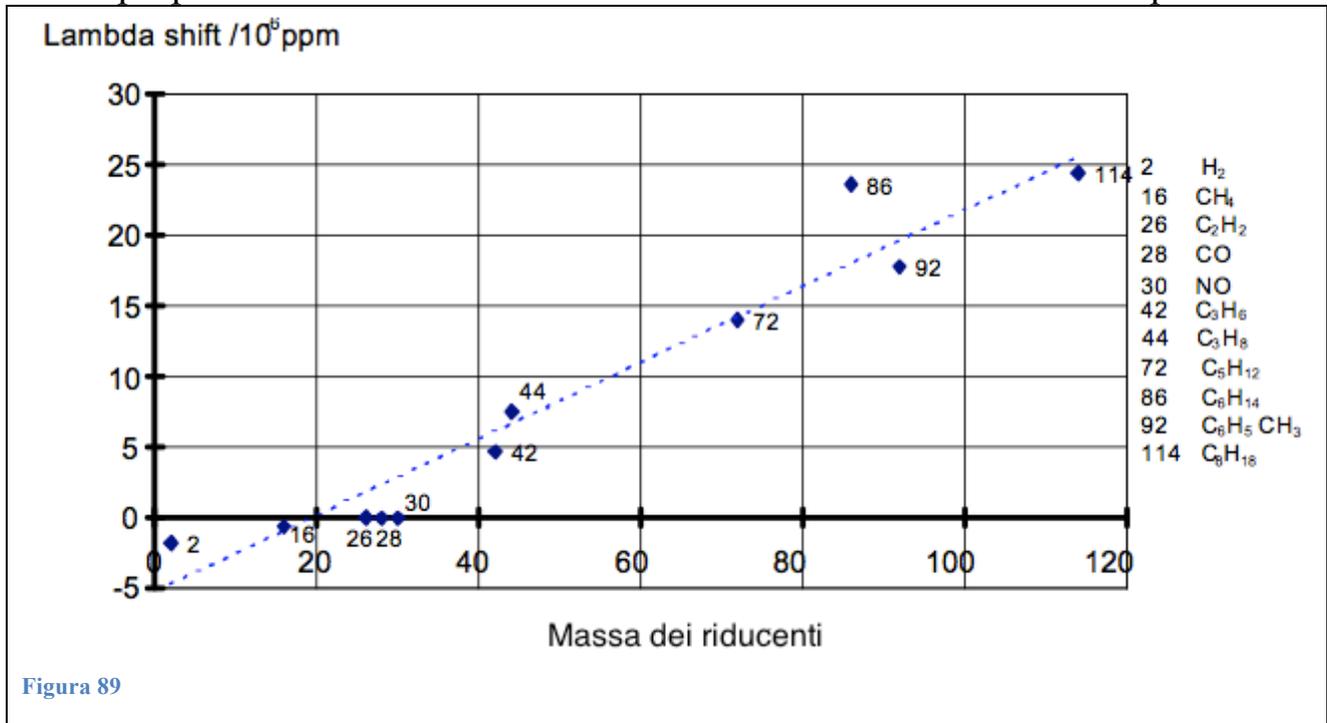
Figura 88

Nel grafico sopra riportato si vede la diversa permeabilità dello strato poroso ceramico prima di giungere all'elettrodo Pt, da parte di due elementi riducenti, toluene e H₂, paragonati con l'O₂. Questo strato poroso si ritiene che abbia anche una funzione catalitica, come evidenziato da osservazioni microscopiche di particelle di Pt disperse finemente nello strato poroso. La funzione catalitica dello strato ceramico riscaldato, combinato con l'elettrodo al Pt, facilita le reazioni dei gas ossidanti con quelli riducenti, aiutando a equilibrare le rispettive concentrazioni. L'efficienza di queste reazioni è però ostacolata dal diverso rapporto di diffusione delle due specie.

Considerando separatamente le diverse classi di riducenti:

- CO ha una massa veramente simile a quella dell'O₂ che si traduce in una egual rapidità di diffusione delle molecole. La CO vede così un $\Delta\lambda$ basso confrontato con quello degli idrocarburi.
- H₂ ha un rapporto di diffusione assai maggiore dell'O₂ ed è così necessario un eccesso di O₂ perché avvenga lo switching che si traduce in uno scostamento magro.

- HC pesanti, si diffondono veramente lentamente rispetto l'O₂ e il sensore percepisce così un bilanciamento stechiometrico solo quando si ha un eccesso di HC ovvero per miscele ancora grasse. Questo provoca uno scostamento grosso del punto di switching, esso tende ad aumentare con l'incremento del peso molecolare degli idrocarburi (rispetto all'ossigeno) proporzionale alla dimensione e alla velocità di diffusione delle particelle:



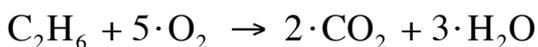
come si vede lo scostamento è nullo per le molecole aventi approssimativamente il peso molecolare dell'ossigeno, ovvero in corrispondenza di 32 u.m.a.

Le variazioni di $\Delta\lambda$ per i vari idrocarburi sono dovute alla diversa quantità di ossigeno richiesta per l'ossidazione:

Equazione 3.3-4



Equazione 3.3-5



La C₂H₆ richiede 5 molecole di O₂ per completare la combustione mentre la CO ne richiede solo ½. Quindi anche se la massa di C₂H₆ è pari a 30 è richiesta un'elevata quantità di ossigeno che si traduce in un SF positivo ($\Delta\lambda$ grasso). L'influenza della diversa quantità di ossigeno richiesta è visibile in fig. 89, tuttavia poiché prevale l'effetto del rapporto di diffusione si ha comunque un andamento approssimativamente lineare fra massa → dimensioni della molecola → rapporto di diffusione → $\Delta\lambda$.

Studio approfondito dell'effetto del toluene e dell'idrogeno

Se si assume che lo scostamento di lambda netto totale, $\Delta\lambda(\text{totale})$, sia la somma lineare dei contributi di $\Delta\lambda$ di tutte le componenti si possono prendere in esame ognuna delle singole specie ad esempio l' H_2 , determinare la rispettiva concentrazione $[\text{H}_2]$ e SF a titolo d'esempio chiamato "A" e quindi:

Equazione 3.3-6

$$\Delta\lambda(\text{total}) = \Delta\lambda(\text{H}_2) + \Delta\lambda(\text{toluene}) + \Delta\lambda(\text{propane}) + \dots$$

e quindi

Equazione 3.3-7

$$\Delta\lambda(\text{total}) = -A[\text{H}_2] + B[\text{toluene}] + C[\text{propane}] + \dots$$

dove gli SF A, B, C ecc sono tutti numeri definiti a valori positivi e il segno negativo posto davanti indica uno scostamento di lambda magro, mentre il positivo uno grasso. Questa relazione assume che i contributi individuali siano indipendenti l'uno dall'altro. Questa è una considerazione importante in vista delle varie reazioni, come ad esempio:

- la water gas shift
- la steam reforming: reazione attraverso la quale si è in grado di produrre idrogeno dagli idrocarburi che vengono scomposti rispettivamente in H_2 e C_x

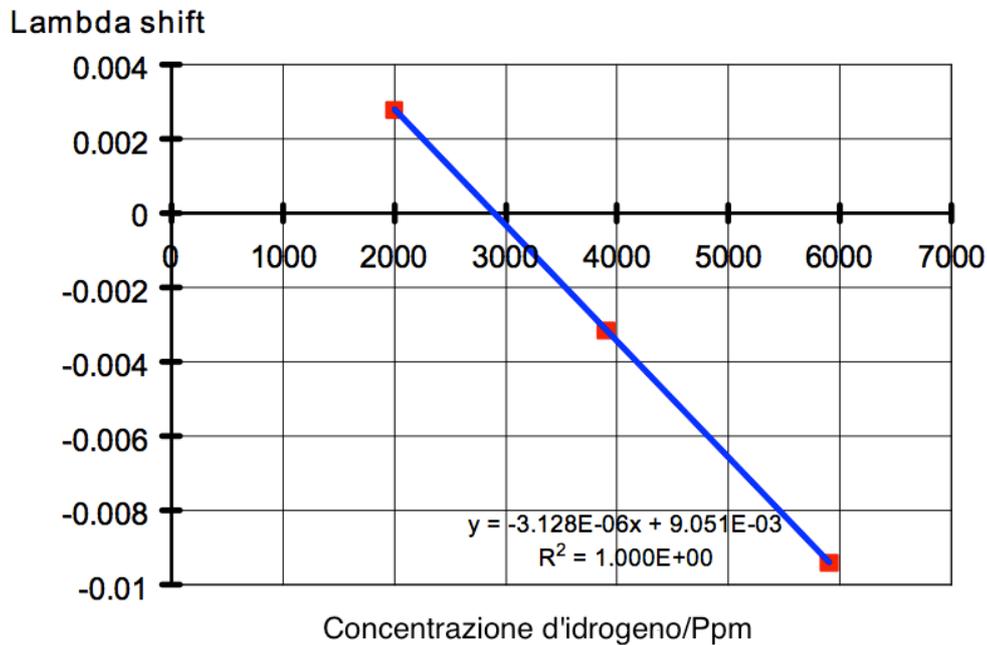
esse possono avvenire nello strato ceramico catalitico andando a modificare la concentrazione dei riducenti.

Questa ipotesi di una dipendenza lineare in aggiunta agli scostamenti di lambda è stata testata per esperimenti che vanno a simulare i gas di scarico contenenti varie concentrazioni di H_2 e toluene in una matrice avente concentrazioni costanti di CO, NO, H_2O .

Le variazioni di $\Delta\lambda(\text{totale})$ in funzione della concentrazione d'idrogeno, $[\text{H}_2]$, mantenendo costante la quantità di toluene fissata a 260 ppm sono riportate in fig. 90

Dipendenza di $\Delta\lambda$ (totale) dall'idrogeno con la seguente matrice di gas: 500 ppm di NO, 6900 ppm di CO, 710 ppm di propano, 6,5 % vol di H₂O e 260 ppm di toluene.

Figura 90



Plottando i risultati ottenuti e interpolando i punti si nota una correlazione lineare, che resta fedele all'equazione 3.3-7 ipotizzata, e un SF= 3.1×10^{-6} /ppm calcolato dalla pendenza della retta. Si è poi eseguito un test analogo in cui si è mantenuta costante la concentrazione d'idrogeno, [H]=1900 variando quella di toluene e plottando i dati nel seguente grafico (fig.91):

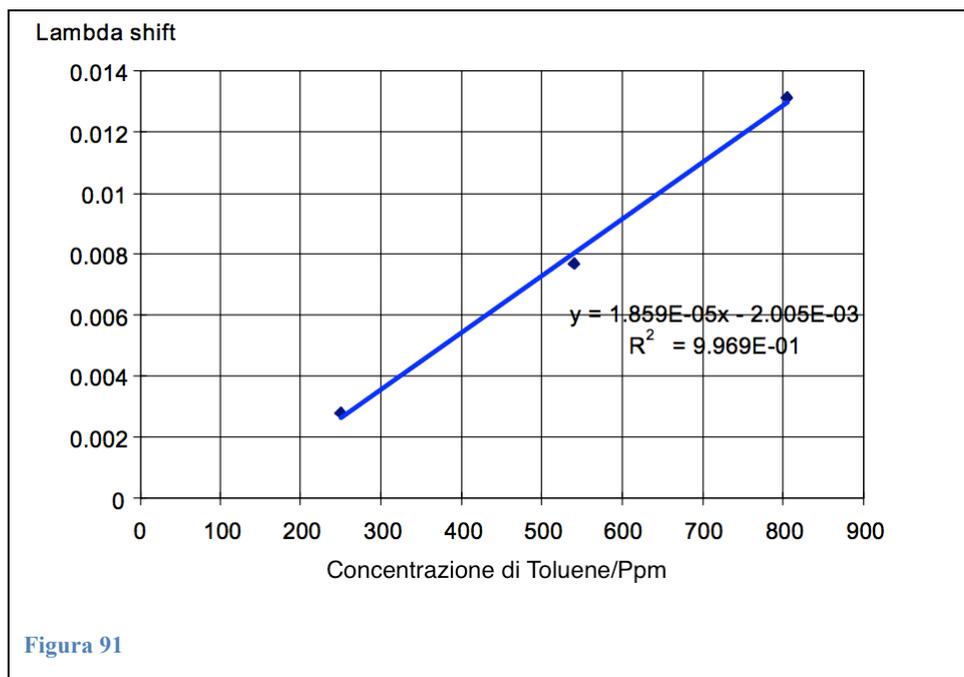


Figura 91

Gli SF così ottenuti per i due test sono riportati in tabella:

Tabella 5

Componenti simulate nei gas di scarico	SF del sensore nuovo 10^{-6} / ppm	SF del sensore vecchio 10^{-6} / ppm	SF del sensore nuovo usando un metodo approssimativo 10^{-6} / ppm
H ₂	-3.1	-4.4	-3.1
Toluene	17.1	18.8	18.6
Ratio X	5.5	4.3	-

Una problematica di questo tipo di test è la difficoltà nel mantenere costante il livello di toluene a ogni esperimento, esso è mediamente pari a 260 ppm ma varia all'interno del seguente range: 250÷ 280 ppm.

Un metodo più accurato per interpretare contemporaneamente tutti i dati è di apportare delle modifiche all'equazione 3.3-7:

Equazione 3.3-8

$$\Delta\lambda(\text{total}) = B \cdot [\text{toluene}] - A \cdot [\text{H}_2] + k, \quad \text{dove } k = \text{costante}$$

Equazione 3.3-9

$$\Delta\lambda(\text{total}) = A \cdot \{X[\text{toluene}] - [\text{H}_2]\} + k, \quad \text{dove } X = B/A$$

Plottando il $\Delta\lambda(\text{total})$ determinato sperimentalmente come funzione di $\{X[\text{toluene}] - [\text{H}_2]\}$ e con X ottimizzato per adattarsi al meglio ai dati raccolti, si raccolgono i fattori di sensibilità A, direttamente dall'inclinazione (coefficiente angolare della retta), e B dai valori di A e X. Uno dei prerequisiti per questo tipo di analisi è che la matrice sia ben definita per tutto il range di variazione di $[\text{H}_2]$ e $[\text{toluene}]$.

In Fig.92 si vedono i risultati del nuovo sensore con X ottimizzato a un valore di 5.5 che corrisponde a un indice di correlazione di Pearson $R^2=0.99$ ($0 \leq R^2 \leq 1$ e $R^2=1$ indica una correlazione lineare perfetta).

L'intersezione con l'asse y (+0,0045) corrisponde al $\Delta\lambda$ netto dovuto alla matrice di gas a concentrazioni costanti, ed è attribuito principalmente al propano contenuto al suo interno.

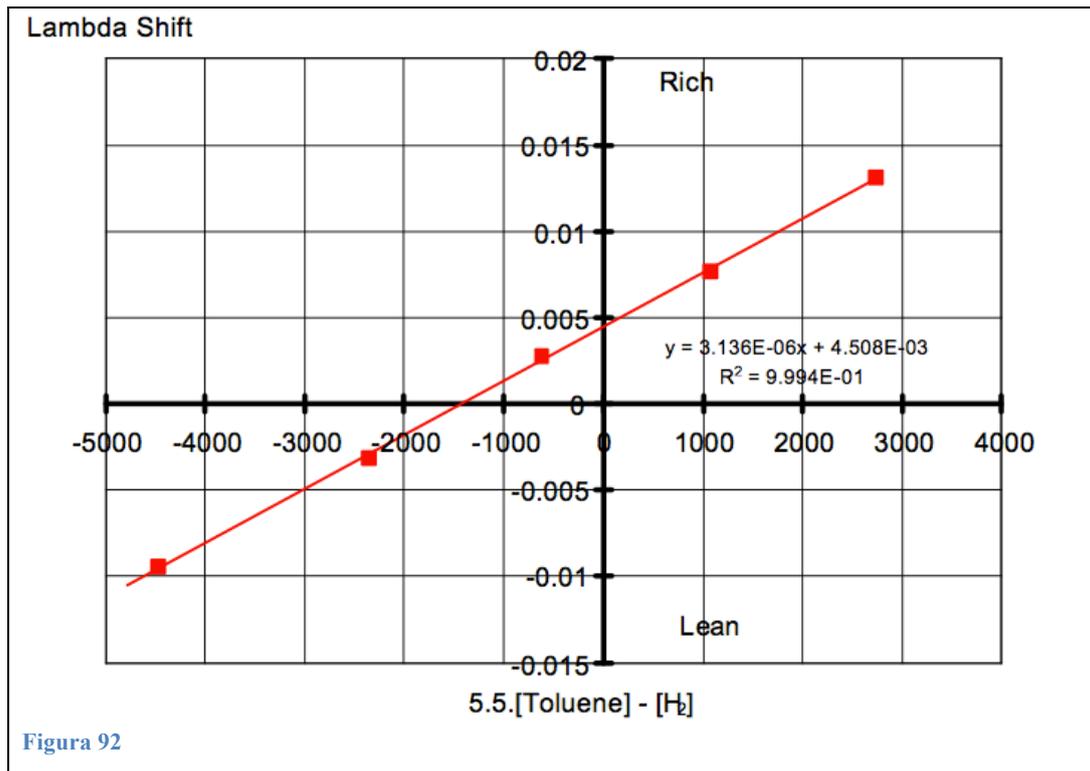


Figura 92

La fig.92 fornisce valori più accurati di $A=3.1 \times 10^{-6}/\text{ppm}$ per l'idrogeno e $B=17.2 \times 10^{-6}/\text{ppm}$ per il toluene. Questi valori possono essere ragionevolmente comparati con quelli derivati dagli studi binari approssimati (vedi tabella 4 e 5) sebbene per l'H₂ il valore sia leggermente più elevato.

Uno studio analogo è stato eseguito sul sensore datato:

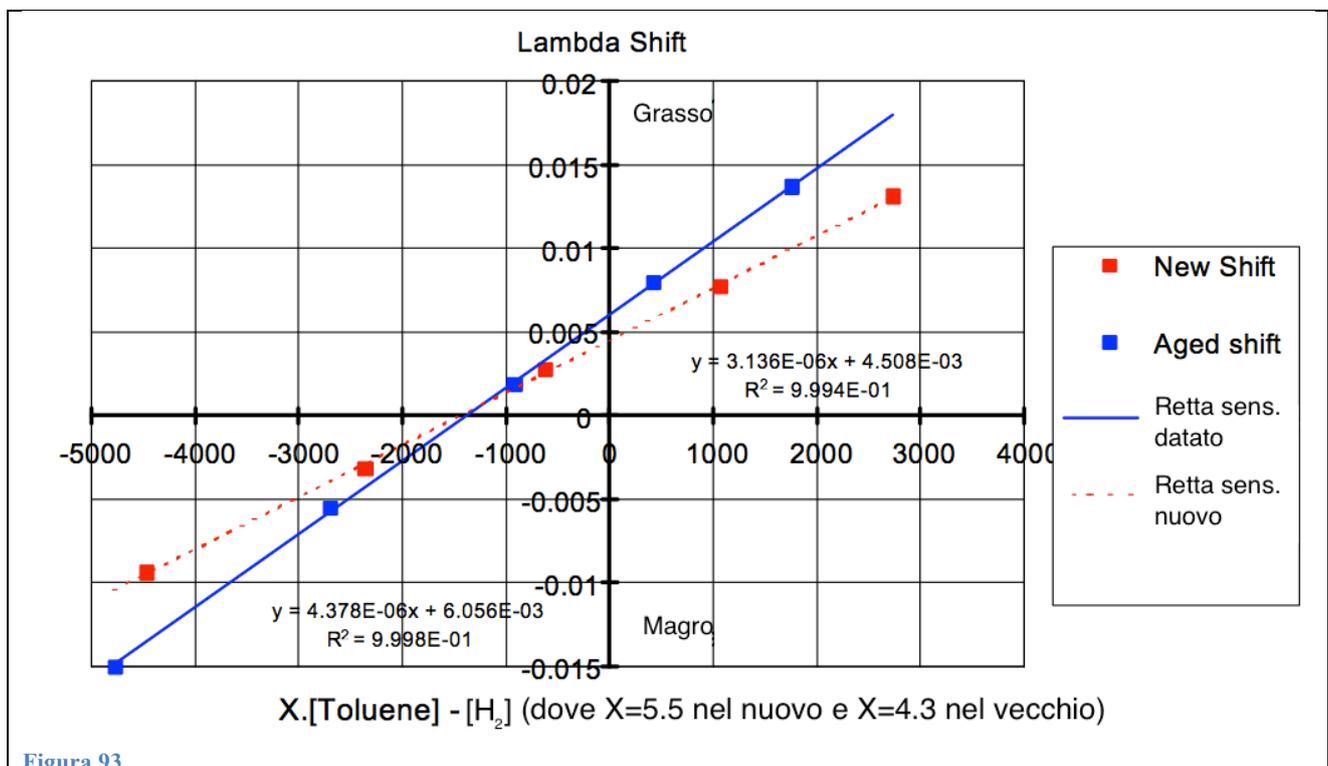


Figura 93

In questo caso si ha un valore di $A=4.4 \times 10^{-6}/\text{ppm}$ e di $B=18.8=10^{-6}/\text{ppm}$; quindi l'SF dell'idrogeno incrementa del 50% c.ca nel sensore datato, mentre per il toluene si ha solo un lieve incremento.

Al fine di verificare il comportamento del sensore a contatto con SO_2 anche in questo tipo di studio si sono aggiunti 30 ppm di SO_2 variando le concentrazioni dei gas di scarico simulati. In tutti i casi, la presenza di questa molecola non ha avuto ripercussioni sul punto di commutazione del sensore. Si può affermare che l' SO_2 apparentemente non ha effetti sul comportamento statico del sensore, così come risultato anche dai test binari fatti in precedenza in cui variavamo la quantità di O_2 .

Osservazioni

Lo studio dei gas di scarico utilizzando l'equazione 3.3-7 offre una valida descrizione del $\Delta\lambda(\text{totale})$ causato dalle specie chimiche presenti allo scarico. I singoli contributi possono quindi essere sommati indipendentemente l'uno dall'altro. Inoltre, lo studio basato sulla simulazione dei gas di scarico risulta coerente coi risultati ottenuti dallo studio binario fatto in precedenza, sebbene si abbia un SF significativamente maggiore per l'idrogeno. Nonostante ciò i risultati possono comunque essere ritenuti validi.

Si può quindi affermare che le diverse composizioni dei gas di scarico, derivanti dalle diverse composizioni del carburante iniettato, o dalla diversa calibrazione del motore, possono alterare il comportamento del sensore atto al controllo della miscela e di conseguenza indurre la centralina a intervenire in maniera errata sulla gestione dell'iniezione, con conseguenze negative sulle emissioni allo scarico.

Problematiche riscontrate da questo genere di test

Correlare gli errori del sensore, causati dalle specie chimiche presenti allo scarico, con le emissioni dei veicoli presenta alcune problematiche:

- L'output del sensore non perde di affidabilità solamente per via della composizione dei gas allo scarico, come è meglio descritto nei capitoli Analisi dei transitori stechiometrici del rapporto A/F, Problematiche durante i transitori d'accensione: confronto UEGO-FFID e Ripercussioni dell'avvelenamento dovuto all'età di una sonda λ occorre dunque non sovrapporre gli effetti delle misurazioni provocate da queste condizioni di funzionamento.
- Nella realtà il valore A/F oscilla, questo significa che il comportamento transitorio del sensore va preso comunque in considerazione così come le variazioni di composizione dei gas causata da queste oscillazioni.

- La temperatura e il flusso dei gas di scarico varia e questo può influenzare il valore del fattore di sensibilità, determinato dal modello studiato.
- Un'altra problematica è legata alle difficoltà legate alla misurazione della concentrazione d'idrogeno $[H_2]$ allo scarico. Per le quali si sono compiute misurazioni sperimentali.

In aggiunta le misurazioni di $[H_2]$ sono state calcolate utilizzando la seguente equazione riguardante la formazione di acqua 3.3.10:

Equazione 3.3-10

$$K = \frac{[H_2] \cdot [CO_2]}{[H_2O] \cdot [CO]}, \text{ dove } K = \text{costante di equilibrio}$$

dove si assume che una volta che il gas di scarico lascia la camera e arriva al collettore le reazioni e quindi le concentrazioni si congelino, quindi $[H_2]$ può essere calcolato noti K , $[CO]$, $[CO_2]$ e $[H_2O]$.

Nonostante queste difficoltà di varia natura, utilizzando un carburante con una composizione ben definita, la matrice di gas generata può essere almeno in parte determinata. Per verificare gli effetti prodotti dalle misurazioni errate si deve far sì che all'uscita della camera di combustione vi sia una variazione notevole di concentrazioni di H_2 e HC pesanti. Una matrice appropriata deve avere un contenuto di aromatici che vari dal 25-35 al 45% in volume, pur mantenendo la stessa volatilità del carburante. Matrici di gas di questo tipo presentano però il così detto effetto "NOx/Aromatics" in cui l'errore del sensore gioca un ruolo rilevante e può spiegare tale fenomeno.

Effetto "NOx/Aromatics"

L'incremento di specie aromatiche nel combustibile provoca un notevole incremento di emissioni di NOx durante le partenze a freddo causate dall'elevata temperatura in gioco. Tuttavia i catalizzatori di molte auto a caldo vedono l'effetto opposto, riducendo la quantità di questo inquinante per questo tipo di combustibile. Il fenomeno, ben visibile durante il ciclo di prova dal confronto fra le emissioni a freddo e quelle a caldo, è stato attribuito alla migliore efficienza del catalizzatore in atmosfere ricche di specie aromatiche.

In una passata conferenza a Gothenburg tenuta da McArragher avente come titolo "NOx emissions from catalyst cars: the effect of gasoline aromatic content", datata 13-15 maggio 1997, si sono discussi due meccanismi al fine di chiarirne gli effetti. Il primo riguarda il contributo delle particelle d'idrocarburi, in particolare del metano, sulle emissioni di NOx mentre il secondo è inerente agli "inganni" del sensore.

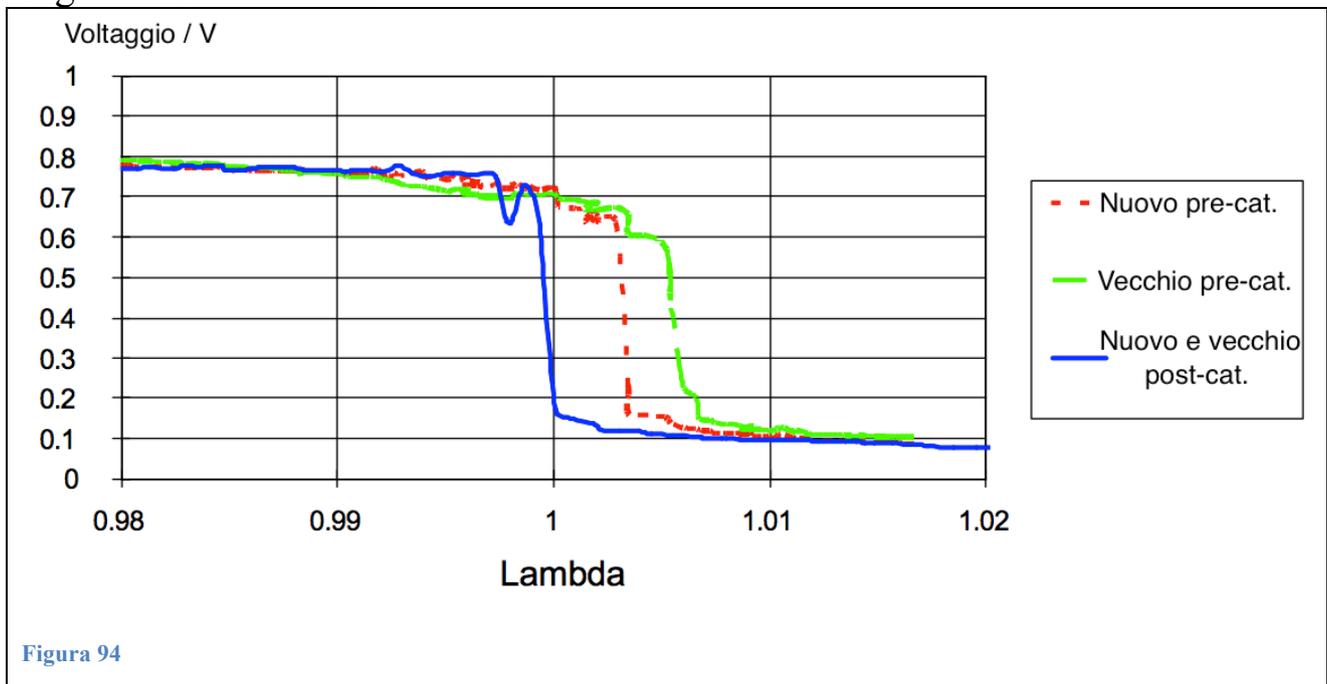
Per quanto riguarda lo studio effettuato su combustibile metano (CH_4) si è osservato che esso comportandosi come un riducente allo scarico è in grado di assorbire ossigeno dagli NO_x , tuttavia questo fenomeno non basta per spiegare l'abbassamento delle emissioni dal 45% al 25% in volume che si ha nei combustibili aromatici.

Il secondo meccanismo, complementare al primo, fornisce una spiegazione basandosi sull'effetto delle specie aromatiche sul sensore, esse spostano il punto di commutazione verso miscele grasse allora la centralina interviene smagrendo la miscela e riducendo l'efficienza del catalizzatore, con ripercussioni sulle emissioni di NO_x .

Benefici apportati alla misurazione tramite l'impiego di un secondo sensore.

Com'è già stato visto nel capitolo [2.2.3 SONDE "RACING"](#) l'impiego di due sensori lambda pre e post catalizzatore, per un sistema di controllo On-Board (OBD2) ad anello chiuso, è in grado di fornire notevoli miglioramenti sul controllo delle emissioni inquinanti. Quello che si vedrà ora è però il miglioramento specifico apportato all'inganno del sensore dovuto alle varie specie chimiche presenti allo scarico.

Ponendo il sensore a valle del TWC in un test binario H_2/O_2 si è ottenuta la seguente caratteristica:



Si vede chiaramente che a valle del catalizzatore non si ha alcuno scostamento magro così come per i due sensori a monte, questo è dovuto all'efficiente ossidazione degli H_2 nel catalizzatore. Si può quindi affermare che l'influenza

dei gas di scarico presenti all'uscita della camera di combustione, su di un sensore posto a valle del catalizzatore, è ridotta dall'elevato rapporto di conversione di quest'ultimo. Si può quindi utilizzare il sensore a valle per un controllo in feedback della miscela, evitando così le problematiche viste.

3.4 Ripercussioni dell'avvelenamento dovuto all'età di una sonda λ

BIBLIOGRAFIA indice 10.

Le sonde troppo vecchie forniscono un'ampiezza di tensione inferiore alla reale e con tempi di risposta più elevati, tanto da arrivare a fornire un segnale errato o troppo lento. Oltre al normale invecchiamento, naturalmente, le cause di un segnale errato possono essere diverse ma ricavabili dai dati raccolti i quali riescono a fornire informazioni sulla causa del difetto.

Se la centralina non riceve il segnale della sonda lambda o se questo è errato, il controllo della miscela è effettuato senza l'utilizzo del segnale della sonda. Non potendo così stabilire la composizione della miscela bruciata in quel momento, la centralina ordina di passare al funzionamento d'emergenza e arricchisce automaticamente la miscela, in questo modo si garantisce la potenza richiesta e si proteggono i componenti dal surriscaldamento. Questo tipo di funzionamento ha però anche delle conseguenze negative: da una parte il consumo della vettura aumenta sensibilmente (in media fino al 15%, molto di più nel traffico urbano) e il catalizzatore, inoltre, non è più in grado di lavorare correttamente introducendo nell'ambiente una maggiore quantità di sostanze inquinanti.

3.4.1 Misurazione sperimentale degli effetti dell'avvelenamento di un sensore λ

Per un'analisi il più corretta degli effetti dell'avvelenamento sul sistema di controllo, da parte dei gas di scarico che lo lambiscono durante il funzionamento, si separano gli effetti sulle due componenti principali:

- catalizzatore TWC
- sensore λ (su cui ci concentriamo in questo studio)

Un parametro che definisce le prestazioni di un sensore λ è la commutabilità, tale parametro esprime la capacità del sensore di riconoscere le variazioni di composizione della miscela. Per valutare la variazione di questo parametro per l'esperimento sono utilizzate sei sonde, in precedenza montate su sei taxi per un chilometraggio pari a 100.000 km.

Il primo step è stato esaminare l'invecchiamento delle sonde su un apposito impianto sviluppato in laboratorio su cui effettuare i test. In tale impianto è possibile collocare fino a due sonde λ , le quali sono immerse in un'atmosfera composta di due gas:

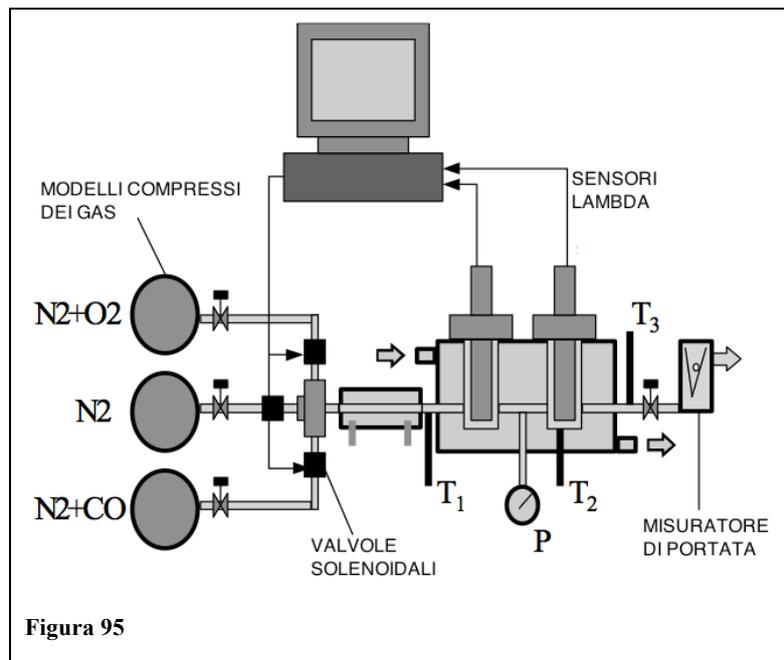
- $N_2 + O_2$
- $N_2 + CO$

per la pulizia dei condotti si usa invece dell' N_2 . Per riprodurre la temperatura dei gas di scarico si sono utilizzati due apparati di riscaldamento:

- Uno per i sensori composto da olio a 250 C che fluisce in un apposito spazio dell'apparecchiatura.
- Il secondo sistema invece è per la linea di distribuzione dei gas composto da un filo che per effetto joule grazie a una resistenza trasforma l'energia elettrica in calore.

Nell'apparecchiatura sono disposte tre termocoppie per mantenere sotto controllo la temperatura, un parametro che influenza fortemente le prestazioni del sensore. La prima T_1 è collocata prima dei sensori, la seconda T_2 si trova in corrispondenza del secondo sensore e infine la terza è collocata dopo i sensori.

Infine tra i due sensori λ , al fine di mantenere una pressione approssimativa di 50 kPa, è collocato un Manometro.



Le prove di commutabilità sono state eseguite a 300 C (riferendosi alla T_1), montando un sensore datato nel primo alloggiamento (partendo da sx) e uno nuovo nel secondo, usato come riferimento.

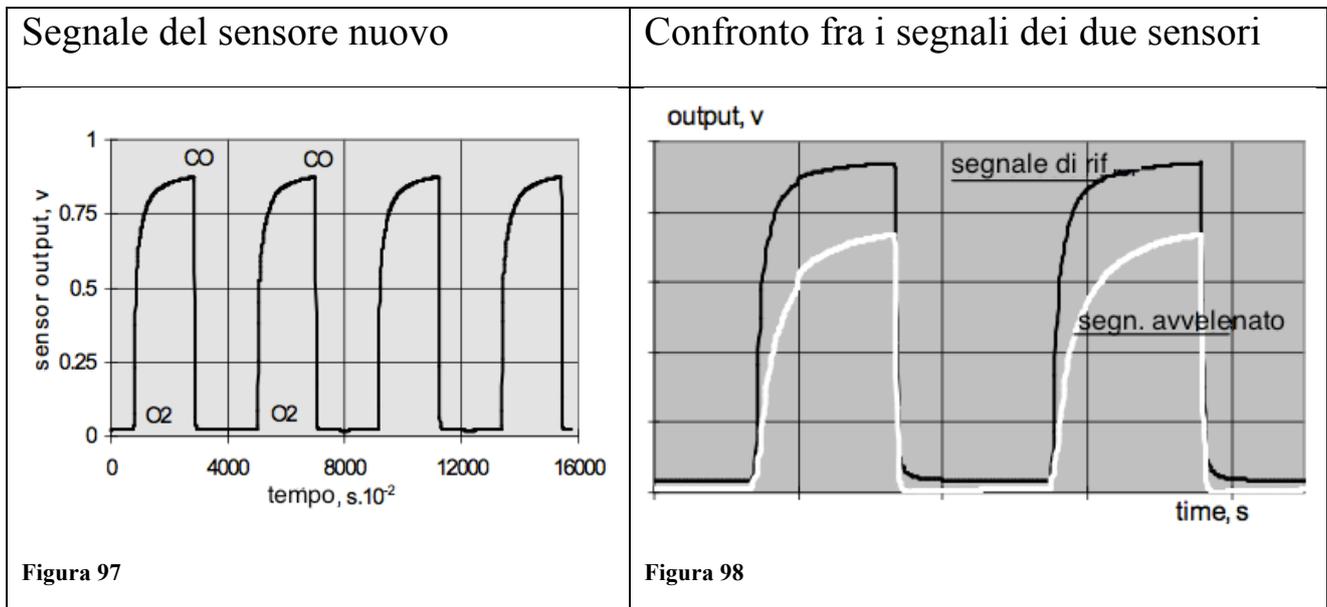
Per misurare la commutabilità, sono stati usati i due modelli di gas contenenti N_2+CO e N_2+O_2 a tre diverse concentrazioni:

Finestra di escursione	O ₂ , ppm	CO, ppm
Stretta	5122	4982
Media	1548	1042
Ampia	812	357

Figura 96

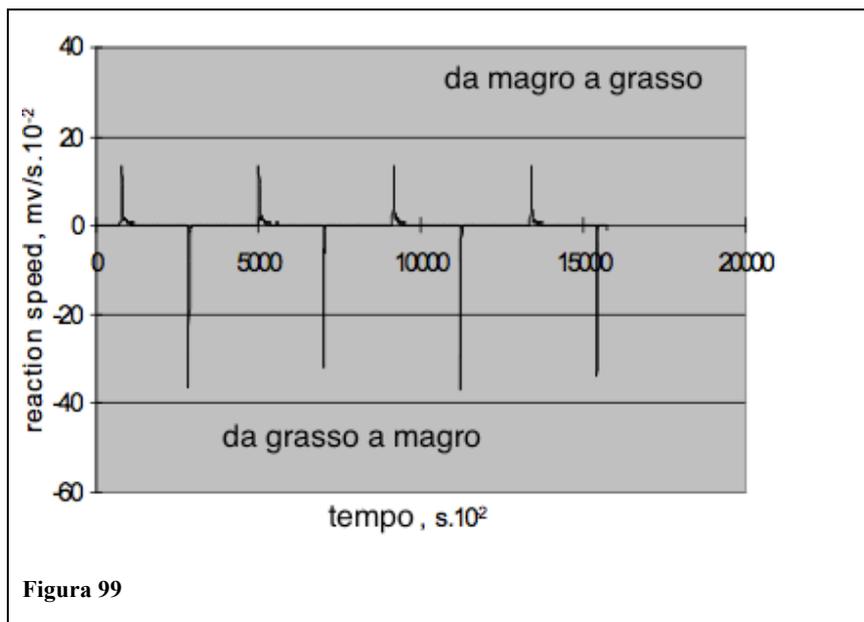
Il modello di gas così realizzato crea tre finestre di commutazione all'interno delle quali i due gas si alternano ogni 20 secondi così da ottenere una serie di commutazioni dei due sensori.

L'acquisizione dei dati è stata fatta alla stessa frequenza con cui le sonde si aggiornano (100 Hz). Assieme all'acquisizione degli output generati dalle due sonde si sono registrati anche flusso, pressione e temperatura dei gas.



Un altro metodo per valutare la commutabilità è calcolare il massimo della derivata dell'output del segnale, questo parametro esprime la velocità di reazione del sensore a cambiamenti nella composizione dei gas.

L'indice di commutabilità del sensore lambda è stato calcolato usando solo la velocità di reazione da O₂ a CO (da magro a grasso) poiché da CO a O₂, sebbene i valori siano più elevati, presentano una scarsa ripetibilità.

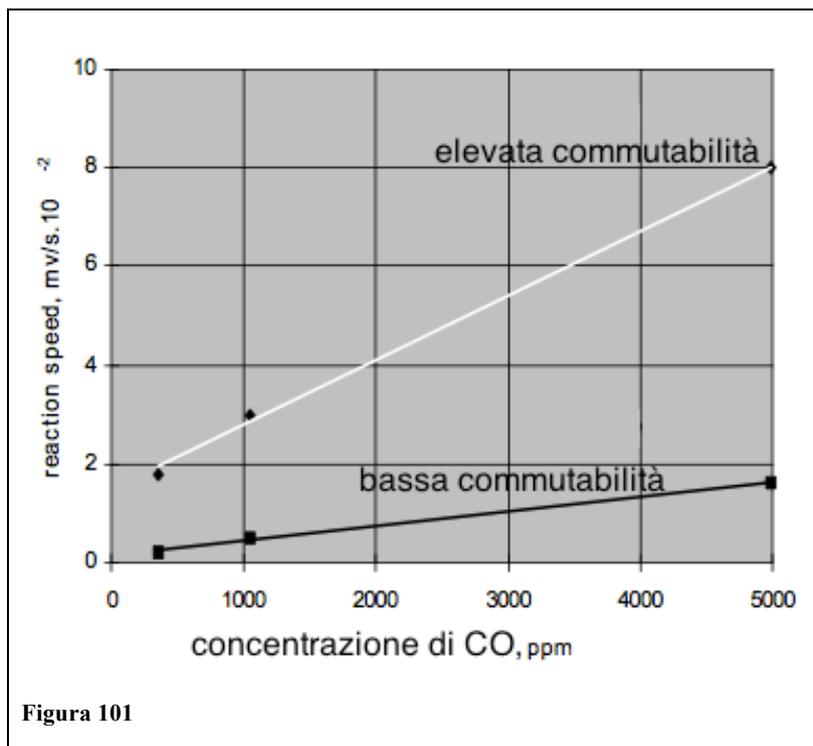


Una volta acquisiti i dati dal test appena descritto, per le sei sonde datate più quella di riferimento (N1) si sono tabulati i risultati, evidenziando la differente velocità di reazione in funzione della concentrazione di CO in ppm.

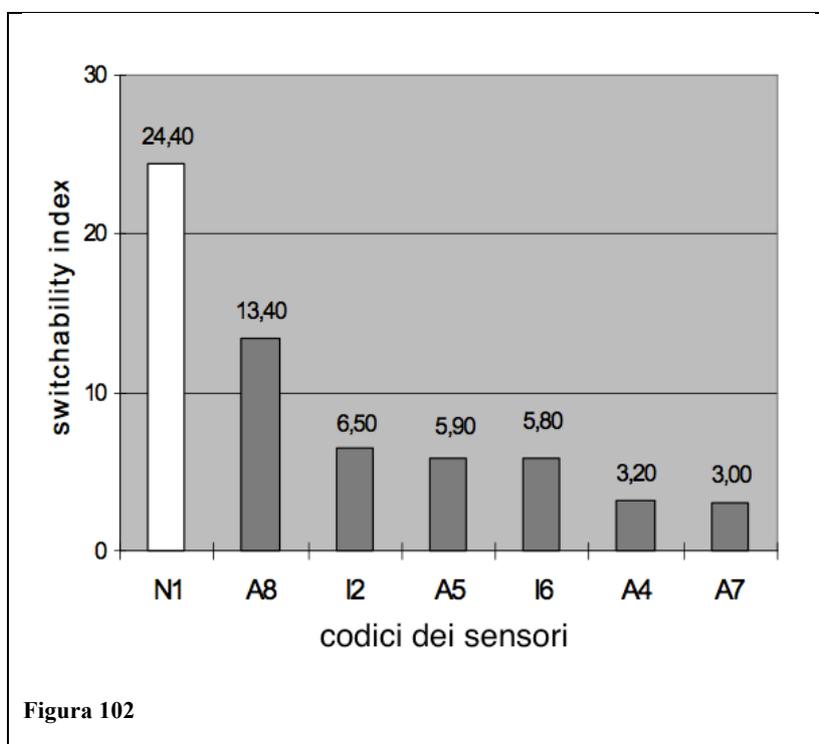
Codice dei Sensori	velocità di reazione mv/s. 10 ⁻²			parametri di commutabilità	
	finestra di escursione CO ppm (*)			Switchability Index (slope)	R ²
	Wide 4982	Medium 1042	Narrow 357		
N1	20	12	8	24.4	0.96
A8	8	3	1.8	13.4	0.99
I2	4	1.6	1.0	6.5	0.99
A5	3.5	1.4	0.7	5.9	0.98
I6	3.4	1.5	0.5	5.8	0.95
A4	2	1.0	0.4	3.2	0.93
A7	1.6	0.5	0.2	3.0	0.99

Figura 100

Graficando i dati in tabella si apprezza maggiormente lo scostamento, in termini di velocità di reazione, delle sonde datate da quella di riferimento al variare della finestra di escursione.



L'indice di commutabilità (switchability index) per la sonda nuova (N1), come ci si aspettava, è notevolmente più elevato delle altre sonde datate, mentre le variazioni degli indici sono provocate, almeno in parte, dai diversi tipi di oli e di gasolio impiegati.

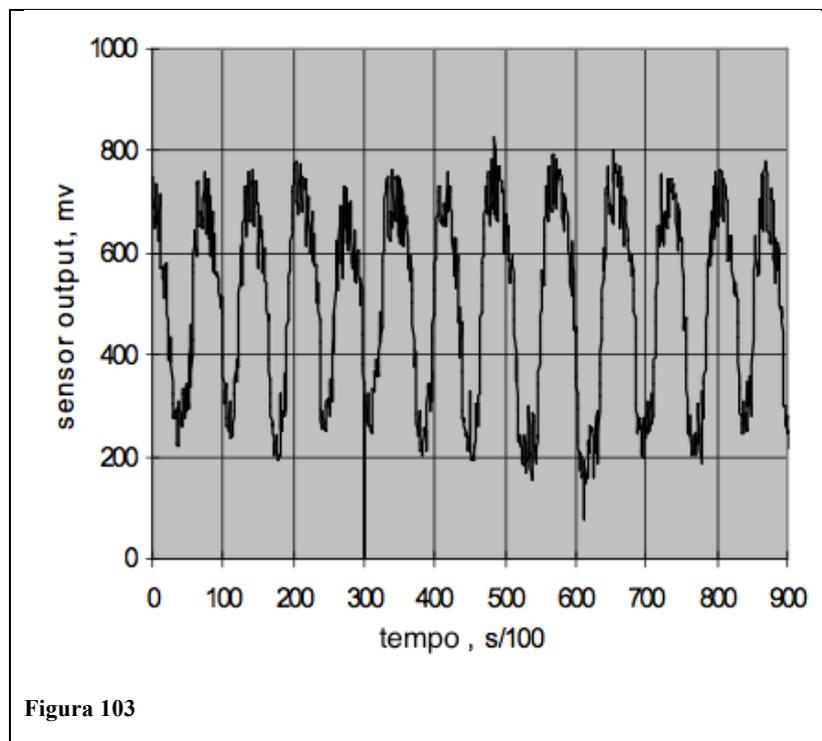


Dopo la misurazione della commutabilità, le sonde sono state installate su di un motore MB M111E a quattro cilindri in linea, 2 litri di cilindrata, iniezione multipla e con quattro valvole per cilindro.

Le sonde sono state accoppiate con la centralina e il motore è stato fatto funzionare nelle seguenti condizioni di funzionamento:

- Velocità 2500 RPM
- MAP 50 kPa
- AFR Stechiometrica
- Refrigerante 80°C
- Temperatura dell'olio 85°C
- Temperatura dei gas di scarico 600° C
- Combustibile CECRF83A91

In tali condizioni, a una frequenza di campionamento pari a 100 Hz, sono stati acquisiti gli output dei sensori, se ne riporta un esempio:



Da queste prove si è calcolata la frequenza di oscillazione del segnale in ogni sensore, un parametro che combinato con il tempo di commutazione e quello di attesa (periodo durante il quale un processo dinamico rimane bloccato) caratterizza la velocità di reazione del sensore a cambiamenti di composizione dei gas di scarico. La frequenza di oscillazione del sensore è strettamente legata alla velocità del motore (2500 rpm) perché è stata considerata come velocità di crociera e le oscillazioni di frequenza del sensore N1 sono intermedie da 1 a 4 Hz, definendo la larghezza della banda della frequenza del sensore.

I risultati tabulati dei test sul banco motore hanno permesso di correlare l'indice di commutabilità alla frequenza del segnale.

Codice dei sensori	Test sull'impianto	Test sul banco motore
	Indice di commutabilità	Frequenza del segnale Hz
N1	24.4	2.5
A8	13.4	2.2
I2	6.5	2.0
A5	5.9	1.8
I6	5.8	1.7
A4	3.2	1.4
A7	3.0	1.1

Figura 104

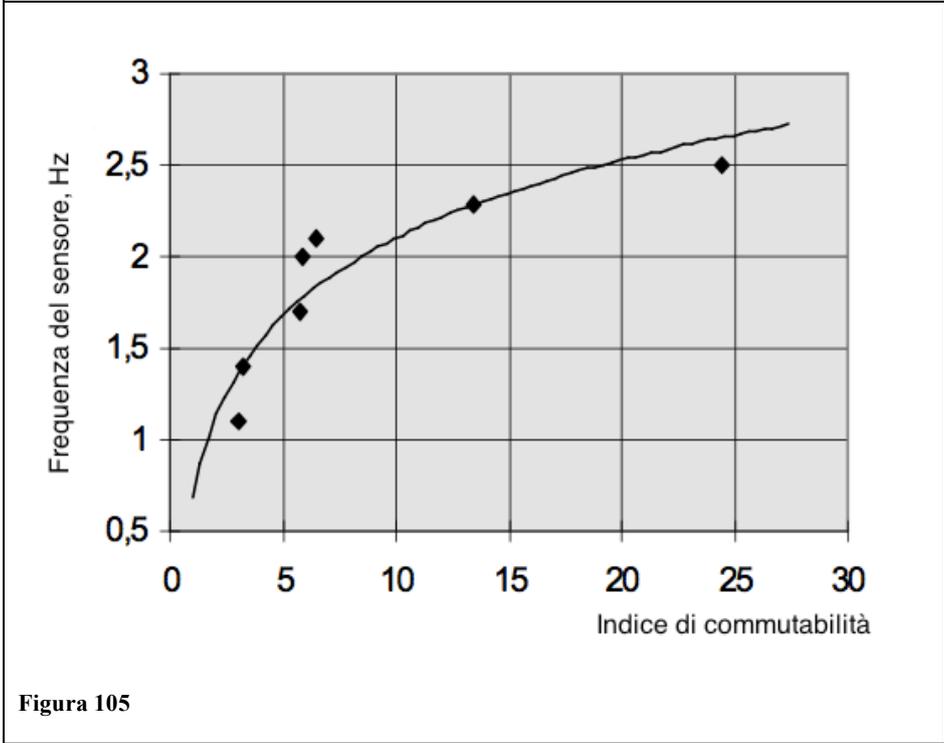


Figura 105

In aggiunta ai sensori λ EGO, i quali producono un segnale binario, è stato aggiunto un sensore UEGO in grado di misurare l'escursione di λ dallo stechiometrico.

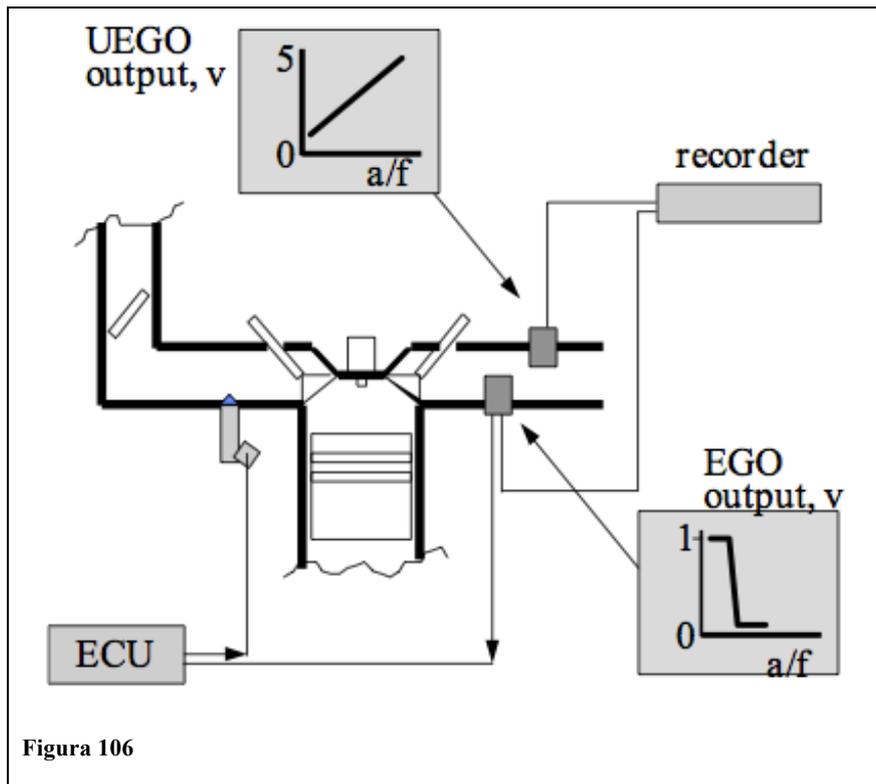


Figura 106

La sonda UEGO permette di misurare l'escursione del rapporto A/F causato dal controllo in feedback effettuato con due sensori λ datati (A7, A8). Si vede come il sensore a indice di commutabilità più elevato (A7) produce elevate escursioni di λ .

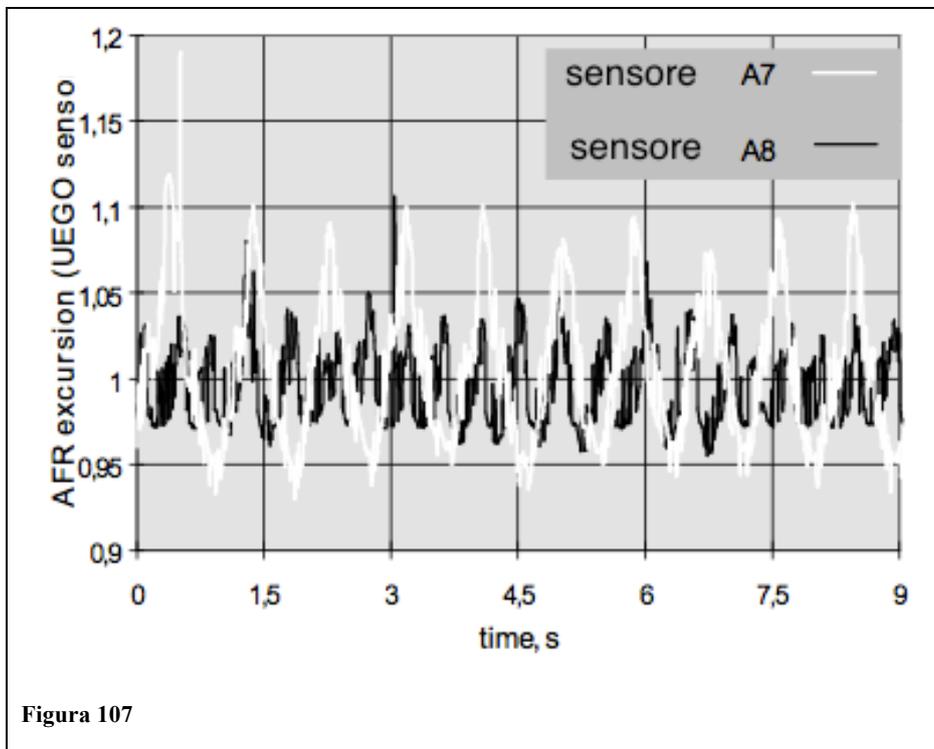
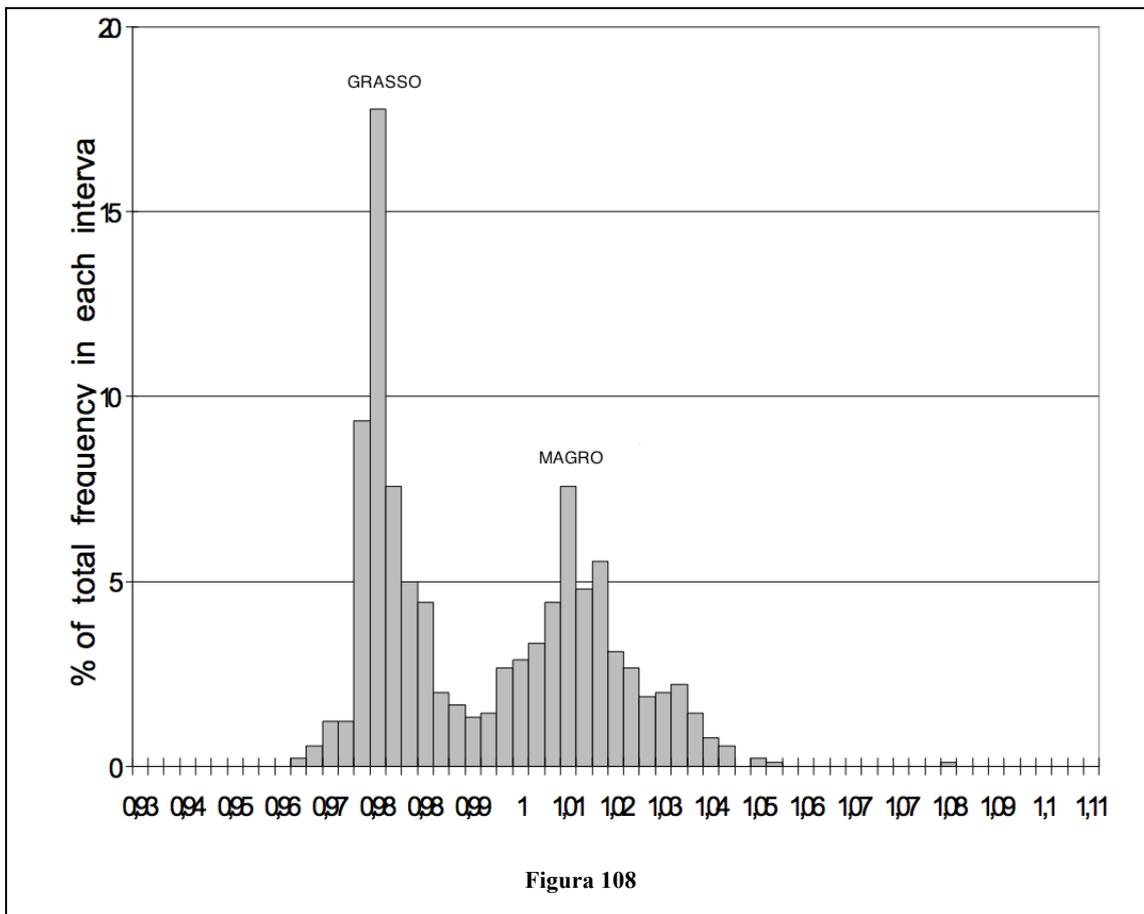


Figura 107

Oltre ai valori delle due sonde A7 e A8 sono stati raccolti anche i valori di lambda dovuti a tutte le altre sonde, accoppiandole con la UEGO. Per il solo sensore N1, è stata misurata la distribuzione di λ con maggiore accuratezza, considerando 900 output del sensore collezionati in 9 secondi di funzionamento

e con una risoluzione delle ascisse (λ) pari a 0,003. Si è ottenuta così una distribuzione bimodale dei valori di λ concentrata su due valori (0,975 e 1,011):



Questi due valori sono poi stati impiegati come estremi per definire tre range:

- $\lambda < 0,975$ Grasso
- $0,975 < \lambda < 1,011$ Stechiometrico
- $\lambda > 1,011$ Magro

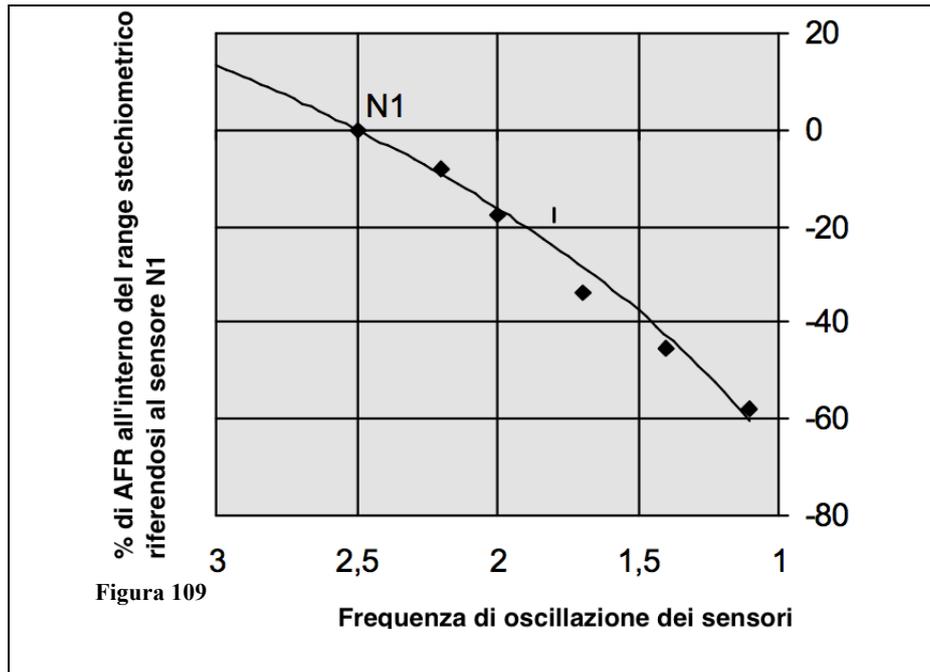
nei quali suddividere i risultati generati dai sensori, ricavando le seguenti percentuali:

Tabella 6

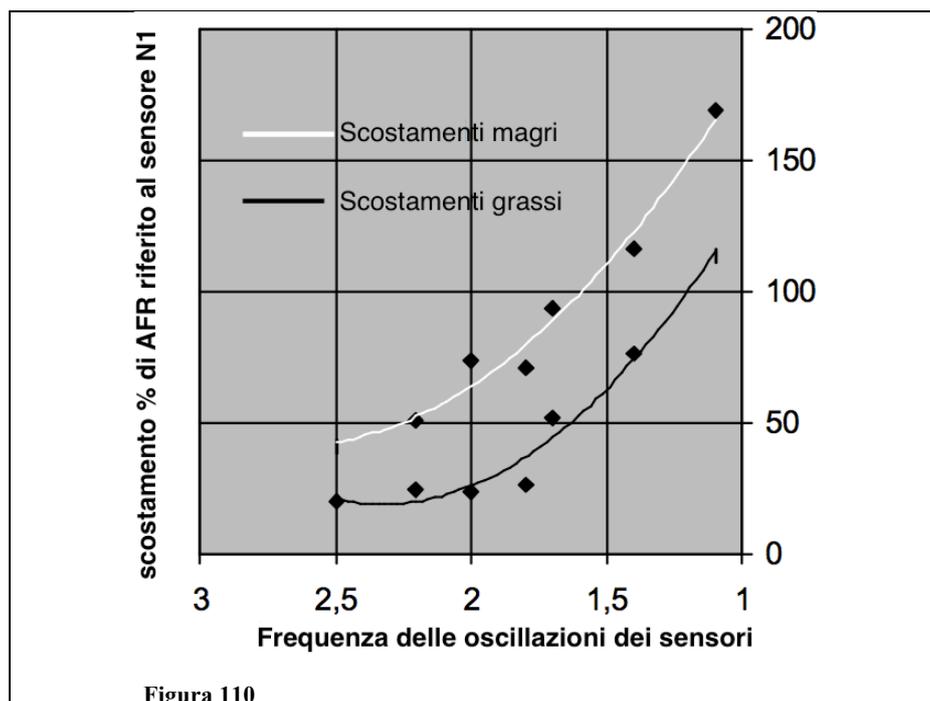
Cod. Sensore	N1	A8	I2	A5	I6	A4	A7
Frequenza Hz	2.5	2.2	2.0	1.8	1.7	1.4	1.1
% risultati stechiometrici	62	57	51	51	41	34	26
% risultati grassi	13	14	12	13	21	26	30
% risultati magri	25	29	37	36	38	40	44

Queste percentuali sono strettamente legate alla frequenza del sensore, correlata a sua volta alla commutabilità del sensore. Maggiore è tale indice, per le sonde datate, più le percentuali nei tre range si avvicineranno a quelle del sensore nuovo.

Confrontando la frequenza di risultati, nel range stechiometrico, dei sensori datati con quello nuovo, N1, si può correlare lo scostamento percentuale (usando quest'ultimo come riferimento) alla frequenza dei sensori.



Per una completa analisi si è studiato l'andamento delle escursioni di AFR, notando che l'avvelenamento favorisce quelle magre.



Infine per completare lo studio degli effetti dell'avvelenamento, sono state studiate le conseguenze sulle emissioni. Le sonde sono state così reinstallate sui taxi e si sono misurate le concentrazioni in ppm degli ossidi d'azoto nei gas di scarico, correlandole alla frequenza d'oscillazione. Per le due sonde A7 e A8 si è poi misurata la differenza di emissioni, sostituendo le due sonde datate con due nuove così da evidenziare le conseguenze dell'usura del sensore sull'ambiente.

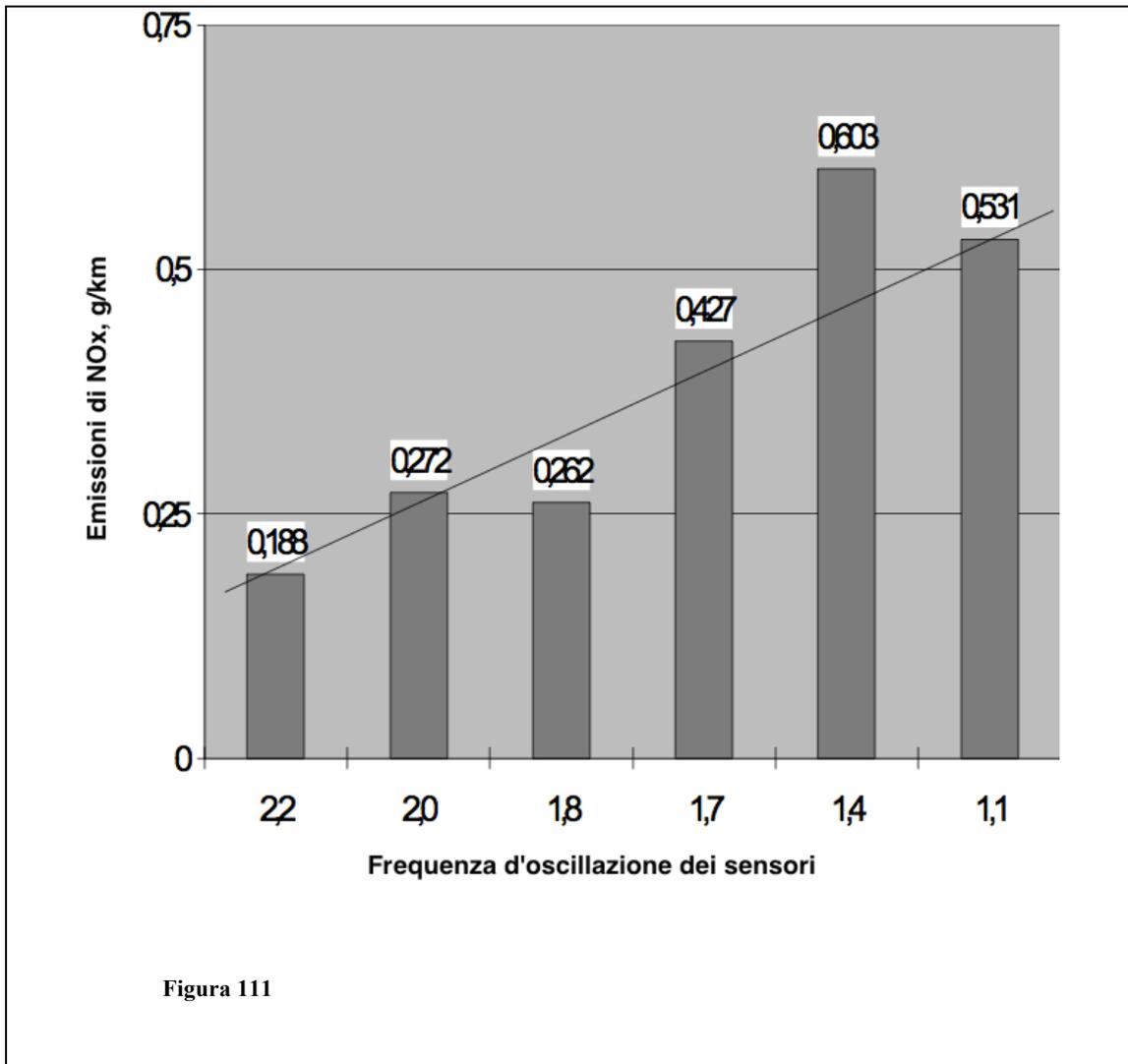


Tabella 7

TWC	Emissioni nel ciclo urbano g/km					
	TWC_A7			TWC_A8		
	CO	HC	NOx	CO	HC	NOx
Sensore datato	0.217	0.043	0.531	0.068	0.032	0.188
Sensore nuovo	0.116	0.048	0.739	0.077	0.038	0.164
Variazione %	-46.5	+ 1.1	+39.2	+13.2	+1.8	-12.7

I risultati riportati in tabella possono essere spiegati come segue: i catalizzatori impiegati sono datati e quindi con prestazioni diverse dal nuovo, all'aumentare dell'efficienza di conversione dei CO diminuisce quella degli NOx e viceversa, mentre le elevate variazioni dovute alla sostituzione del sensore A7 sono causate dall'elevato grado di avvelenamento di quest'ultima.

Le conclusioni tratte da questo studio si possono riassumere nei seguenti punti:

- L'utilizzo prolungato dei sensori λ ne provoca l'avvelenamento.
- L'incremento della frequenza dei sensori corrisponde anche a una riduzione dell'indice di commutabilità, con conseguente incremento delle escursioni del parametro λ .
- La conseguenza dell'impiego di un sensore a elevato indice di commutabilità sul catalizzatore è la riduzione di efficienza del catalizzatore.
- Non è detto che la sostituzione di un sensore, mantenendo un catalizzatore datato, porti a un miglioramento delle prestazioni.

4 MISURAZIONE INNOVATIVA DEL RAPPORTO A/F DURANTE I TRANSITORI

Come descritto dettagliatamente qui sopra nei transitori che passano attraverso il valore stechiometrico, si hanno misurazioni inaspettate, funzione anche della velocità di variazione del titolo.

Per risolvere tale problematica i ricercatori hanno studiato una moltitudine di approcci diversi, ricorrendo a trasduttori diversi da quelli visti finora.

4.1 STUDIO DI UN SENSORE UEGO ARTIFICIALE (SUEGO) PER LE PARTENZE “A FREDDO” DEL MOTORE (Metodologia, Progettazione e Prestazioni)

BIBLIOGRAFIA indice 11

Negli odierni motori il controllo delle partenze “a freddo” è un problema molto sentito, poiché nei primi 40 secondi sono rilasciate l’80 % delle emissioni totali e solo il 20% nei restanti 22 minuti del test EPA75. Considerando il transitorio di un motore SI quando il combustibile è iniettato nel collettore d’aspirazione a bassa temperatura, il fluido non riesce a completare il cambiamento di fase necessario per una combustione omogenea. Il differente valore di λ nella composizione della miscela favorisce la formazione degli inquinanti, riduce l’efficienza del catalizzatore e può portare alla mancata accensione della miscela (misfire).

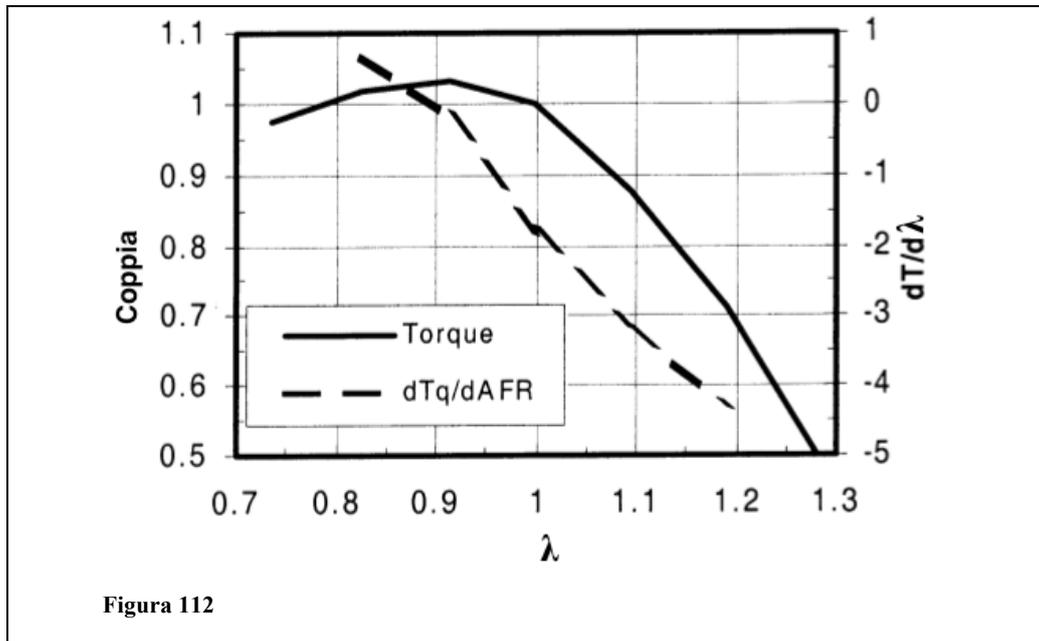
Per controllare l’AFR nei primi 35 secondi, necessari alla sonda HEGO per andare in temperatura, si può impiegare un modello matematico (basandosi sul segnale generato da una sonda UEGO artificiale), in realtà nemmeno con un tempo di preriscaldamento nullo il segnale del sensore binario sarebbe valido, questo poiché le condizioni termiche del motore variano drasticamente nei primi 15 secondi e inoltre, il funzionamento sarebbe sbilanciato sul grasso, quindi l’informazione della HEGO sarebbe inutile.

La stima di λ per il sensore artificiale deve basarsi su un parametro fisico a esso correlato, così come i sensori reali. È bene ricordare che il rapporto A/F influenza:

- La velocità di propagazione del fronte di fiamma
- Il picco di pressione (modulo e angolo di manovella)
- La coppia e anche l’accelerazione angolare dell’albero motore poiché le loro derivate sono proporzionali:

$$d(T_q) \propto d(A)$$

Per la progettazione della sonda SUEGO il parametro fisico scelto per correlare l'AFR è la coppia T_q .



L'inconveniente di questo parametro, come si vede dal grafico, è che presenta un massimo per $\lambda \approx 0,9$ creando ambiguità per il range di λ che va da 0,7 a 1,05 poiché in tale intervallo a ogni valore della coppia ne corrispondono due per l'AFR. Per ovviare a tale inconveniente si usa la derivata, del prim'ordine, della coppia: $\frac{dT_q}{d\lambda}$ che è una retta.

La determinazione di tale valore passa attraverso due step:

1. Il primo è determinare la relazione esistente fra la derivata dell'accelerazione $d(A)$ e la derivata della coppia $d(T)$. Questo si fa monitorando continuamente la velocità del motore (Ω) e calcolando il periodo N con l'impiego di un contatore digitale.
2. Il secondo è ricavare la $d(\text{AFR})$ la quale va determinata perturbando la quantità di combustibile.

I valori dell'accelerazione ingrassando e smagrendo la miscela valgono:

$$A_{\text{magro}} = (\Omega_{\text{lean}} - \Omega_0) / (t_{\text{lean}} - t_0) = -N^3(t_{\text{lean}} - t_0)$$

$$A_{\text{grasso}} = (\Omega_{\text{grasso}} - \Omega_0) / (t_{\text{grasso}} - t_0) = -N^3(t_{\text{grasso}} - t_0)$$

La variazione di accelerazione si può dunque esprimere come:

$$d(A) = A_{\text{grasso}} - A_{\text{magro}} = N^3(t_{\text{magro}} - t_{\text{grasso}})$$

Sviluppandola in serie di Taylor troncata al prim'ordine:

$$dA = A - A_0 = \frac{dA}{dAFR} \cdot \partial AFR, \text{ dove } \partial AFR \text{ è noto.}$$

Si definisce quindi il parametro P:

$$P = C \cdot N^3 \cdot (t_{magro} - t_{grasso})$$

dove scegliendo opportunamente la costante C si ha:

$$P \propto \left(\frac{dA}{dAFR} \right) \propto \frac{dT_q}{dAFR}$$

Per la perturbazione del rapporto AFR si è adottato un modello che vari la % di combustibile iniettato rispetto al valore nominale. Il valore massimo di tale scostamento è stato fissato al 4% così da non creare eccessive emissioni e peggiorare l'NVH.

Il modello è stato creato per uno specifico motore V8 in cui la durata della combustione, in gradi di manovella (CA), è di circa 90° e in tale motore le fasi di espansioni di due cilindri adiacenti si sovrappongono anch'esse per 90 gradi.

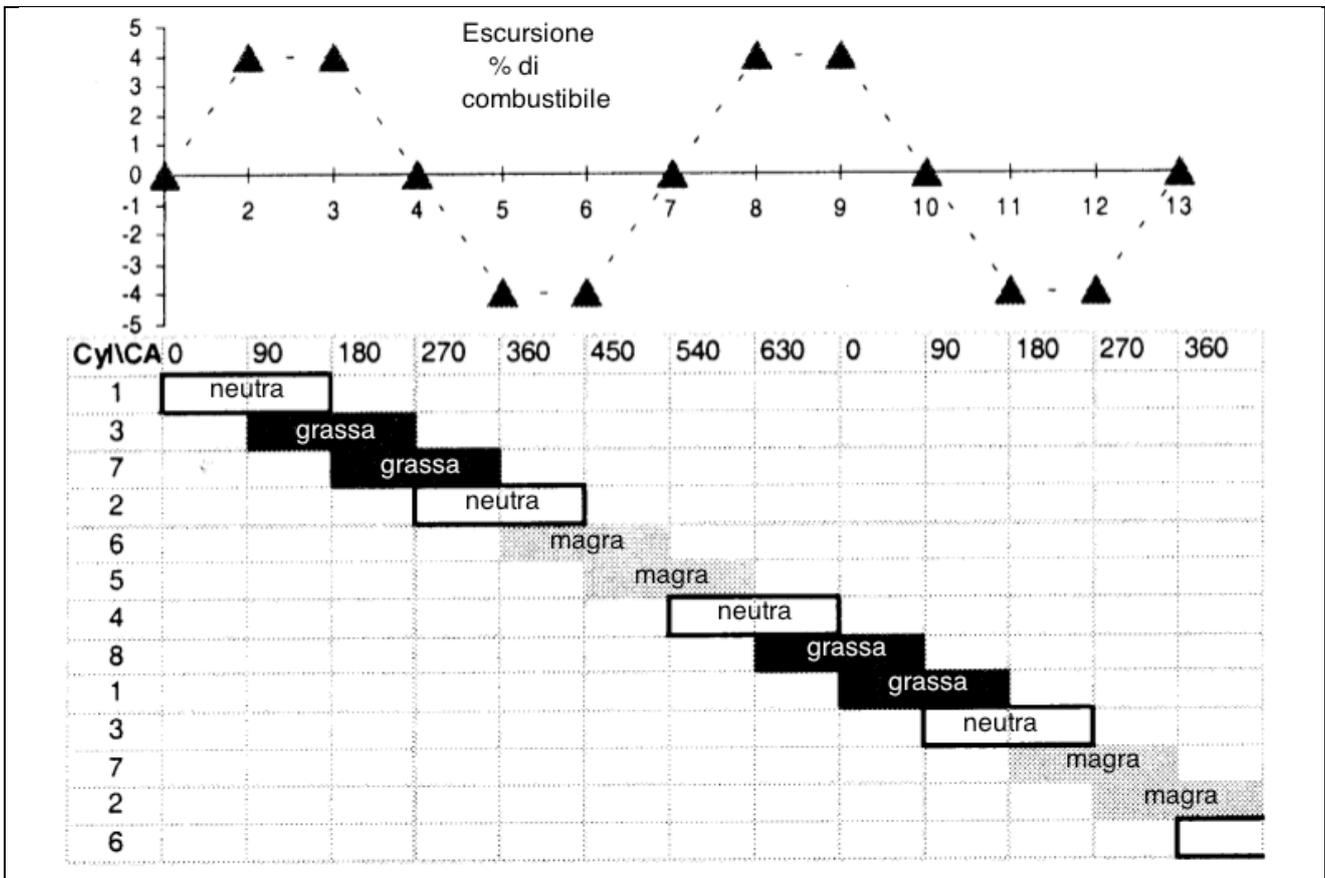


Figura 113

Al fine di creare una rapida e pulita d(A) si inietta dapprima una miscela neutra

(scostamento=0%, detta anche fase di rilassamento), dopo 90 gradi nel cilindro adiacente si inietta invece una miscela grassa (scostamento=+4%) e anche nel successivo, poi segue un'altra iniezione neutra e infine due iniezioni magre(scostamento=-4%) nei successivi due cilindri.

Fasando la combustione alla coppia massima (MBT), il picco di pressione si ha circa 15 gradi dopo il PMS. La finestra di acquisizione di d(A) parte a 80 gradi dopo il PMS e termina a 260.

Nella realtà la velocità angolare della manovella CAA è funzione di un elevato numero di fattori, tra cui i principali sono:

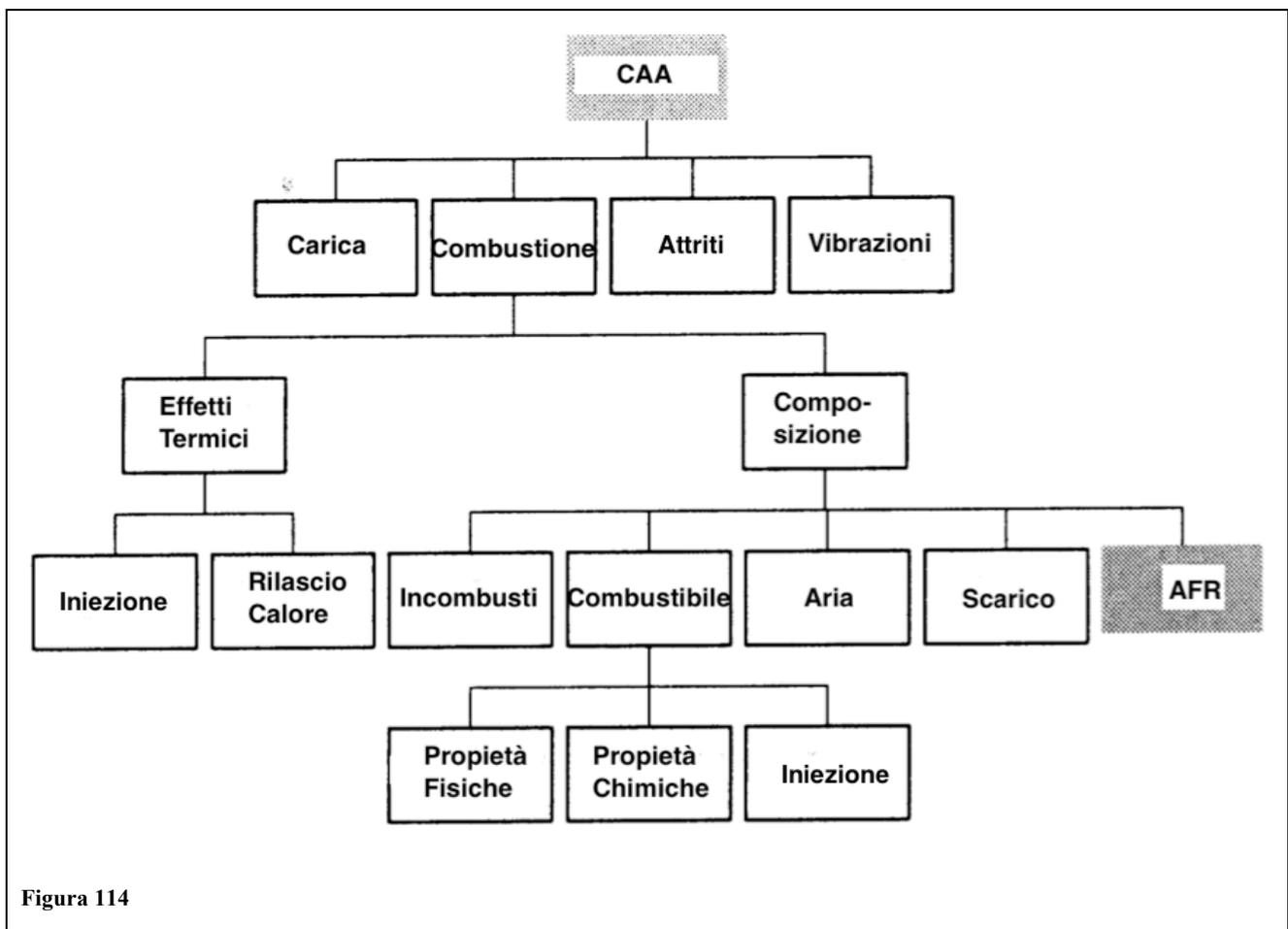


Figura 114

$$CAA = f_1(X_1 X_2, \dots, AFR)$$

per le sonde SUEGO il problema è invertito:

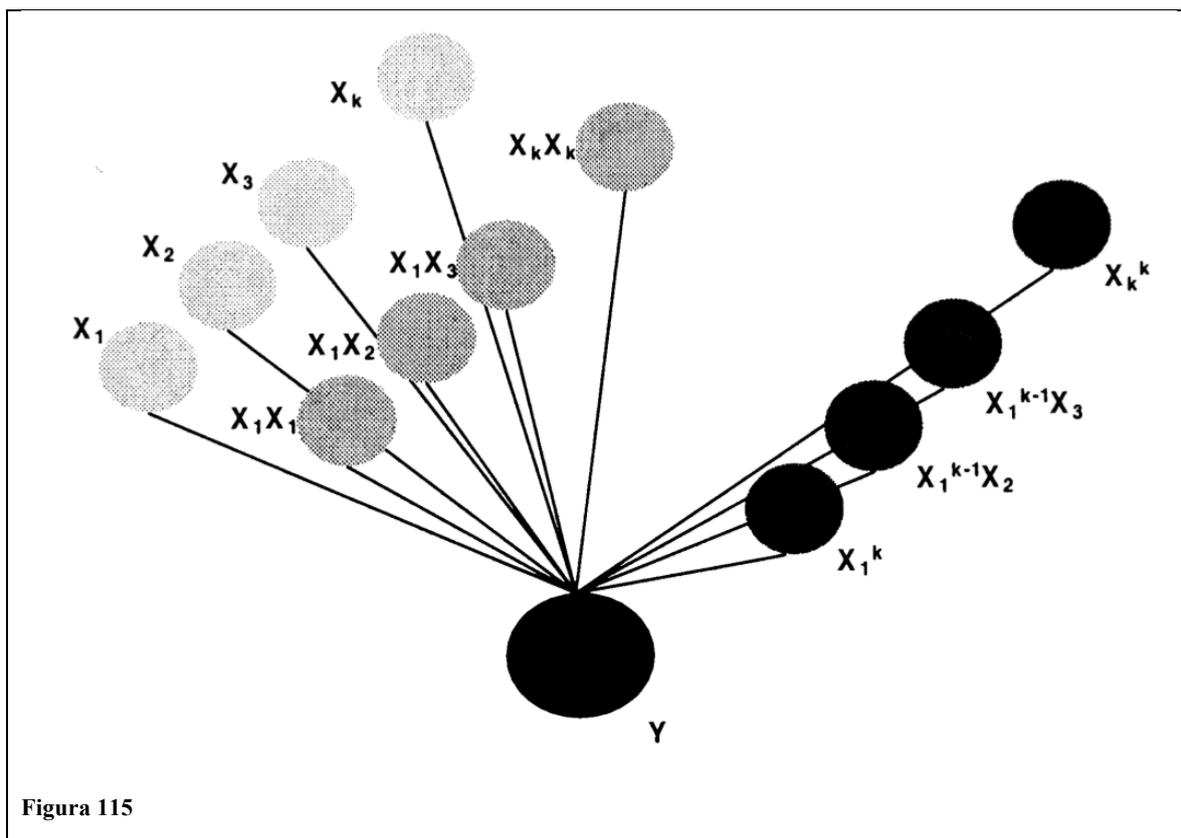
$$AFR = f_1(X_1 X_2, \dots, CAA)$$

inserendo il parametro definito in precedenza **metric**:

$$\text{metric} \propto \left(\frac{dA}{dAFR} \right) \rightarrow AFR = f(X_1 X_2, \dots, \text{metric})$$

Al fine di stimare AFR durante il transitorio, è necessario considerare un grande numero di altre variabili allo stesso tempo. Poiché la misurazione di alcune di queste variabili è difficoltosa, non è immediato sviluppare un approccio analitico con un elevato rapporto $\frac{\text{segnale}}{\text{rumore}}$. Un esempio di queste variabili è la massa d'incombusti; la loro distribuzione varia di ciclo in ciclo rendendo difficoltoso lo sviluppo di un modello analitico in tempo reale.

Una volta determinato il parametro principale per la stima dell'AFR, resta comunque da risolvere il problema del filtraggio del segnale durante le partenze a freddo, per far sì che l'approccio visto sia utilizzabile. Di conseguenza la SUEGO per essere in grado di correggere eventuali scostamenti dell'AFR, deve essere utilizzata in un controllo ad anello chiuso come per le sonde HEGO impiegate oggi nei controlli on-board. L'algoritmo SUEGO dovrà avere un formato generalizzato, un primo modello matematico, per la valutazione della dinamica non lineare del motore durante il transitorio, è una rete neurale di ordine sufficientemente elevato.



Le reti neurali

Una **rete neurale artificiale** (ANN "*Artificial Neural Network*" in inglese), normalmente è chiamata solo "rete neurale" (NN "*Neural Network*" in inglese), ed è un modello matematico/informatico di calcolo basato sulle reti neurali biologiche. Tale modello è costituito da un gruppo di interconnessioni di informazioni costituite da neuroni artificiali e processi che utilizzano un approccio di connessionismo di calcolo. Nella maggior parte dei casi una rete neurale artificiale è un sistema adattivo che cambia la sua struttura basata su informazioni esterne o interne, che scorrono attraverso la rete durante la fase di apprendimento.

In termini pratici le reti neurali sono strutture non-lineari, di dati, organizzate come strumenti di modellazione. Esse possono essere utilizzate per simulare relazioni complesse tra ingressi e uscite che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare.

Una rete neurale artificiale riceve segnali esterni su uno strato di nodi (unità di elaborazione) d'ingresso, ciascuno dei quali è collegato con numerosi nodi interni, organizzati in più livelli. Ogni nodo elabora i segnali ricevuti e trasmette il risultato a nodi successivi.

Mentre prima abbiamo visto una lista di parametri correlati alla velocità angolare della manovella ora vediamo più parametri correlati fra di loro utilizzati nella strategia di controllo Ford PCM. Va precisato al fine di una più rapida analisi dei dati che alcune variabili appaiono più di una volta ma chiamandole diversamente come **load** and **cyc_air_chg**. Dire quale fra i seguenti parametri sia il più adatto all'ottimizzazione del modello, prima di un'analisi accurata, è impossibile.

Tabella 8

Riferimento	Tempo	Aria	Combustibile	Carico effettivo
LAMBDA	N	LOAD	PW_OUT	RT_GR_CUR/PDL
OLMCL	DPIP_RICH	ISCDTY	TFC	VS
KAMRF	DPIP_LEAN	TP_REL	CAFMOD	TOT
ECT	SAFTOT	EGR_ACT		SD_RATIO
DSDRPM	INJDELY	IMAF		TQ_NET
AM_INTG	CAF_CYC	CYC_AIR_CHG		

Tabella 9

Parametro	Parametri correlati
<ul style="list-style-type: none"> • Metric 	Esprime la misura dell'AFR nel caso ideale, proporzionale a $\frac{dT_q}{dAFR}$.
<ul style="list-style-type: none"> • N 	Correlato alla velocità del motore e dinamica.
<ul style="list-style-type: none"> • Load 	Parametro adimensionale che esprime la carica di aria e combustibile, presenti nel cilindro.
<ul style="list-style-type: none"> • SAFTOT (SPK) 	Esprime la fasatura di accensione, il profilo del rilascio termico la dinamica del motore (controllo della velocità, della temperatura, della coppia ecc...)
<ul style="list-style-type: none"> • Fuel_pw: 	Esprime la durata dell'impulso che l'iniettore riceve per iniettare il carburante e la massa di carburante.
<ul style="list-style-type: none"> • Lambda: 	Equivalente all'AFR iniziale di un controllo ad anello aperto
<ul style="list-style-type: none"> • TP: 	Posizione della farfalla, quantità di aria e combustibile.
<ul style="list-style-type: none"> • DTP 	Variazione della posizione della valvola a farfalla, dinamica del veicolo e comando del pilota.
<ul style="list-style-type: none"> • ECT 	Temperatura del liquido refrigerante del motore, condizioni termiche iniziali del motore.
<ul style="list-style-type: none"> • AMI 	Massa d'aria integrata, condizioni termiche del sistema.
<ul style="list-style-type: none"> • SPD 	Velocità del convertitore di coppia.
<ul style="list-style-type: none"> • TTC 	Trasmissione della temperatura nel fluido e viscosità
<ul style="list-style-type: none"> • VS 	Velocità del veicolo

Per eccitare il sistema si può procedere in due modi:

1. Variando la quantità di combustibile iniettato, come discusso in precedenza.
2. Forzando il motore a funzionare in condizioni dinamiche, così da poterne studiare le caratteristiche durante le partenze a freddo.

Gli esperimenti previsti comprendono:

- la mappatura del motore a caldo variando velocità, carico, anticipo, ecc
- avviare un motore da freddo e guidare l'auto seguendo diversi modelli dinamici, al fine di costruire uno spazio di campioni razionale.

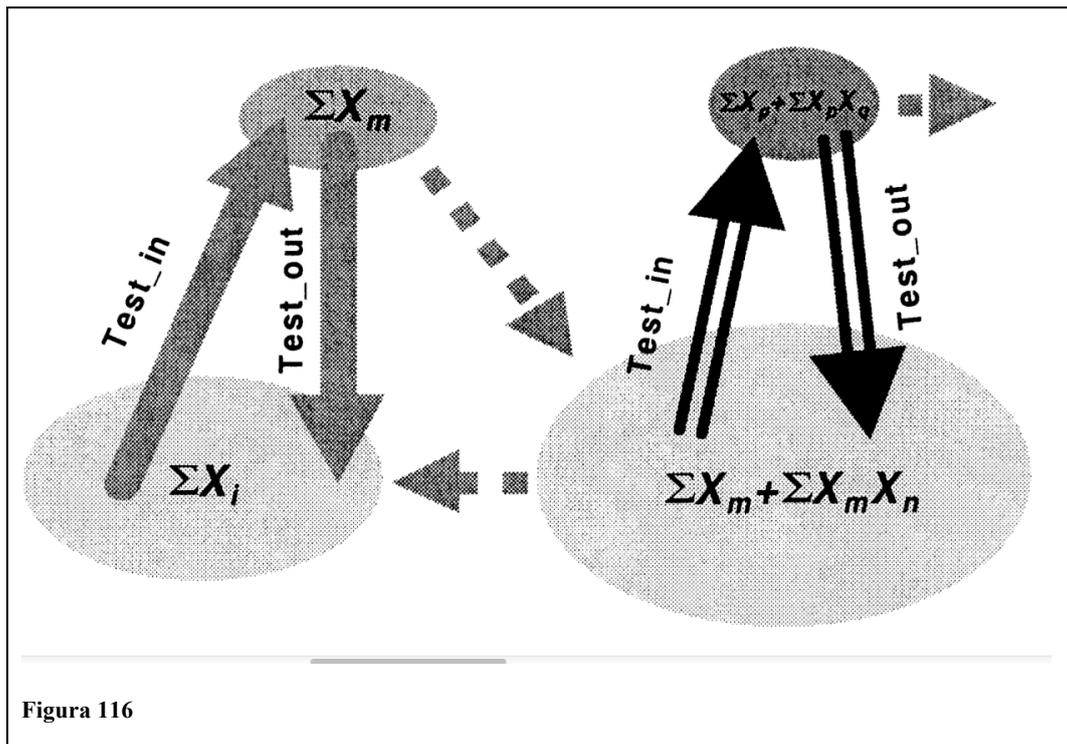
La mappatura del motore a caldo è relativamente semplice: basta registrare tutte le variabili elencate nella Tabella 1 e formare una matrice di stato stazionario al variare delle combinazioni di velocità, carico e anticipo.

Si è utilizzato un test "FTP75 freddo 505" per creare lo spazio di campioni nel transitorio iniziale. Poiché la sua durata è limitata a soli 35 secondi in tale intervallo di tempo sono state effettuate accelerazioni e decelerazioni, cambi di marcia, ecc... Tutti i segnali così generati sono poi stati acquisiti alla frequenza di 100 Hz.

Le caratteristiche termodinamiche di un motore da freddo differiscono significativamente da quelle di un motore a temperatura, i dati a freddo vanno considerati separatamente dai dati a caldo.

Utilizzando una rete neurale di ordine elevato per la stima dell'AFR si rischia che il tempo necessario all'elaborazione di tutti gli elementi e coefficienti sia eccessivo, rendendo difficoltosa l'auto ri-calibrazione o l'adattamento nella fase successiva. Per la selezione delle variabili più rilevanti e creazione di un modello robusto si usa uno strumento di analisi multivariata (il così detto doppio screening di regressione graduale).

Il suo principio di funzionamento può essere così schematizzato:

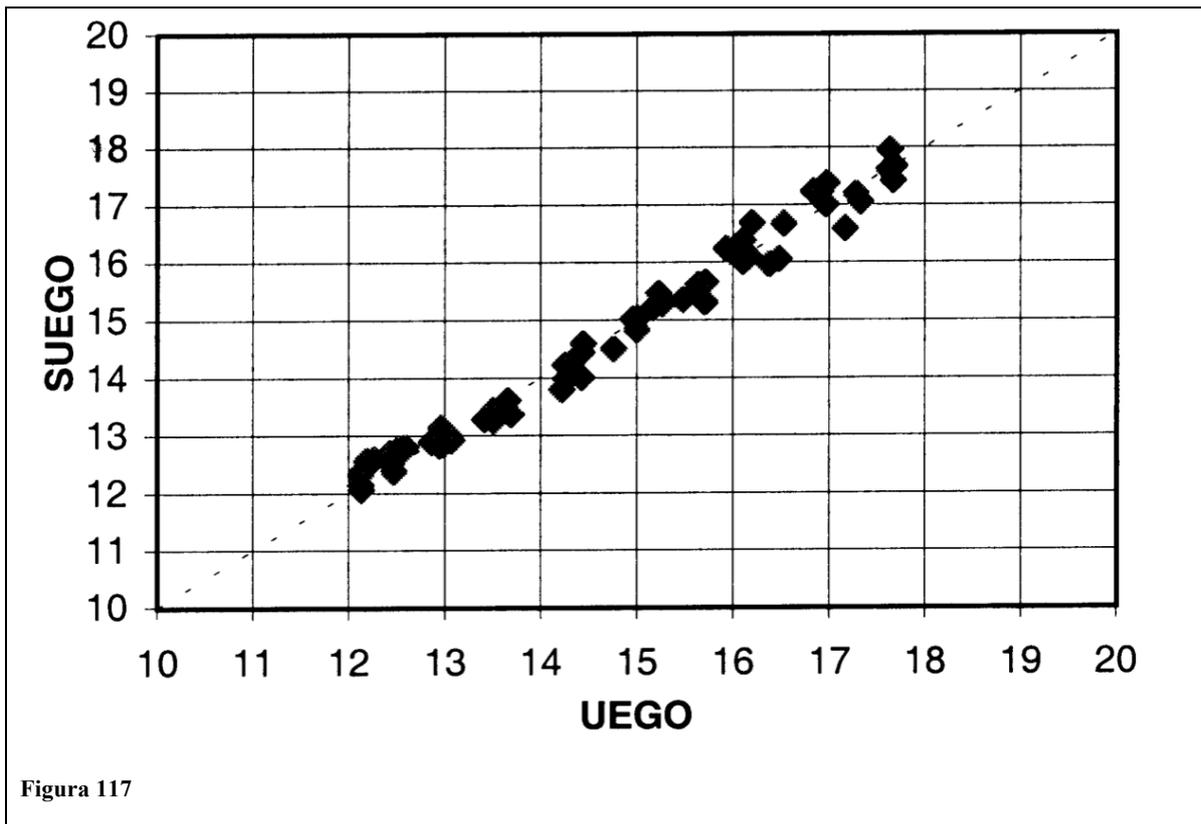


1. Creare una rete neurale di ordine elevato (solo gli elementi di primo e secondo ordine verranno utilizzati all'inizio), valutarne la sua precisione e le caratteristiche dinamiche;
2. Selezionare il parametro più rilevante per la costruzione di un modello;
3. Introdurre il successivo parametro, sempre in ordine di rilevanza, e costruire poi un nuovo modello (che dovrà essere migliore del precedente, altrimenti nessun nuovo parametro va aggiunto);
4. Selezionare ed eliminare il parametro meno rilevante nel modello corrente, in modo da lasciare i parametri in grado di portare a un risultato migliore;
5. Ripetere i passaggi 3 e 4 fino a quando il modello così ottenuto non è migliorabile aggiungendo o sottraendo parametri.

Studio a regime: seguendo i passaggi si è giunti a un modello composto da due soli parametri: metric e SPK (il parametro Load forniva un contributo minore ed è stato eliminato). Il risultato finale è stato l'ottenimento della seguente equazione, detta "di regime":

$$AFR = 13,12 + \text{metric} \cdot (0,01496 + 0,0004411 \text{ spk})$$

Se ne può apprezzare l'accuratezza osservando il seguente grafico che confronta i risultati prodotti dalla formula approssimativa con le misure effettuate tramite una sonda UEGO (condizioni stazionarie).



Dall'equazione di regime si nota che per **metric=0**, AFR è uguale a una costante e quindi il motore non accelera. Questo è vero nell'intorno di $\lambda=0,9$ (o AFR=13). In questo caso, **metric** è un parametro correlato ad **AFR**, ed è anche l'unico termine non lineare che descrive l'interazione fra l'anticipo d'accensione, il picco di pressione in camera (ampiezza e posizione in CA) e la variazione di coppia.

Studio durante il transitorio: Dall'impiego dell'equazione di regime come punto di partenza e seguendo poi il processo di sviluppo sopra descritto si è ricavata, con vari aggiustamenti ingegneristici, la seguente SUEGO valida per i transitori a freddo,

$$\text{AFR} = C_0 + C_1 \text{table} + C_2 \text{metric}^2 + C_3 N \cdot \text{load} + C_4 N^2 + C_5 N \cdot \text{spd} + C_6 \text{spk} \cdot \text{dTP} + C_7 \text{spk} \cdot \text{load} + C_8 \text{spk}^2 + C_9 \text{ECT} \cdot \text{AMI}$$

Il parametro **table** è stato considerato il più significativo, seguito da altri termini di second'ordine:

- **N*load** – Campo (inteso come regione) di funzionamento del motore
- **N*spd** – Effetto dello slittamento della trasmissione
- **spk*dTP** – Variazione dell'apertura della farfalla, dinamica del veicolo
- **ECT*AMI** – Stato termico del motore

È interessante notare che tutti i parametri contenenti informazioni sulla quantità

di combustibile, ad esempio **lambda** e **fuel_pw** dette anche variabili di controllo, non appaiano nel modello. Questo è dovuto agli errori causati dalla dinamica e al rumore nelle misurazioni.

L'ottimizzazione del modello SUEGO è stata determinata con dei test FTP75 (selezionando il gruppo di parametri più rilevante) e verificata con alcuni test “a freddo”.

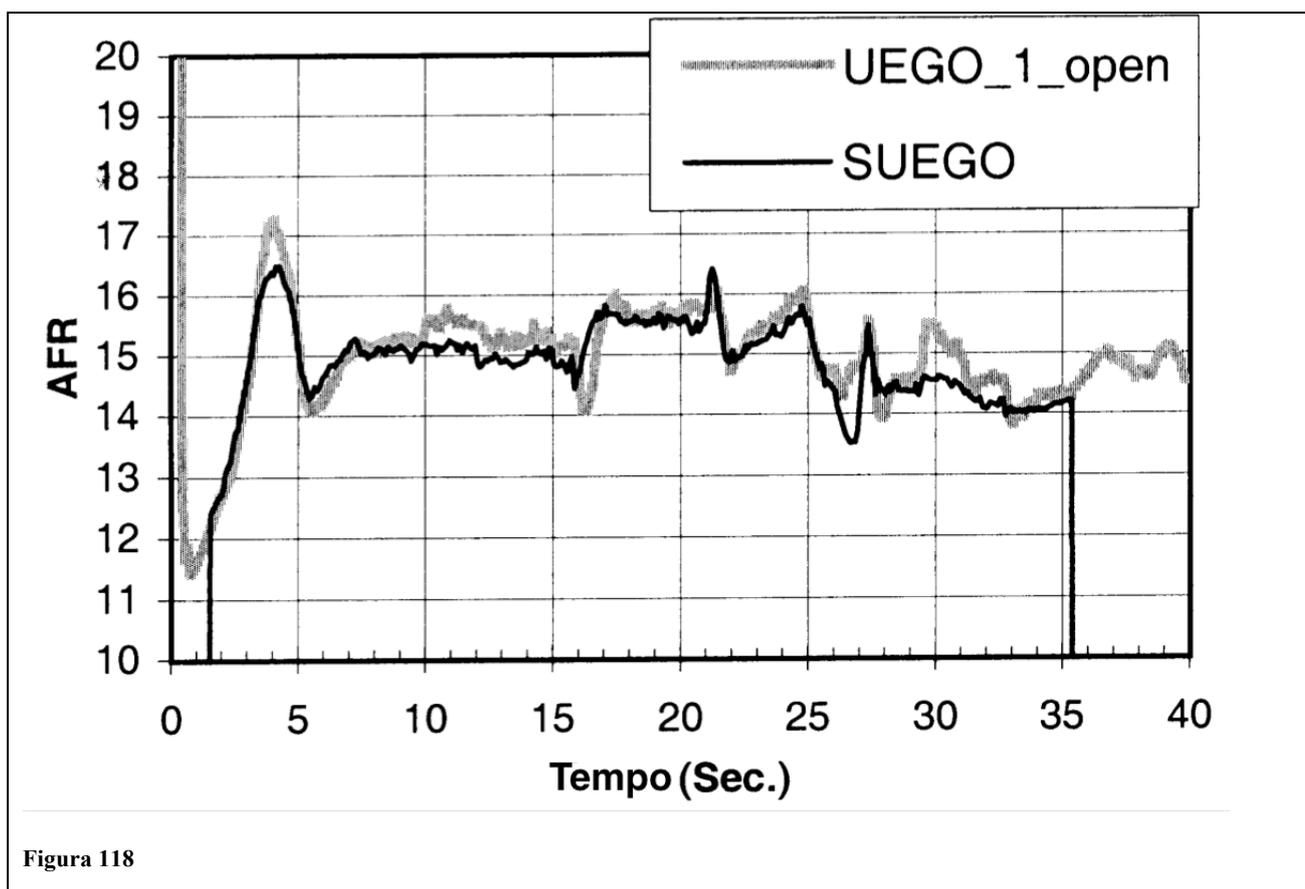


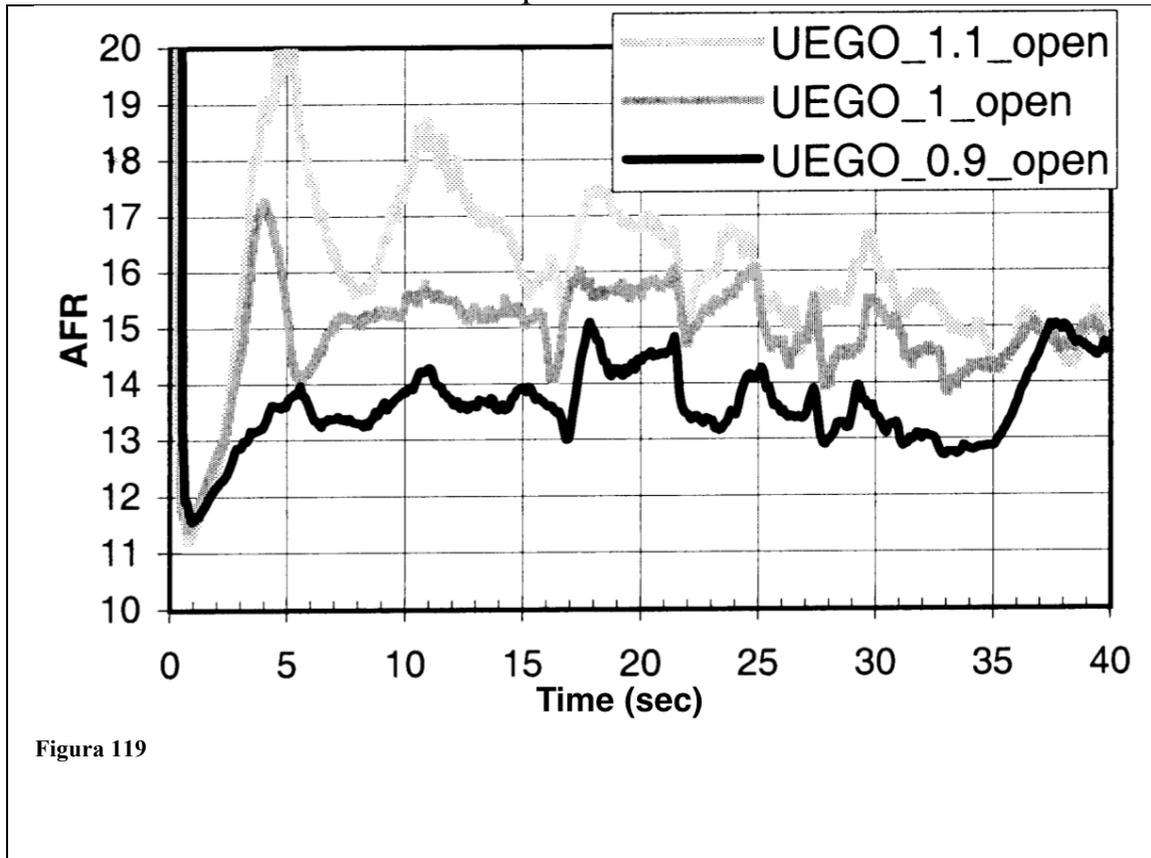
Figura 118

Nel grafico sono riportate le misurazioni fatte utilizzando una SUEGO e una UEGO ad anello aperto, il motore utilizzato è un Ford Crown Victoria, modello del 1995, V8, 2 valvole per cilindro, 4,6 L di cilindrata a trasmissione automatica. Il rapporto AFR del motore, per la partenza a freddo, è stato calibrato a 15 (magro).

In poco più di un secondo dopo lo scocco l'avviamento, il sensore SUEGO è in grado di stimare accuratamente l'arricchimento della miscela, al sedicesimo secondo si vede la maggior rapidità del sensore SUEGO nel misurare l'arricchimento ed evitare il picco prodotto dalla UEGO. Al 27-esimo secondo si vede invece come in corrispondenza della cambiata si abbia uno scostamento rilevante dal valore misurato dalla SUEGO rispetto al riferimento. Infine al 35-esimo secondo il sistema smette di funzionare poiché si considera terminato il transitorio a freddo, da quel momento in poi è possibile applicare l'equazione di regime.

Poiché il sensore SUEGO non è fisico, per il suo impiego in un controllo ad anello chiuso occorre sviluppare un controllore PID. Prima di aggiustare il guadagno di tale controller si sono eseguiti tre test FTP75 utilizzando un controllo ad anello aperto con un sensore UEGO che misuri l'AFR in tre diverse condizioni di funzionamento:

- Nominali
- Con un errore del +10% sulla quantità di combustibile iniettato
- Con un errore del -10% sulla quantità di combustibile iniettato



Dopo l'ottimizzazione del guadagno del controller PID, il controller è stato acceso. In figura si vede la performance della SUEGO nel controllo in feedback:

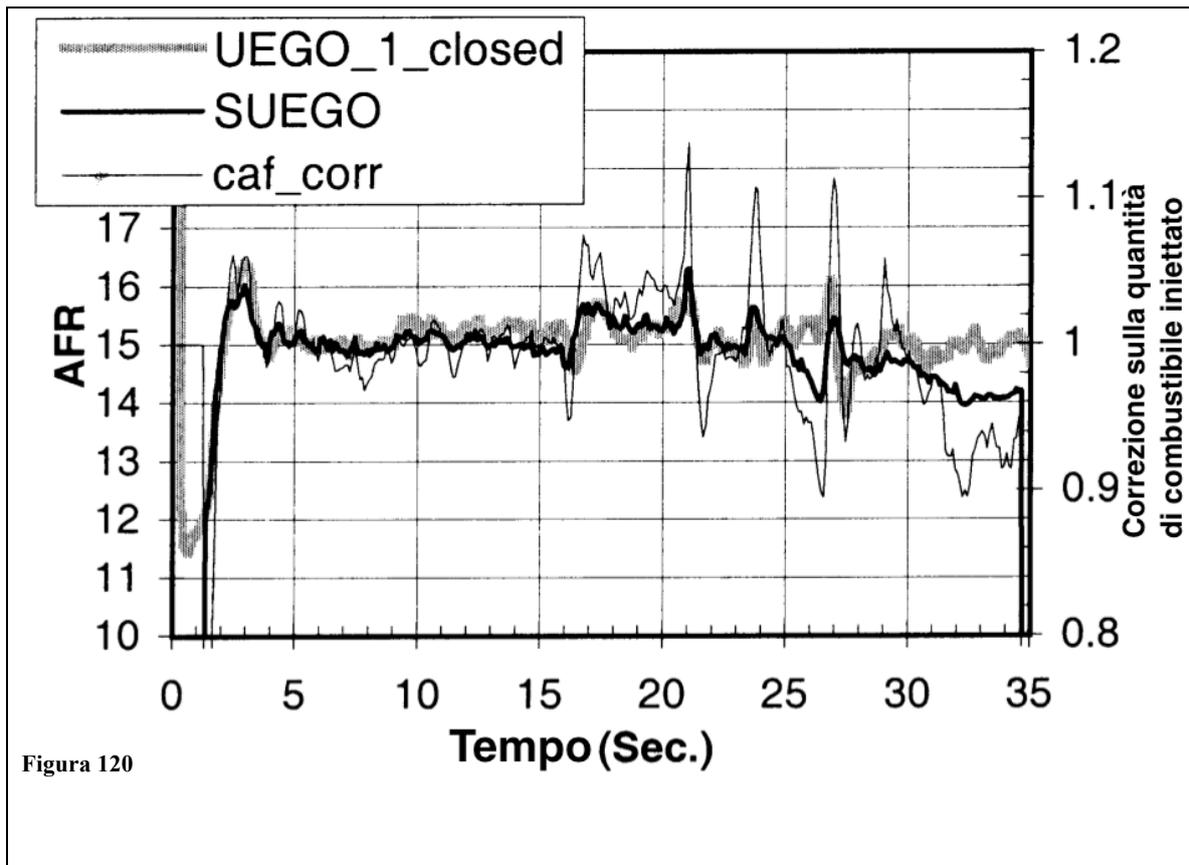


Figura 120

Per i primi 25 secondi, fino alla cambiata, il funzionamento della SUEGO è quasi perfetto, la variabile “caf_corr” mostra come il controller interviene al fine di correggere la quantità di combustibile iniettato. Una procedura simile è poi stata adottata in tre test utilizzando un sensore UEGO per la verifica del controllo in feedback basato sul sensore SUEGO. Tale verifica è stata effettuata a tre diverse quantità di combustibile iniettato: nominale, incrementata del +10%, e ridotta del -10%; notando grossi miglioramenti.

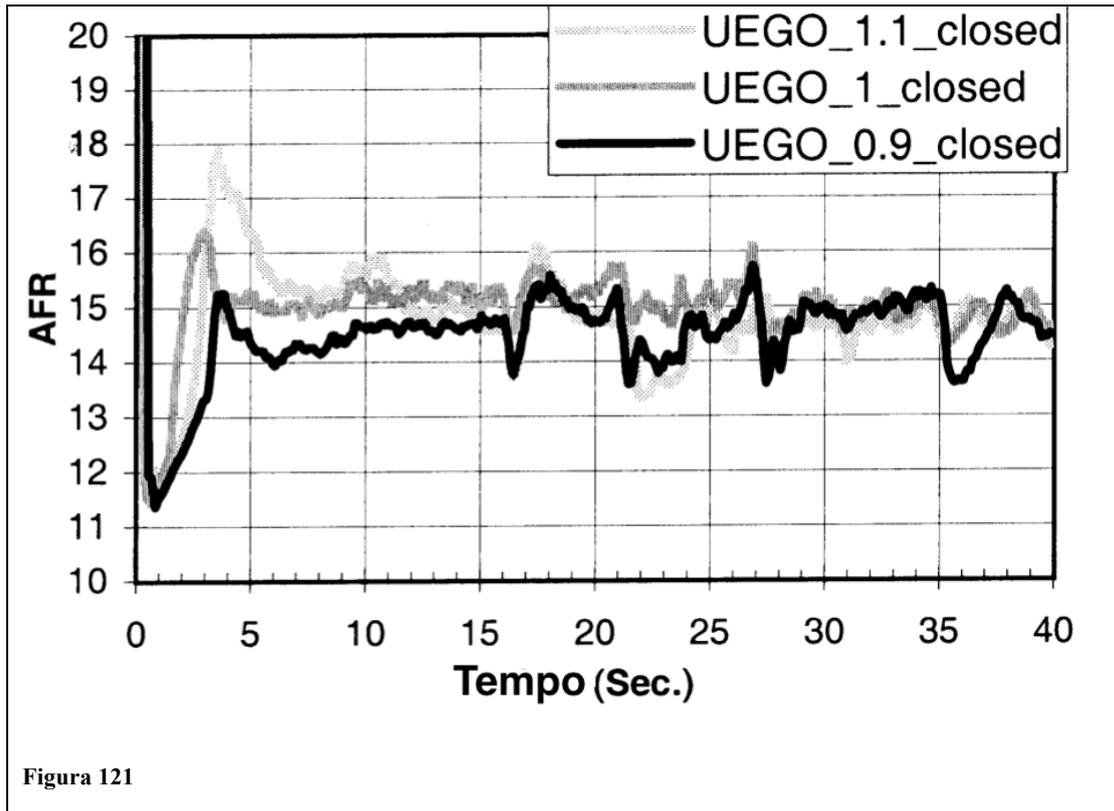


Figura 121

Infine si sono comparati i risultati generati da un controllo ad anello aperto, utilizzando una sonda UEGO e i risultati prodotti da un controllo in feedback basato sul segnale della SUEGO e misurando gli effetti sempre tramite una UEGO (alla quantità nominale di AFR).

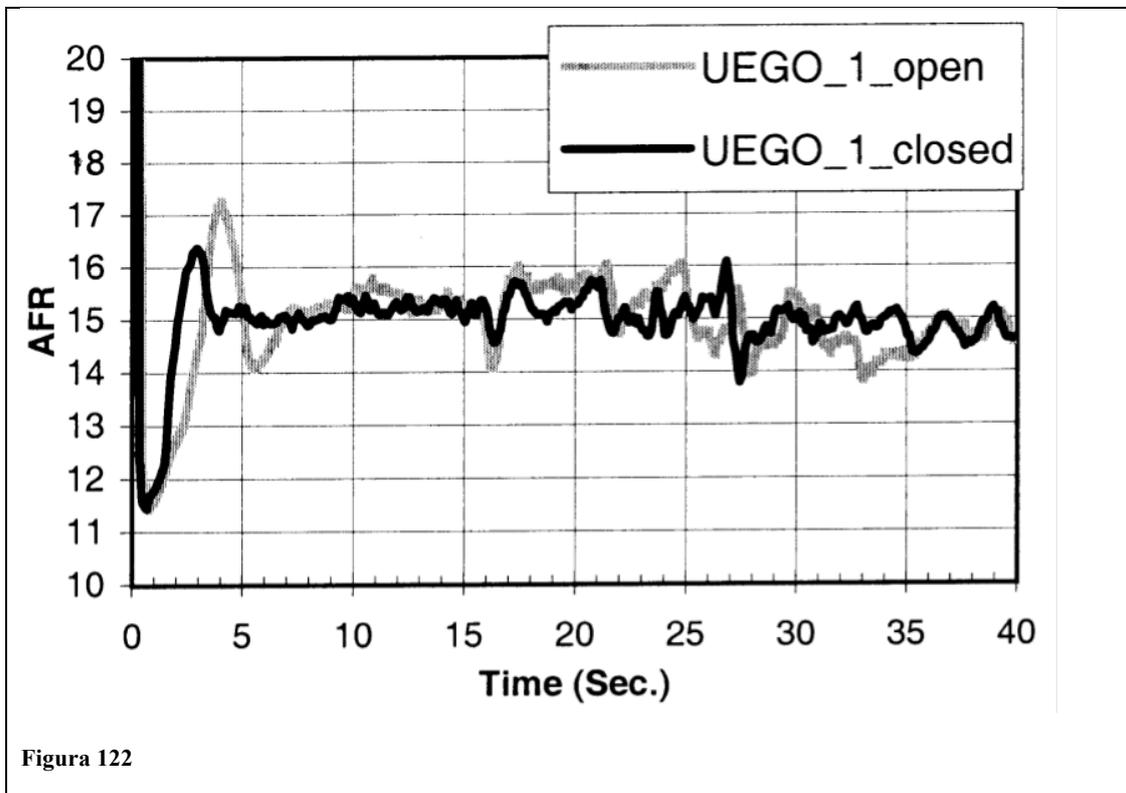


Figura 122

Si vede così molto chiaramente come la SUEGO fornisca aiuto nel controllo dell'AFR, intervenendo con un buon anticipo sulle fluttuazioni, rispetto al controllo ad anello aperto. Si sono poi riportati in tabella i risultati generati dal confronto.

Tabella 10

Controllo	Combustibile	AFR_fg	Dev. Standard	Errore_m
Aperto	1.00	15.12	0.71	-0.02
Aperto	0.90	16.40	1.26	-1.14
Aperto	1.10	13.58	0.53	0.70
Chiuso	1.00	15.12	0.37	-0.14
Chiuso	0.90	14.93	0.83	-0.21
Chiuso	1.10	14.56	0.53	-0.25

Conclusioni sulla SUEGO:

- Sebbene a prima vista il modello non sembri esser dinamico, poiché non vi sono presenti derivate rispetto al tempo, nell'equazione del transitorio sono presenti informazioni riguardanti la variazione di alcuni parametri in un breve intervallo. Il parametro **metric** ad esempio è stato definito come differenza (di tick del microprocessore) fra due eventi adiacenti d'ingrassamento e smagrimento della miscela.
- Per quanto riguarda invece l'avvelenamento, dopo un periodo di due anni l'invecchiamento ha prodotto uno scostamento dei risultati verso miscele più magre.
- È utilizzabile anche per il controllo di miscele non stechiometriche.
- Poiché risente dei misfire generando valori anomali, si può utilizzare per rilevare tale fenomeno.
- L'utilizzo più concreto resta comunque quello del controllo dei transitori in motori SI con l'equazione a più variabili presentata sopra, al di fuori del transitorio si può continuare il controllo con l'equazione semplificata di regime.

4.2 MISURAZIONE CICLO PER CICLO DELL'AFR UTILIZZANDO SENSORI NDIR A RISPOSTA RAPIDA

BIBLIOGRAFIA indice 12

Sensori NDIR

Le misure dell'analizzatore NDIR si basano sul principio che un gas attraversato da una radiazione infrarossa assorbe energia su di una particolare lunghezza d'onda, legata alle caratteristiche della sua struttura atomica. La figura sotto riportata mostra lo schema di un analizzatore a lettura differenziale. Il termine non dispersivo si deve al fatto che gli analizzatori NDIR utilizzano l'assorbimento totale su di una data lunghezza d'onda, senza la necessità di uno strumento dispersivo (prisma o reticolo) per risolvere particolari linee dello spettro. Le sorgenti infrarosse sono costituite da filamenti riscaldati elettricamente che emettono su un vasto campo di frequenze. Con riferimento alla figura, le due celle di misura C e D uguali, contenenti gas del tipo da analizzare, sono divise da una membrana M che costituisce una delle armature di un condensatore elettrico. I raggi infrarossi provenienti dalla sorgente giungono alle due celle dopo aver attraversato due volumi cilindrici, con basi trasparenti alla radiazione infrarossa.

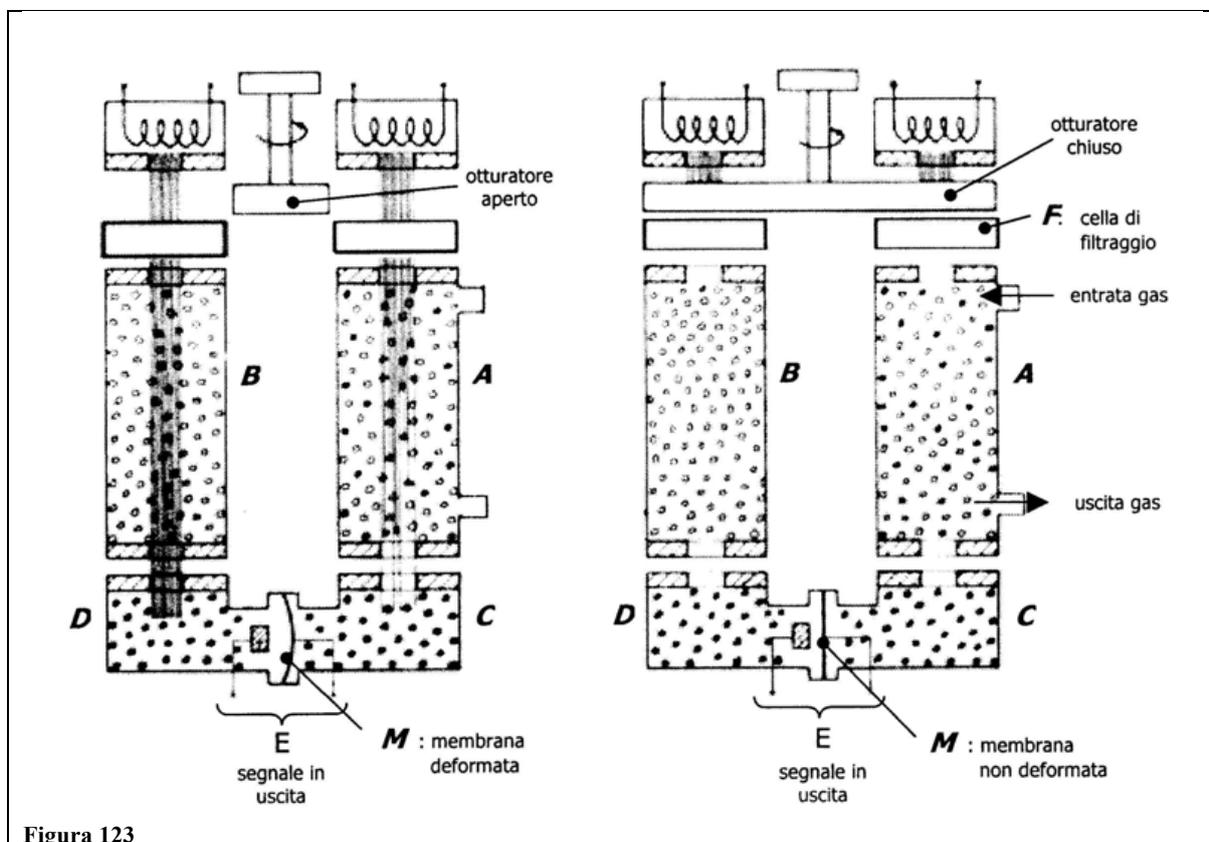


Figura 123

Il primo (B) contiene un gas non assorbente (N_2) e serve come riferimento, mentre il secondo (A) è attraversato dal gas da analizzare. Quando nella cella A transita un campione di gas in cui è contenuta la specie da analizzare, questa assorbe una quantità di energia funzione della sua concentrazione. Il gas nella cella di misura C, a causa della quantità minore di energia assorbita, subisce un innalzamento di temperatura e di pressione minore rispetto a quello della cella D. Di conseguenza, si ha uno spostamento della membrana M, funzione della concentrazione del componente da analizzare, rilevato e trasformato in un segnale elettrico da appositi trasduttori. Un otturatore rotante ottico serve a modulare le sorgenti ad una frequenza di circa 10 Hz, per ottenere un riferimento di zero.

Poiché le bande di assorbimento del CO e della CO_2 in parte si sovrappongono, la presenza dell'uno modifica la lettura dell'altra. La cella di filtraggio F fra la sorgente e le celle A e B permette di superare questo problema. Se, ad esempio, si analizza il CO , la cella di filtraggio è riempita di CO_2 , il gas in F assorbe la radiazione che produrrebbe l'interferenza, e la CO_2 eventualmente presente in A non trova più energia da assorbire nelle banda interessata.

L'invecchiamento differente delle sorgenti e lo sporco accumulato sulle celle, provocano una notevole deriva del segnale in uscita dall'analizzatore, e inoltre le variazioni di densità del gas sono fonte di ulteriori disturbi. Per questi motivi lo strumento deve essere tarato frequentemente: lo zero e un altro punto sulla scala devono essere regolati ad ogni misura, intercalando l'attraversamento della cella A con una miscela gassosa campione.

Gli effetti dello sporco accumulato sulle finestre sono ridotti filtrando accuratamente il gas da analizzare, rimuovendo così ogni particella solida e trattandolo a bassa temperatura separando per condensazione la maggior parte dell'acqua e degli idrocarburi pesanti.

Purtroppo a causa del loro ingombro e del loro prezzo, per adesso eccessivo, il loro impiego in campo automotive è limitato alla fase di analisi su banco. Di seguito un'immagine di questo sensore per dare un'idea di come si presenta:



Figura 124

Applicazione allo studio dei transitori d'accensione

La tipologia di sensore appena descritto può essere utilizzato dai costruttori di autovetture e ricercatori per studiare il comportamento dei motori durante le partenze a freddo, dov'è richiesta una prontezza del sistema di controllo assai elevata.

Sebbene siano già in commercio da parecchi anni sensori in grado di misurare le emissioni d'idrocarburi, non è finora possibile capirne la causa (ad esempio se la loro formazione deriva da combustioni o troppo magre o troppo grasse). Questo è dovuto alla rapida evoluzione delle condizioni in cui il motore si trova nei primi 2-3 secondi di funzionamento.

Tale caratteristica dei motori ha portato ad analisi in tempo reale con tempi di risposta rapidi impiegando trasduttori di pressione in camera e sensori dei gas di scarico "veloci".

Utilizzando sensori più recenti in grado di analizzare velocemente il monossido di carbonio e l'anidride carbonica tramite NDIR si riesce a raggiungere un $T_{90-10\%}$ dell'ordine di 8 millisecondi. Con un tempo di salita così rapido (in confronto ai tradizionali sensori UEGO i quali raggiungono i 100 ms) si ha la possibilità di analizzare i processi di formazione degli inquinanti più dettagliatamente, anche durante i transitori.

Calcolare λ dalla composizione dei gas di scarico dà la possibilità ai ricercatori di scegliere se:

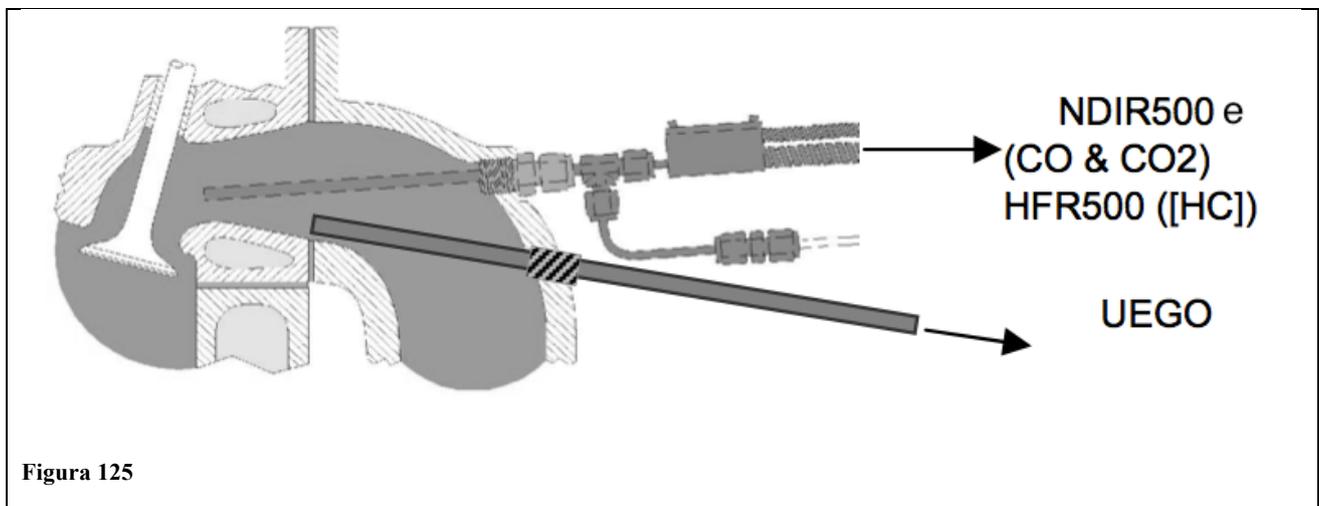
- Studiare l'andamento di λ utilizzando solo il sensore di CO&CO₂, individuando così le caratteristiche allo scarico del singolo cilindro.
- Oppure con l'aggiunta di un sensore di HC "veloce" misurare la totalità delle emissioni allo scarico.

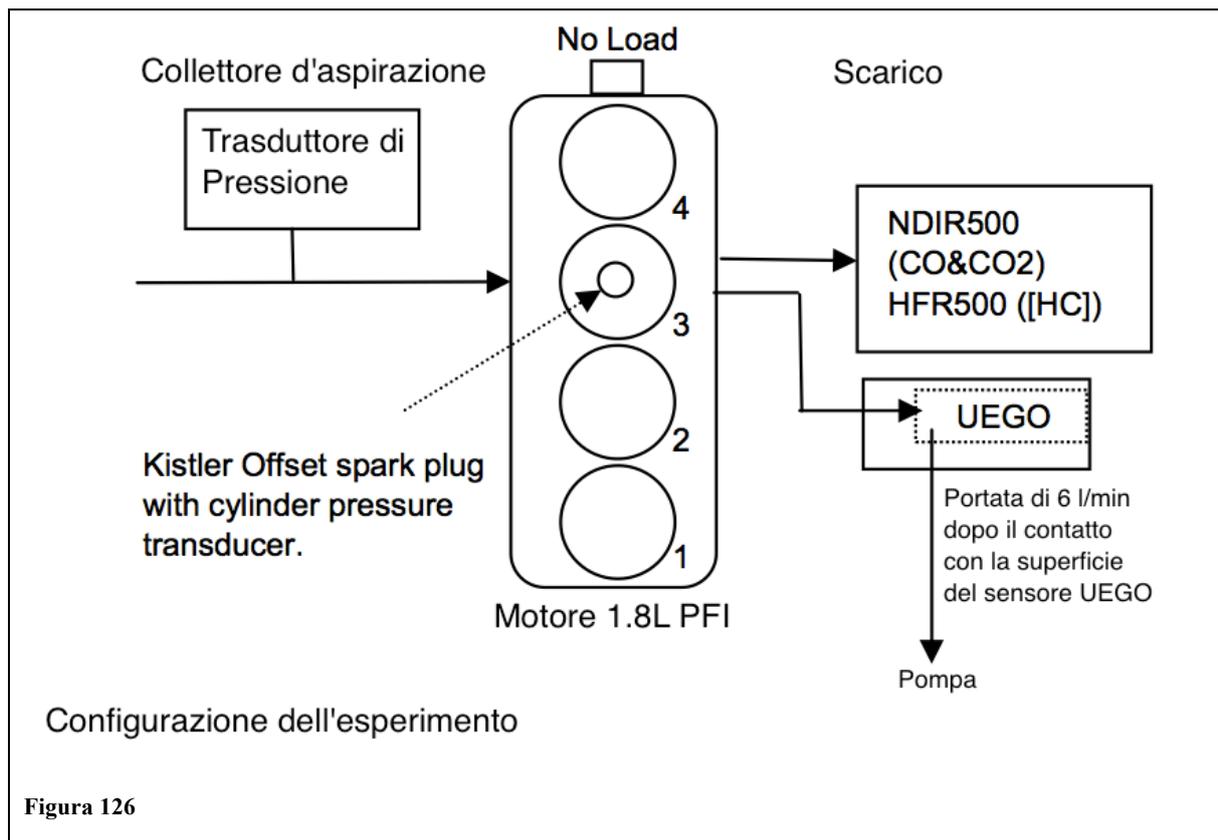
Strumentazione adottata per la comparazione dei sensori NDIR e HC con la tradizionale UEGO e relativo posizionamento

La strumentazione principale utilizzata per questo esperimento è composta da:

- Iniettore PFI per motore a benzina
- Trasduttore di pressione in camera
- Sensore UEGO
- Sistema di acquisizione a 8 canali
- Sensori CO, CO₂(NDIR), HC(FFID).
- Macro in MS Excell in grado di post-processare i dati derivati dai sensori CO, CO₂, HC rapidamente.

Il motore su cui sono stati effettuati gli esperimenti è un 1800 di cilindrata, quattro cilindri a iniezione diretta. Il motore è stato montato in una specie di serra a bassa temperatura assieme al proprio radiatore ma senza dinamometro poiché fatto funzionare al minimo. Il motore utilizzato è del 1990 per cui la sua calibrazione non soddisfa l'odierna legislazione, ma è comunque adatto allo studio. Per lo studio si è scelto di analizzare un solo cilindro, il n. 3 per la precisione, la scelta è stata compiuta basandosi sulla facilità di accesso ad esso, il sensore NDIR è stato posizionato approssimativamente a 40 mm dalla valvola di scarico come illustrato nelle figure:





Iniettori PFI

Gli iniettori PFI sono la famiglia di componenti comunemente impiegata sui sistemi di iniezione indiretta per autoveicoli leggeri ma, sempre più spesso, anche per applicazioni su motocicli e piccoli motori in genere.



Figura 127

La funzione primaria di questo iniettore, e anche di tutti gli altri, è quella di trasformare il segnale elettrico di comando ricevuto dalla centralina elettronica (ECU) nell'esatta quantità di carburante necessaria al motore per una corretta combustione.

Trasduttore di pressione

Per il monitoraggio della pressione in camera così da monitorare la qualità della combustione e rilevare eventuali misfire è stato montato un trasduttore Kistler 6117A assieme a un amplificatore di carica Kistler 50011.

Descrizione del sensore UEGO

Il sensore UEGO utilizzato nei test è un HORIBA MEXA-700, il sensore UEGO è stato piazzato al termine di un tubo lungo 220mm, e 3,8 mm di diametro. Il tubo si insinua per 20 mm all'interno dello scarico vero e proprio e vede al suo interno una portata di 6 l/min ottenuta utilizzando una pompa. Questa aspirazione genera un ritardo di circa 65 ms dovuto all'attraversamento del tubo da parte dei gas. Il sensore HEGO già compreso nel motore per il controllo in feedback della combustione è stato lasciato al proprio posto senza alcuna modifica.

Acquisizione dei dati

I dati sono stati registrati su un computer utilizzando una piattaforma d'acquisizione NI PCMCIA a 8 canali di input e Labview come interfaccia grafica.

Macro in MS Excel

Una delle potenzialità più importanti di Excel è la possibilità di scrivere delle macro, veri e propri pezzi di codice che possono eseguire in automatico qualsiasi comando. Il linguaggio di programmazione delle macro di Excel è Visual Basic for Applications (VBA), un linguaggio di programmazione ad oggetti (anche se non possiede tutte le caratteristiche della programmazione orientata agli oggetti) che utilizza la dot notation. Tramite il codice VBA è possibile scrivere macro che modificano le proprietà degli oggetti (ad esempio il colore di una cella), lanciare metodi (ad esempio il refresh di una pivot table) e reagire ad un evento (ad esempio eseguire un pezzo di codice quando viene modificato il contenuto di una cella).

Per visualizzare il codice contenuto in un *file* Excel, o scriverne di nuovo, occorre selezionare il menu *Tools/Macro/Visual Basic Editor*. Per visualizzare il codice associato a un singolo foglio Excel, occorre selezionare la linguetta del foglio, tasto destro del *mouse* e *Visualizza codice sorgente*: in questo caso, la

macro sarà ripetuta ogni volta che si apre il foglio Excel. Per eseguire una macro occorre invece selezionare il menu *Tools/Macro/Macro*.

La macro utilizzata nell'esperimento è stata scritta al fine di riuscire ad acquisire la totalità dei dati raccolti dal NDIR 550 il quale genera i dati che ci interessano ogni 8 ms (8ms a 700RPM=33,6 gradi di manovella). La Macro scritta lascia all'operatore la scelta di includere o meno, i dati relativi agli idrocarburi ottenuti tramite un FFID, deselezionando l'opzione le valutazioni sulla combustione si basano solo sulla quantità di CO E CO₂ prodotti.

Poiché le valutazioni fatte sono influenzate dal rapporto d'idrogeno-carbonio del combustibile e dalla quantità di ossigeno che esso contiene occorre specificare questi due valori. La molecola di combustibile generica ha un rapporto $\frac{\text{atomi_idrogeno}}{\text{atomi_carbonio}} = 1,73$ mentre il rapporto d'ossigeno presente è 0,009.

NDIR500 per la rapida analisi di CO&CO₂

Questo genere di sensore sviluppato a Cambustion nel 1999, inizialmente era in grado di misurare la sola CO₂, due anni più tardi lo sviluppo tecnologico ne ha migliorato la sensibilità e a reso in grado il sensore di campionare contemporaneamente anche la CO.

Nel sensore impiegato vi sono due teste in grado di operare fino a 10 metri di distanza dall'unità di controllo, grazie a ciò gli elementi sensibili si possono posizionare a breve distanza dal motore in modo da evitare ritardi dovuti alla velocità del flusso. Lo strumento è controllato da un PC tramite l'interfaccia sviluppata in Labview.

Il gas da campionare attraverso uno stretto capillare riscaldato arriva fino alla camera a bassa pressione in corrispondenza del sensore ottico che emette infrarossi a banda larga dalla sommità della testa e irradia il campione presente nella camera. I filtri ottici presenti ne controllano l'assorbimento e la lunghezza d'onda individuando quelle generate da CO, CO₂ ed evitando quelle prodotte da altri elementi come l'H₂O. Il sistema dotato di due teste sensibili genera 4 output contemporaneamente che vengono poi linearizzati dall'unità di controllo principale e il risultato finale è un segnale analogico da 0-10V.

HFR500 FAST FID (sensore d'idrocarburi)

Per la rilevazione degli HC si è utilizzato un FFID già presentato e descritto precedentemente, il tempo di salita (T_{10-90%}) è di un solo ms.

Svolgimento dell'esperimento

Dopo il posizionamento illustrato precedentemente si sono eseguite delle partenze a freddo del motore alla temperatura ambiente di $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, il serbatoio impiegato è quello proprio del motore in cui è presente la benzina a 95 ottani senza piombo, la batteria è stata completamente caricata prima dei test. La seguente procedura di acquisizione dei dati è stata ripetuta per ciascuna delle 5 prove:

Le partenze sono state condotte a una temperatura ambiente di $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ dopo una notte ammollo con un solo serbatoio di regolare pompa-grade 95 ottani della benzina senza piombo e la batteria completamente carica. La seguente procedura per la registrazione dei dati è stata ripetuta per ciascuna delle 5 prove:

1. Accensione e “warm-up” dell’analisi per almeno 1 ora.
2. Calibrazione dei sensori e ripristino dell’amplificatore di carica del trasduttore di pressione.
3. Spurgo delle condotte utilizzando aria compressa per almeno 2 minuti.
4. Rotazione manuale del motore fino a far arrivare il cilindro #1 alla posizione di PMS.
5. Accensione dell’impianto e quindi anche della pompa del carburante per 2 secondi.
6. Messa in moto al minimo.
7. Registrazione dei dati (a 1 kHz) per i primi 10 secondi di funzionamento.
8. Mantenimento del motore a velocità elevate(> 3000 RPM) per 10 minuti.
9. Spegnimento del motore che viene poi lasciato raffreddare una notte prima della ripetizione del test.

I dati così ottenuti sono stati elaborati e riportati in Excel.

Per via della diversità dei dati campionati e per una maggior chiarezza si è scelto di non sovrapporre le caratteristiche dei vari sensori l’una sopra l’altra bensì di dividerle in più grafici e per ognuno di essi discuterne più approfonditamente.

Grazie al trasduttore di pressione, durante la corsa di scarico è possibile vedere l’andamento della caratteristica corrispondente alla pressione. Contemporaneamente a questa informazione, mentre la valvola di scarico si

apre, si registrano:

1. La variazione di concentrazione d'idrocarburi presenti nei gas.
2. La variazione del valore rappresentante la concentrazione di CO e CO₂ tale variazione si registra leggermente in ritardo rispetto a quella degli HC a causa di una costante di tempo leggermente maggiore.

L'asse temporale ha l'origine coincidente con l'avviamento del motore.

Nei primi due secondi di funzionamento la combustione del motore è ruvida e irregolare, dopo tale periodo il motore diventa più regolare e riesce a mantenere meglio il minimo, l'irregolarità delle combustioni si riduce e con essa anche i livelli di emissioni. La quantità di CO, CO₂ e HC misurate sono poi introdotte in una funzione ricavando così il valore di λ e gli eventuali misfire verificatisi durante la combustione.

Partenza a freddo n.1: Risultati e Analisi

Lo stesso procedimento ora descritto è stato applicato a tutte e cinque le prove. Ricordando che il segnale di pressione fornisce le indicazioni sul tempo di apertura della valvola di scarico e sulla qualità della combustione i dati acquisiti si sono rappresentati in funzione del tempo come nel seguente grafico:

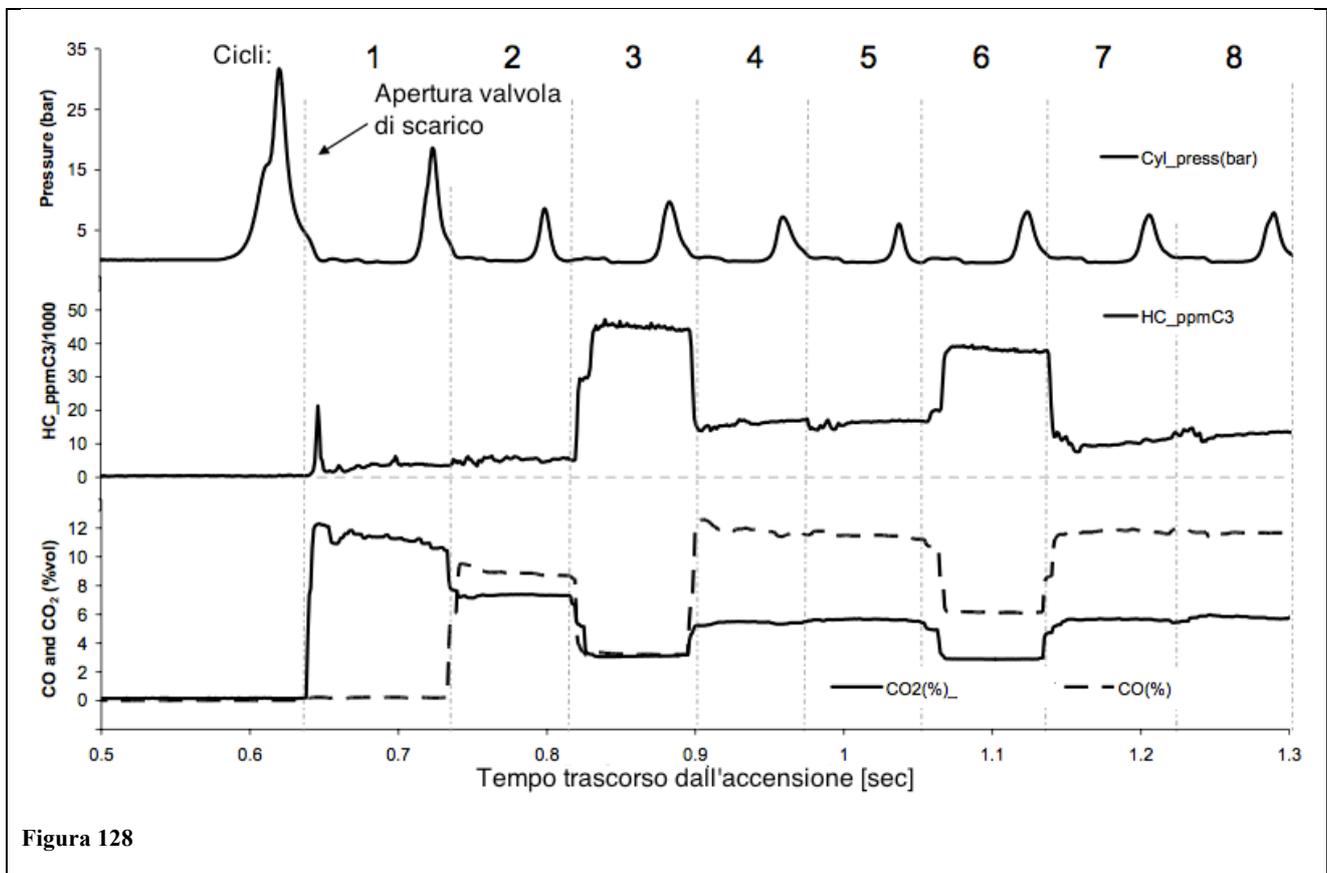


Figura 128

Con riferimento al grafico qui sopra si può vedere come effettivamente i sensori impiegati abbiano una risposta sufficientemente veloce per l'analisi ciclo per ciclo.

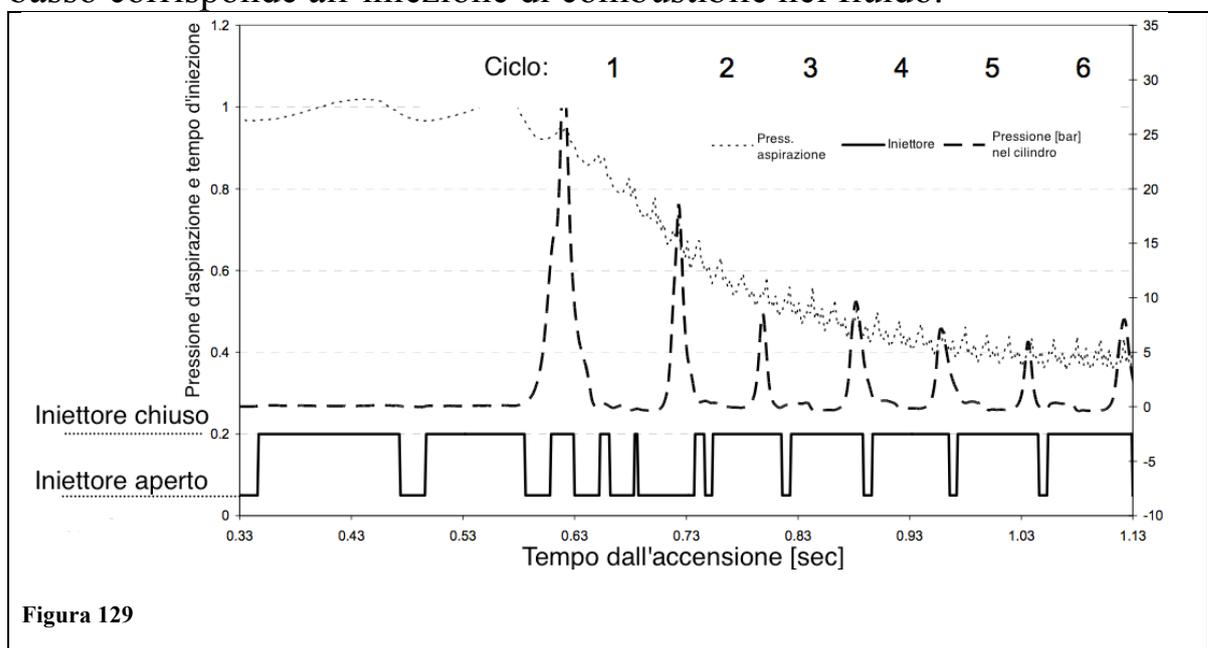
Dalle misurazioni effettuate sui gas, si possono fare osservazioni ciclo per ciclo:

Ciclo 1:

- La percentuale in volume di CO₂ si mantiene approssimativamente costante sull'11%.
- La percentuale di CO invece è veramente bassa, solo uno 0,23%.
- La quantità d'incombusti è anch'essa relativamente contenuta se non fosse per un picco di 20000 ppmC₃, accumulatisi probabilmente sulle pareti del cilindro.
- Dall'andamento della pressione si nota invece un ritardo, conseguenza della disomogeneità della carica presente in camera.

Ciclo 2:

- L'8% di CO indica una combustione grassa. Ciò può essere confermato anche dall'input che arriva all'iniettore, in cui il segnale (di tipo binario) basso corrisponde all'iniezione di combustibile nel fluido.



Dalla figura si vede come il segnale durante il primo ciclo e nella prima parte del secondo sia prevalentemente basso, iniettando quindi una grossa quantità di combustibile che porta alla formazione di una miscela grassa.

Ciclo 3:

- Nel terzo ciclo l'eccesso di combustibile provoca la mancata accensione della miscela, quando ciò avviene i livelli in % di CO e CO₂ hanno lo stesso valore, poiché entrambi vengono rapportati allo stesso valore in aspirazione. Tuttavia, nel terzo ciclo le tre concentrazioni non assumono tutte e tre lo stesso valore, questo potrebbe essere causato da fattori quali l'ossidazione della CO in CO₂ che riduce la concentrazione del primo elemento incrementando invece quella del secondo.

Cicli 4 e 5:

- Nel quarto e quinto ciclo la composizione della miscela è ancora grassa causando un misfire al sesto. Conseguentemente i cicli successivi diventano sempre meno ricchi e dopo 10 secondi lambda tende a stabilizzarsi nell'intorno di 0,8.

Ciclo 6:

- Nel sesto ciclo (dopo appena 2.4 secondi) la variazione di CO e CO₂ di 0,54 rispetto al valore assunto in precedenza, indica la presenza di un misfire. Questo è poi confermato dal basso picco di pressione rilevato.

Comparazione di λ fra il metodo appena descritto e il tradizionale sensore UEGO

Le misurazioni di λ effettuate con il metodo innovativo appena descritto sono state confrontate con quelle del sistema più tradizionale tramite UEGO e riportate nel medesimo grafico:

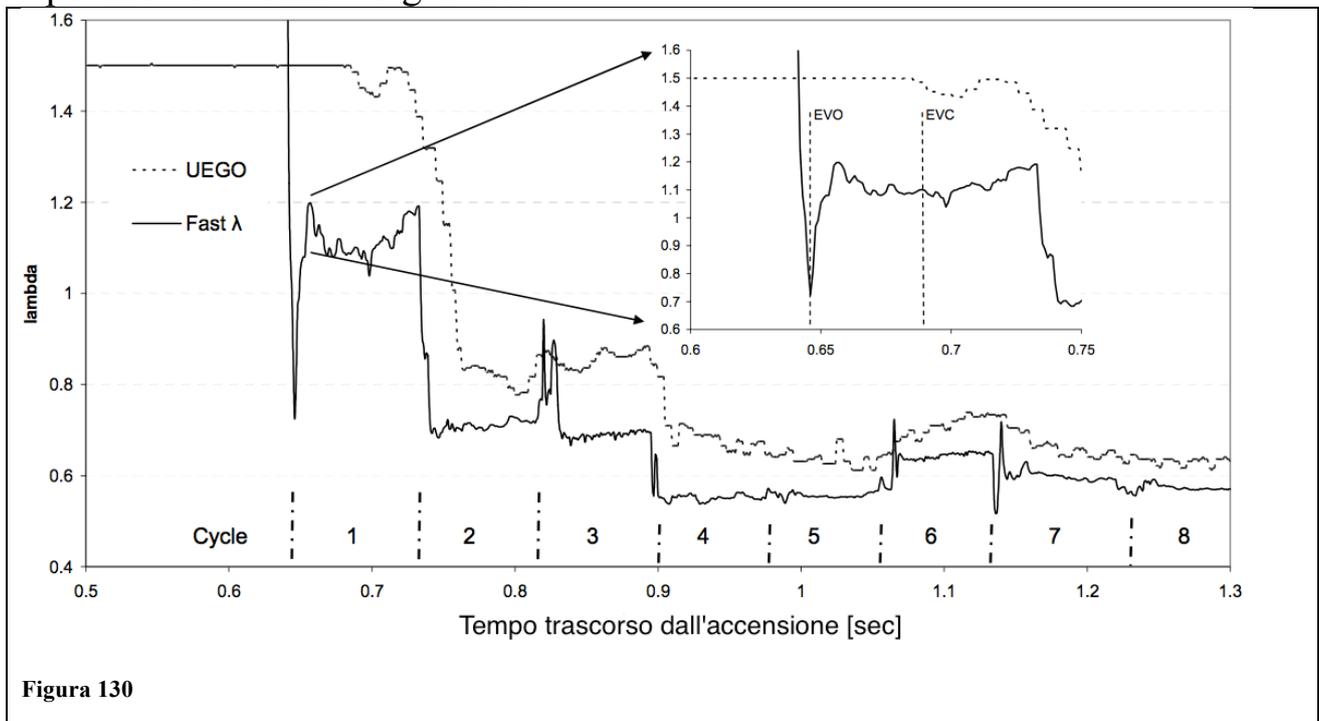


Figura 130

La differenza in termini di costante di tempo è evidente dalla frequenza di oscillazione del segnale. Durante il primo ciclo la misurazione “fast” (veloce) assume un valore di $\lambda=1,1$ (media del ciclo), il sensore UEGO invece non genera una misurazione affidabile e si capisce dalla costanza del segnale, pari a quello del ciclo “0”. Il segnale del sensore più lento deriva dalla corrente necessaria a mantenere all’interno della sua camera di riferimento il livello di ossigeno corretto. Quando l’uscita del sensore satura, le misurazioni iniziano a migliorare e dopo un certo periodo, gli output possono essere assunti come validi.

Anche in questo si ricorre a un’analisi ciclo per ciclo.

Ciclo 1:

- A causa del ritardo d’accensione della miscela la “fast λ ” vede un’iniziale picco grasso prima di assumere valori nell’intorno dell’1,1.

Cicli 2 e 3:

- I due cicli successivi invece sono grassi, e possibile vedere che vi sono differenze rilevanti fra i risultati letti con il sensore UEGO e quelli letti con la fast λ .

Cicli 4 e 5:

- Esaminando i cicli 4 e 5 si vede come la fast λ misuri $\lambda=0,55$ mentre il sensore UEGO vede $\lambda=0,66$. Tale differenza può essere attribuita a una caratteristica del sensore UEGO. In presenza di elevate quantità di HC infatti l’output di questo sensore cala di affidabilità, misurando miscele più magre della realtà.

I picchi visti durante l’apertura della valvola di scarico, nelle misurazioni “fast λ ”, sono dovute a un leggero disallineamento dei dati relativi agli HC e CO/CO₂. Il HFR500 e la NDIR500 campionano a istanti di tempo diversi, per cui l’asse del tempo dei dati in uscita dall’NDIR500 è stato spostato manualmente di circa 20ms allineandolo con quello dell’HFR500 in modo tale che i campionamenti siano contemporanei. Tale procedimento è comunque difficile da automatizzare con precisione sul Macro.

Difetti della misurazione UEGO:

Il ritardo tra il sensore UEGO e il “fast λ ”, in parte, è anche dovuto al tragitto del fluido lungo il tubo prima di arrivare al sensore. Tale ritardo assumendo una portata costante di 6 litri/min a una temperatura di 30°C e pressione di aspirazione di un bar è approssimativamente pari a 30 ms che vanno sommati ai 24ms impiegati per arrivare fino al tubo. La caratteristica generata dal sensore UEGO è così stata brutalmente allineata traslando l’asse dei tempi di -38ms e allineando le due misurazioni.

Va ribadito, poiché dalle misurazioni non si nota, che durante i cicli in cui si verificano misfire i dati raccolti col sensore più tradizionale non sono affidabili.

Dal secondo 2.8 in poi lo scostamento fra le due misurazioni effettuate con il “fast λ ” e l’UEGO tende a calare, ottenendo una miglior sovrapposizione delle due caratteristiche.

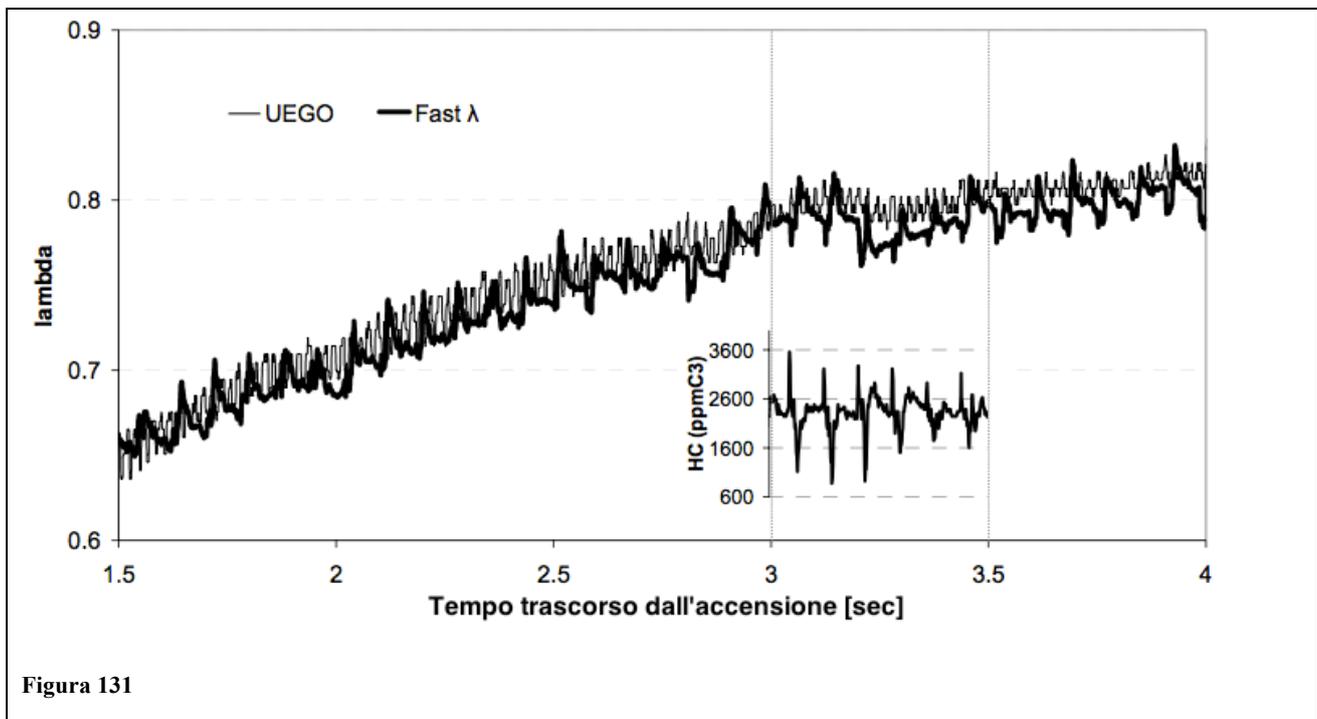


Figura 131

Questo è dovuto al raggiungimento delle condizioni di regime del motore, che corrisponde a basse emissioni d'idrocarburi con tutti i relativi benefici che ne derivano per la misurazione del sensore UEGO.

Difetti della misurazione “fast λ ” :

Il grafico riportato mostra la caratteristica del “fast λ ”, l’andamento ciclico è causato da un output irregolare degli HC durante ogni corsa di scarico come si vede dall’inserito posto a 3 secondi. Questa irregolarità nella misurazione è dovuta al transitorio di apertura della valvola di scarico (quando l’apertura è molto piccola) e probabilmente anche a una distribuzione disomogenea degli HC in camera che fuoriescono per primi.

Il rumore nella misurazione può essere visto anche sulla caratteristica UEGO, risultando proporzionale alla velocità del motore.

La NDIR500 a causa dell’interazione con l’acqua presente allo scarico può produrre un errore dell’1%, per ogni punto percentuale di volume d’H₂O presente allo scarico. Questa interazione provoca una lettura eccessiva di CO₂ che nel peggiore dei casi arriva a $\approx 10\%$ producendo un errore del +4,8% sulla lettura di λ . Durante le combustioni ricche nelle partenze a freddo questo incremento è tipicamente del 2,5%, uno scostamento comunque contenuto quindi, non rilevante per il confronto con il sensore UEGO.

Ripetibilità

Per tener conto della ripetibilità dell’esperimento, un fattore assai importante per qualunque tipo di esperimento, si sono confrontati i cinque set di misurazioni effettuati tutti seguendo lo stesso modus operandi. Se dall’analisi del motore, fatto funzionare nelle medesime condizioni, fuoriescono risultati simili allora le misurazioni si possono considerare con un buon grado di ripetibilità. Di seguito sono riportati i risultati delle misurazioni partendo dal confronto, in termini di ripetibilità, dell’andamento della pressione in camera.

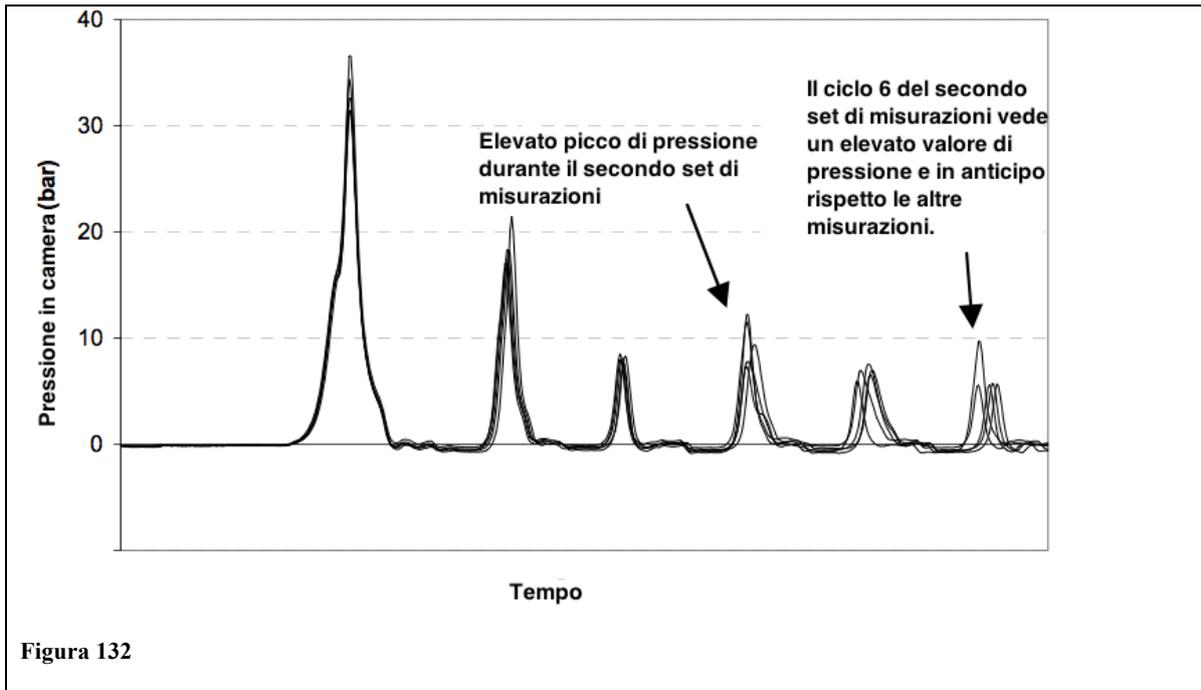


Figura 132

Dalla sovrapposizione delle caratteristiche di pressione emerge uno scostamento, in termini di tempo, del 3.1% fra i picchi dal primo al sesto ciclo.

Il primo ciclo presenta una combustione ritardata. Studiando i dati raccolti è confermata la presenza di un misfire per tutte le ripetizioni al terzo ciclo. Anche nel sesto ciclo nell'80% dei casi avviene un misfire: l'elevato grado di ripetibilità è probabilmente dovuto alla stessa posizione del motore e alla stessa fasatura all'accensione del motore.

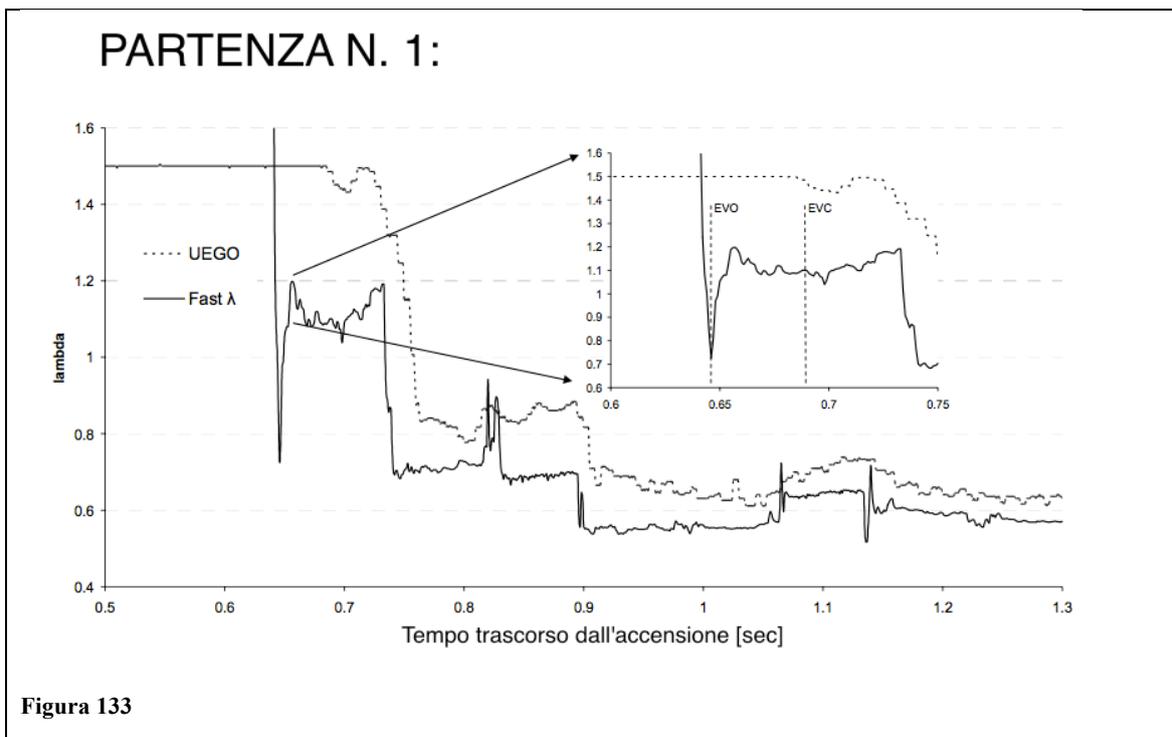


Figura 133

Partenza N. 2

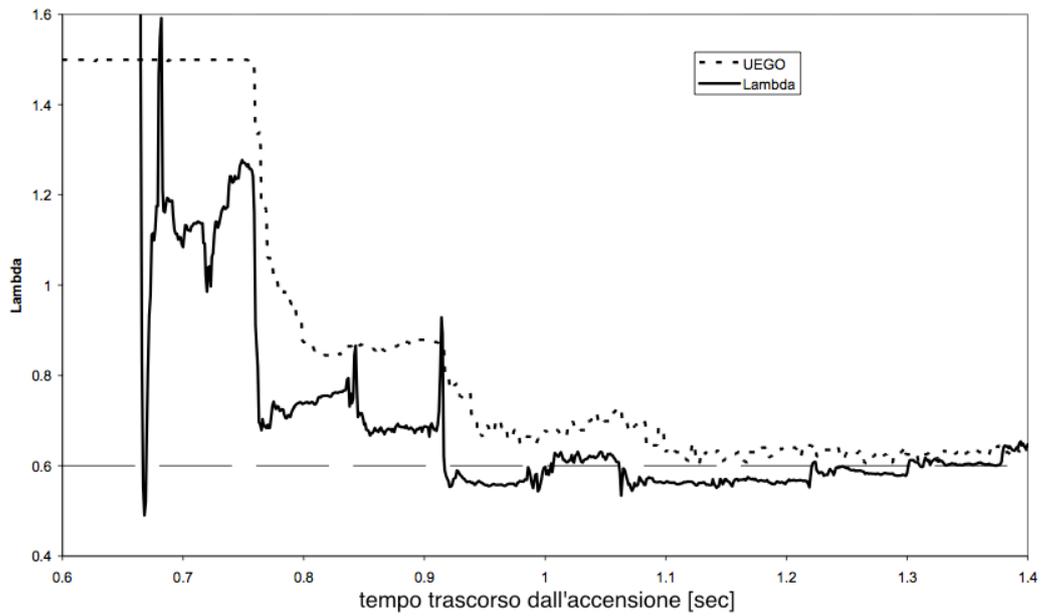


Figura 134

Partenza N. 3

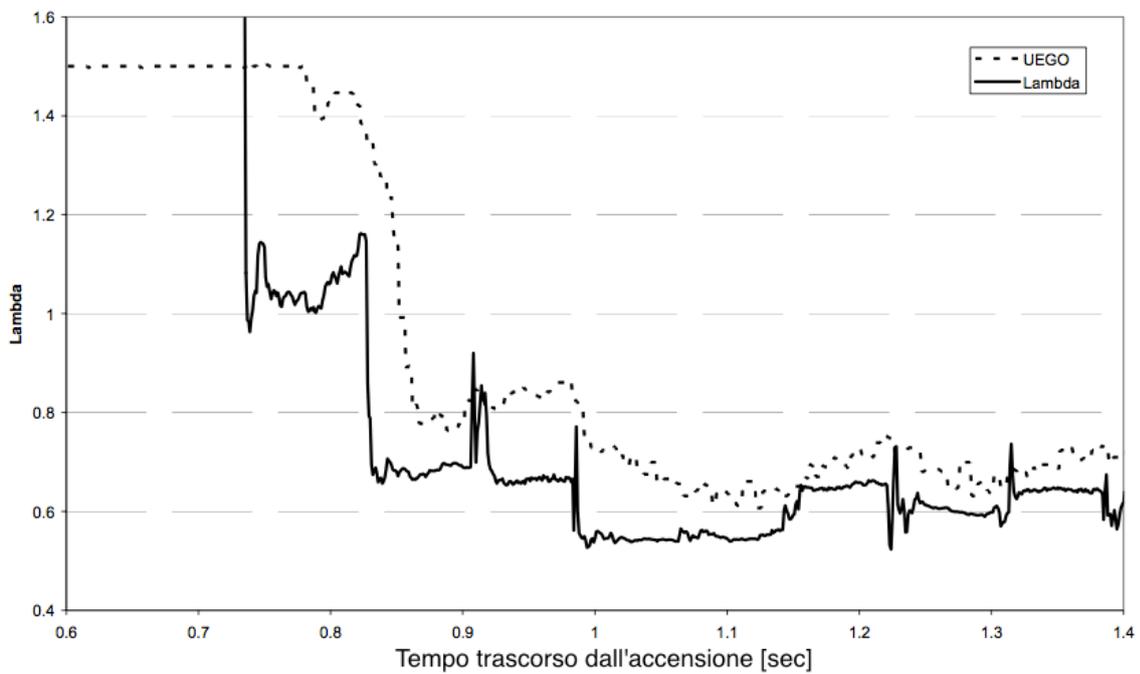


Figura 135

Partenza N. 4

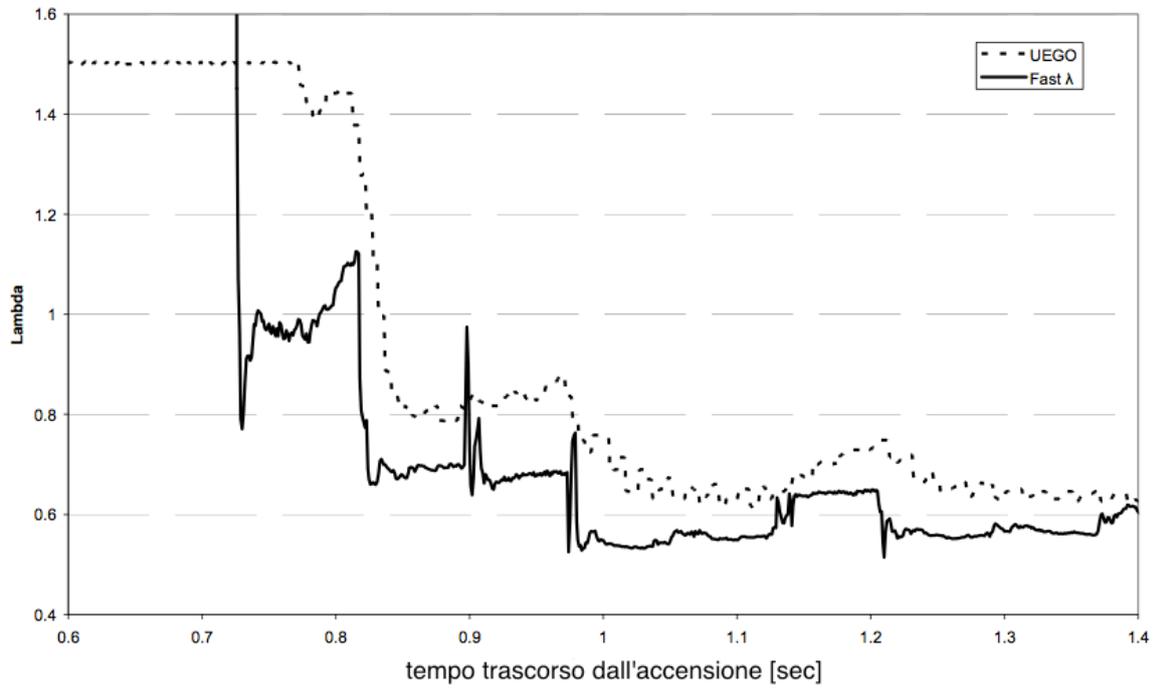


Figura 136

Partenza N.5

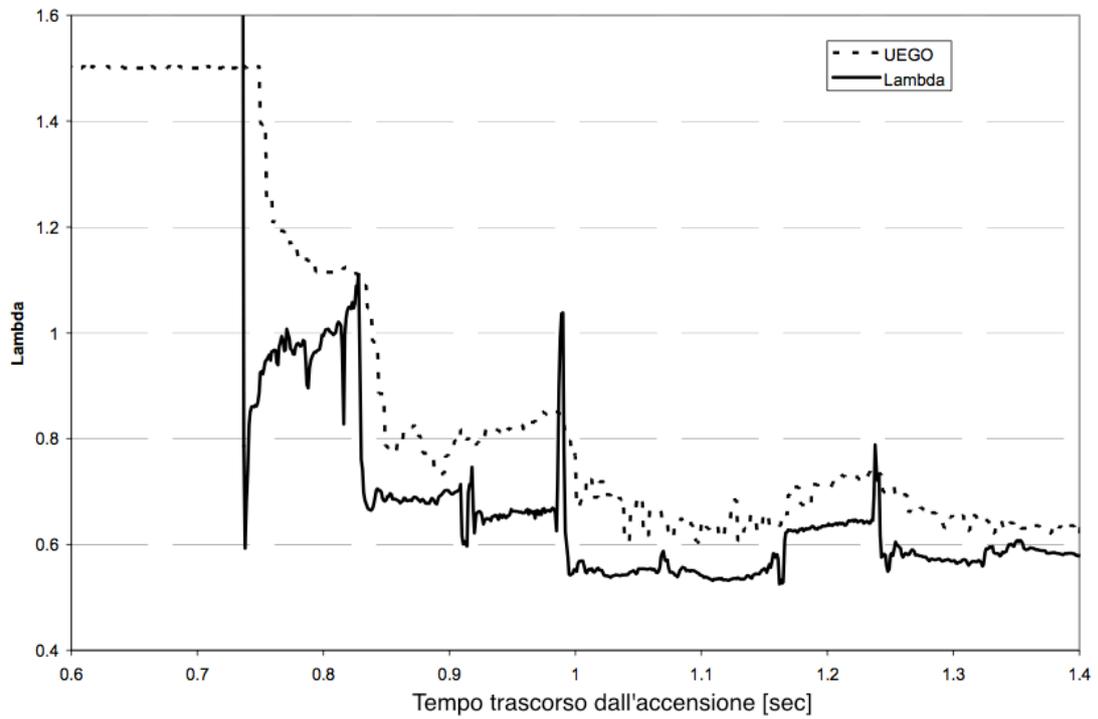


Figura 137

I valori di λ variano durante le corse specialmente durante il primo ciclo dove il fluido presenta una scarsa omogeneità e la combustione è irregolare. I risultati dei grafici sopra riportati sono inseriti in tabella per migliorarne la leggibilità:

Tabella 11

Tabella riassuntiva dei valori di lambda durante i sei cicli

run	cycle1(λ)	cycle2(λ)	cycle3	cycle4(λ)	cycle5(λ)	cycle6(λ)
1	1.12	0.71	M	0.55	0.55	M
2	1.14	0.75	M	0.56	0.62(m)	0.56
3	1.06	0.67	M	0.54	0.54	M
4	0.98	0.69	M	0.53	0.55	M
5	0.97	0.69	M	0.54	0.54	M

M=misfire

Durante il ciclo sei del secondo set di risultati, a differenza degli altri quattro, si può vedere l'avvenuta combustione all'interno del cilindro, confermata dalla misurazione degli HC. Durante il secondo set di risultati si misura una maggior accelerazione del motore, tale avvenimento non può essere spiegato poiché non si hanno informazioni riguardanti gli altri tre cilindri. Di sicuro il picco di pressione che si verifica al quarto ciclo avrà una certa influenza sui due che lo seguono, probabilmente si ha un'alterazione del flusso di gas che porta a deviare le caratteristiche della combustione fino ad evitare il misfire del sesto ciclo.

Conclusioni

È dunque possibile sviluppare una tecnica per la misurazione di λ che abbia un tempo di risposta di soli 8ms, non risenta della dispersione ciclica e non venga influenzata da elevate quantità di HC. Applicandola a un motore a iniezione diretta per l'analisi ciclo per ciclo, si è notata una buona sovrapposizione dei risultati a regime fra le misurazioni effettuate con questa nuova tecnica e quelle effettuate con un classico sensore UEGO.

I dati misurati con la fast λ hanno una buona ripetibilità e si possono utilizzare per lo sviluppo di strategia per partenze a freddo al fine di ridurre le emissioni di CO e HC.

4.3 MISURAZIONE INNOVATIVA DEL RAPPORTO A/F DURANTE IL TRANSITORIO CON L'IMPIEGO DEL SEGNALE DI PRESSIONE

La necessità di abbattere le emissioni durante la partenza “a freddo” nel ciclo di omologazione, unita alla lentezza delle tradizionali sonde UEGO nei transitori, ha portato i ricercatori a metodologie innovative che sfruttano il segnale di pressione.

4.3.1 Stima dell'AFR utilizzando il segnale di pressione in camera

BIBLIOGRAFIA indice 13

Nomenclatura utilizzata:

A_p	Superficie del pistone [m ²]
r	Lunghezza manovella [m]
l	Biella [m]
θ	Angolo di manovella [rad]
$\Delta\theta$	Periodo di campionamento in gradi di manovella [rad]
$p_m(\theta)$	Pressione relativa dell'm-esimo cilindro [Pa]
$p_c(\theta)$	Pressione relativa dentro l'm-esimo cilindro durante le corse di compressione ed espansione [Pa]
$p_p(\theta)$	Pressione relativa dentro l'm-esimo cilindro durante l'aspirazione e lo scarico [Pa]
$\lambda = r/l$	Rapporto manovella/biella
$f_m(\theta) = \sin(\theta + \pi m) + \frac{\lambda \sin(2(\theta + \pi m))}{2\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2(\theta + \pi m)}}$	“Braccio” della coppia motore per un manovellismo di spinta, funzione dell'angolo di manovella
$T_i(\theta)$	Coppia indicata [Nm]
$T_{im}(\theta)$	Coppia indicata dell'm-esimo cilindro [Nm]

$T_{ic}(\theta)$	Coppia indicata dell'm-esimo cilindro durante le corse di compressione ed espansione
$T_{ip}(\theta)$	Coppia indicata dell'm-esimo cilindro durante le corse di aspirazione e scarico (coppia di pompaggio) [Nm]
Z	Numero di cilindri
N	Numero di campioni acquisiti in un ciclo motore
ω	Velocità angolare del motore [rad/s]
\dot{m}_a	Portata in massa d'aria aspirata [kg/s]
\dot{m}_f	Portata in massa di combustibile aspirato [kg/s]
$\Omega_k = \frac{2\pi k}{N}$	Frequenza angolare di campionamento [rad]
k	Ordine (riferito alla frequenza angolare)
F_1	Componente reale della prima armonica della pressione in camera [Pa]
F_2	Componente reale della seconda armonica della pressione in camera [Pa]
F_3	Combinazione lineare delle due componenti reali della frequenza della pressione in camera dei primi due cilindri [Pa]
Q_n	Calore netto [J]
$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	Rapporto fra i calori specifici
$V(\theta)$	Volume all'interno del cilindro, funzione di θ [m ³]

Al fine di poter trovare una valida alternativa al sensore UEGO per il controllo on-board negli odierni veicoli, si è testato l'impiego di un trasduttore di pressione su un motore SI.

Nelle moderne strategie a “anello chiuso” si utilizzano sonde UEGO che generano segnali in uscita lineari, con costanti di tempo nell'ordine di $\approx 100\text{ms}$ che risultano eccessivi per il controllo dei transitori. Inoltre hanno problemi legati alla temperatura d'esercizio che deve mantenersi all'interno di un predeterminato range $300\div 800^\circ\text{C}$, richiedendo dunque un certo tempo per il preriscaldamento, tutte queste caratteristiche unite alla scarsa affidabilità del segnale per elevate quantità di HC, la rendono inadatta allo studio dei transitori.

Il segnale generato da un trasduttore di pressione invece, rispetto a un sensore UEGO, ha una costante di tempo minore grazie anche a una posizione che lo avvantaggia. Trovandosi in camera non deve aspettare che il fluido lo raggiunga, come invece accade per gli altri sensori allo scarico, i quali devono aspettare che la valvola di scarico si apra e il fluido li raggiunga.

Gli odierni trasduttori di pressione presentano comunque anche dei difetti: quello principale che ne limita lo sviluppo on board è la breve vita del sensore. Tuttavia esistono già alcune soluzioni che prevedono:

- Ricostruzione della curva di pressione, basandosi sulla fluttuazione di velocità del motore.
- Impiego di sensori low-cost.

Influenza delle armoniche della pressione sull'AFR: approccio teorico

Il fondamento teorico che sarà ora proposto serve per capire come e se le variazioni dell'AFR possono influenzare le onde di pressione in camera, questo è fatto lavorando nel dominio delle frequenze angolari, così da poter analizzare le componenti armoniche della pressione in camera.

Al fine di capire come le componenti armoniche della pressione possono influenzare le variazioni di AFR, si analizza la correlazione fra la pressione in camera e la coppia indicata di un ciclo motore.

La coppia indicata per un motore con Z cilindri (in funzione dell'angolo di manovella) vale:

$$T_i(\theta) = A_p r \sum_{m=1}^Z p_m(\theta) f_m(\theta)$$

L'equazione esprime la coppia del motore come sommatoria delle pressioni degli m -esimi cilindri per il coefficiente $f_m(\vartheta)$ che indica la variazione del braccio di manovella in funzione di ϑ , il tutto moltiplicato a sua volta per la lunghezza della manovella e per l'area del pistone (costante per i vari cilindri).

Focalizzandoci sull' m -esimo cilindro e prendendo l' n -esimo campione:

$$T_{im}(n) = A_p r p_m(n) f_m(n) \text{ con } n=1, 2, \dots, N$$

Si è eseguito un cambio di variabile anziché utilizzare l'angolo di manovella si usa il campione n -esimo che andrà da 1 a N in ciclo. Per passare dalla variabile ϑ a n è sufficiente conoscere il periodo di campionamento angolare $\Delta\theta$:

$$\theta = n \cdot \Delta\theta$$

Poiché la coppia del motore, legata alla pressione, è influenzata dal valore di λ si sono effettuati dei test variando λ . I risultati così ottenuti non sono però risultati significativi probabilmente a causa della dispersione ciclica, è così necessario sottrarre tale errore (...deviazione standard, gaussiane ecc...) e vedere se i risultati migliorano.

Al fine di valutare la coppia indicata all'interno del m -esimo cilindro, basta sapere il valore della pressione e poche altre informazioni tra cui l'angolo di manovella, funzione della somma di 2 termini periodici di periodo π e 2π (vedi formula sopra).

Una conseguenza di questo è che una costante della pressione in un ciclo intero e il valore medio della coppia indicata vale zero poiché un giro = 2π i termini periodici con periodo sottomultiplo del angolo giro sono per forza nulli.

Una conseguenza di ciò, per esempio, è che una pressione in camera costante per un intero ciclo (ipotesi) genera una coppia indicata avente valore medio nullo.

Dall'analisi delle relazioni esistenti tra la pressione in camera e la coppia indicata, si dimostra che le componenti armoniche di grado superiore, non hanno influenza sulla coppia media indicata come si vedrà in seguito.

La trasformata di Fourier discreta della coppia nell'm-esimo cilindro per l'n-esimo campione vale:

$$\begin{aligned} T_{im}(j\Omega_k) &= A_p r P_m(j\Omega_k) * F_m(j\Omega_k) = \\ &= A_p r \sum_{h=-N/2}^{N/2} P_m(j\Omega_h) F_m(j\Omega_{k-h}) \\ k &= -N/2, \dots, 0, \dots, N/2, \Omega_k = 2\pi k/N \end{aligned}$$

Il simbolo * indica la convoluzione tra le DFT della pressione nel cilindro $P_m(j\Omega_k)$ e la funzione dell'angolo di manovella $F_m(j\Omega_k)$.

La $P_m(j\Omega_k)$ e $F_m(j\Omega_k)$ sono state definite su un range di N campioni che in questo caso va da $-N/2$ a $+N/2$ e in corrispondenza di $k=0$ si ha il valore della coppia media:

$$\bar{T}_{im} = T_{im}(j0) = A_p r \sum_{h=-N/2}^{N/2} P_m(j\Omega_h) F_m(j\Omega_{-h})$$

L'analisi spettrale della funzione $f_m(n)$ mostra che solo due componenti della frequenza angolare (la seconda e la quarta) hanno un'ampiezza sensibilmente diversa da 0, mentre tutte le altre componenti tendono a 0 come riportato in tabella:

Grado delle componenti della frequenza:	Ampiezza alla rispettiva frequenza angolare		
	$\lambda=0.2$	$\lambda=0.3$	$\lambda=0.4$
0	0	0	0
± 1	0	0	0
± 2	0.50	0.50	0.50
± 3	0	0	0
± 4	0.05	0.08	0.10
± 5	0	0	0
± 6	0	0	0
± 7	0	0	0
± 8	Negligible $0.26 \cdot 10^{-3}$	Negligible $0.90 \cdot 10^{-3}$	Negligible $2.27 \cdot 10^{-3}$
$\pm >8$	0	0	0

Ricordando che $F_m(j\Omega_{-h})$ è il complesso coniugato di $F_m(j\Omega_h)$ è possibile esprimere la coppia indicata in funzione delle sole componenti armoniche 2 e 4:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{im} &= 2 A_p r \left[\operatorname{Re} \left\{ P_m(j\Omega_4) F_m(j\Omega_4)^* \right\} \right. \\ &\quad \left. + \operatorname{Re} \left\{ P_m(j\Omega_2) F_m(j\Omega_2)^* \right\} \right] = \\ &= 2 A_p r \sum_{q=1}^2 \left[\operatorname{Re} \left\{ P_m(j\Omega_{2q}) F_m(j\Omega_{2q})^* \right\} \right] \end{aligned}$$

È ora evidente che sono sufficienti solo la seconda e la quarta armonica per la valutazione della coppia media di un ciclo, tale valore può esser visto come somma di due contributi dovuti ai due semicicli:

- di compressione ed aspirazione dove $p_c(\theta)$ ne rappresenta l'andamento della pressione
- di scarico ed aspirazione dove $p_p(\theta)$ ne rappresenta l'andamento della pressione

Di particolare interesse è l'andamento della coppia media nel semiciclo di compressione e aspirazione \bar{T}_{ic} , poiché gli effetti dell'AFR su di esso sono più evidenti. L'equazione che esprime \bar{T}_{ic} si può ricavare sfruttando l'analogia col ciclo intero \bar{T}_{im} espressa come $\bar{T}_{im} = \frac{(\bar{T}_{ic} + \bar{T}_{ip})}{2}$. Da cui tenendo presente che poiché i campioni anziché N saranno la metà, $n=1, \dots, N/2$ mentre $k=-N/4, \dots, 0, \dots, N/4$:

$$\bar{T}_{ic} = T_{ic}(j0) = A_p r \sum_{h=-N/4}^{N/4} P_c(j\Omega_h) F_c(j\Omega_{-h})$$

e riscrivendola in funzione delle armoniche di frequenza 2 e 4 si ha:

$$\bar{T}_{ic} = 2 A_p r \sum_{q=1}^2 \left[\operatorname{Re} \left\{ P_c(j\Omega_q) F_c(j\Omega_q)^* \right\} \right]$$

da metà ciclo in poi si può assumere $\operatorname{Re} \{ F_c(j\Omega_1) \} = \operatorname{Re} \{ F_c(j\Omega_2) \} = 0$ per cui:

$$\bar{T}_{ic} = 2 A_p r \sum_{q=1}^2 \left[\operatorname{Im} \{ P_c(j\Omega_q) \} \cdot \operatorname{Im} \{ F_c(j\Omega_q) \} \right]$$

quindi solo le due componenti immaginarie delle armoniche svolgono un ruolo chiave nella valutazione della \bar{T}_{ic} .

Al fine di capire come le armoniche della $p_c(\theta)$ sono influenzate dall'A/F, si sono eseguiti dei test su di un motore mantenuto a velocità costante, con l'ausilio di un controller. L'apertura della valvola a farfalla e la relativa iniezione di combustibile sono state scelte al fine di mantenere costante la coppia media indicata, il tutto per diversi valori di lambda.

Poiché la coppia media è costante in prima approssimazione anche la massa bruciata si può considerare tale. L'ammontare di combustibile aspirato è approssimativamente uguale all'ammontare di combustibile bruciato se sono in Magro, altrimenti è correlato alla relativa quantità di aria aspirata se lambda è grasso.

Imponendo un A/F magro allora la quantità di combustibile bruciato resta la stessa e posso variare lambda, semplicemente variando la quantità di aria iniettata.

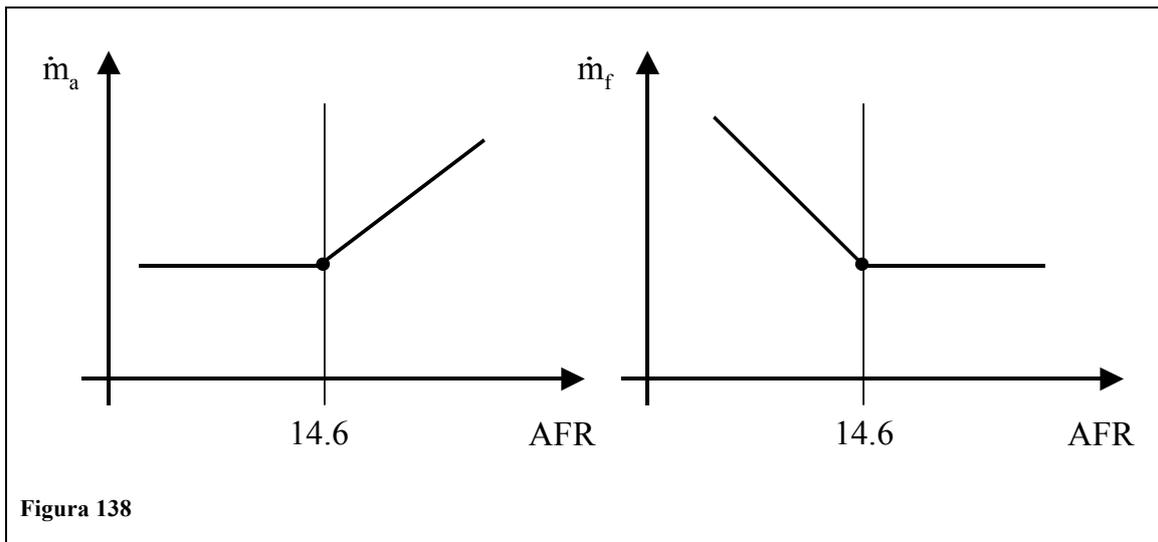


Figura 138

Il grafico rappresenta la variazione di portata in massa di aria e combustibile, in funzione del tipo di lambda (grasso o magro) al fine di mantenere costante la quantità di combustibile bruciato.

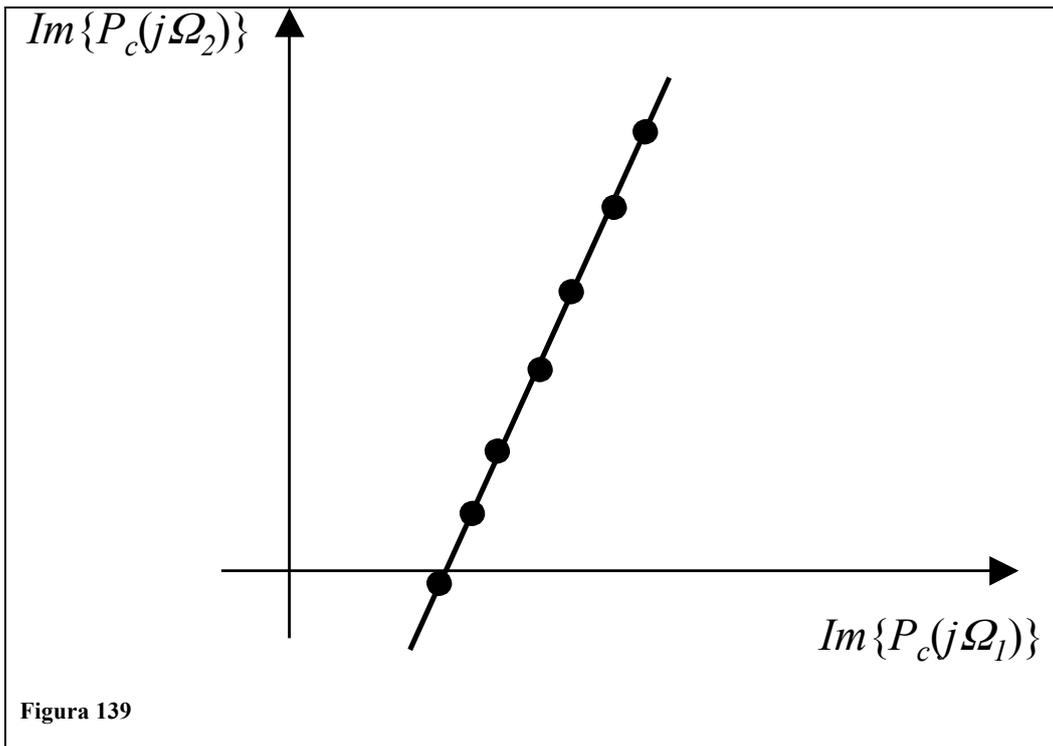
Se la quantità di combustibile è costante, il valore di \bar{T}_{ic} è circa costante ma non esattamente costante, questo è dovuto alla velocità del fronte di fiamma che è variabile e dipende dal valore dell'A/F. Per $\lambda \approx 0,9$ ho la massima velocità del fronte di fiamma mentre per valori magri ho una riduzione della coppia media. Sono dunque necessari degli aggiustamenti per migliorare l'esperimento.

Le variazioni di AFR influenzano le prime due armoniche delle onde di pressione in particolare le sole componenti immaginarie se λ è mantenuto costante. Se esse sono costanti anche $2A_p r \sum_{q=1}^2 [\text{Im}\{P_c(j\Omega_q)\} \cdot \text{Im}\{F_c(j\Omega_q)\}]$ e di conseguenza \bar{T}_{ic} , lo sono.

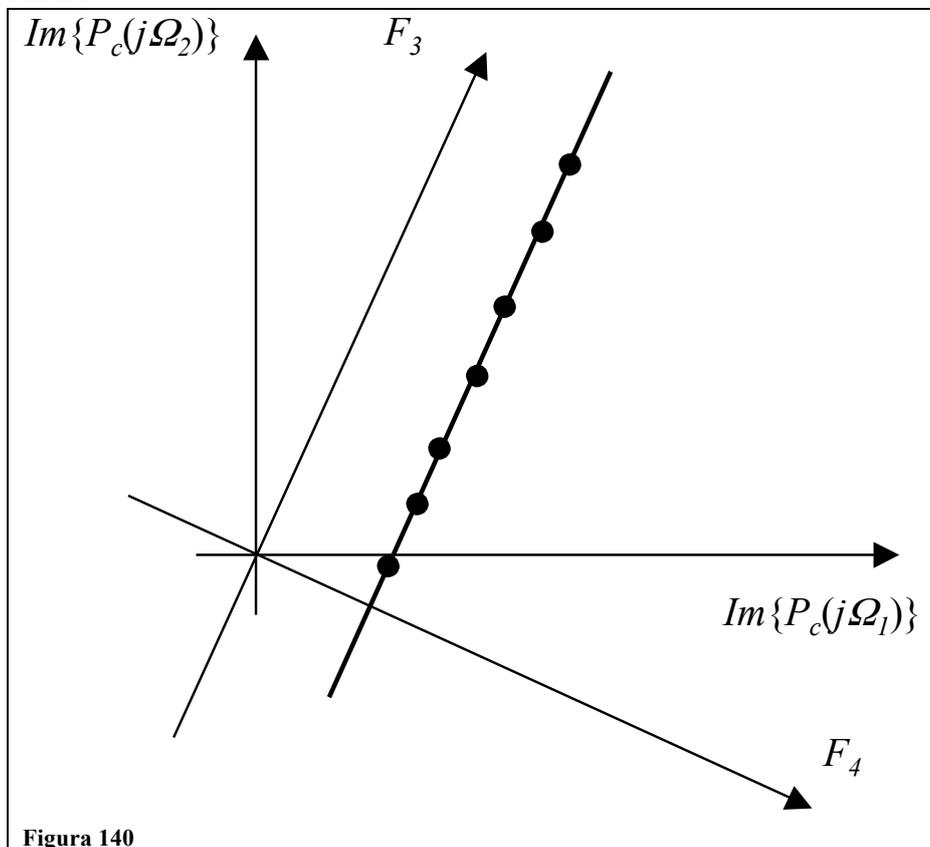
Quando però si hanno delle variazioni di λ le due componenti reali delle armoniche, F_1 e F_2 ne risentono.

Ciò significa che non vi siano informazioni riguardo le variazioni di AFR nelle componenti immaginarie delle prime 2 armoniche della pressione, infatti il valore costante della coppia indicata non implica un valore costante delle 2 componenti immaginarie, semplicemente è più conveniente far riferimento alle reali.

In un piano cartesiano in cui gli assi sono le componenti immaginarie, si vede per l'appunto l'inesattezza del test, nella realtà devono essere costanti per un dato motore:



Le componenti immaginarie delle armoniche sono “libere” di muoversi lungo la retta senza influenzare il valore di \bar{T}_{ic} . La posizione lungo tale linea è correlata alle variazioni dell’AFR, ponendosi su un piano ruotato con assi F_3 - F_4 la retta diventa parallela alle ordinate e l’ampiezza (posizione) può essere utilizzata per correlare l’AFR.



Questa rotazione indentifica una terza variabile F_3 , per la stima di λ che può essere ricavata da considerazioni geometriche sulla base dei primi due F_1 e F_2 (componenti reali delle prime 2 armoniche della pressione in camera) :

$$\begin{cases} F_3 = \text{Im}\{P_c(j\Omega_1)\} \cdot \text{Im}\{F_c(j\Omega_2)\} - \text{Im}\{P_c(j\Omega_2)\} \cdot \text{Im}\{F_c(j\Omega_1)\} \\ F_4 = \text{Im}\{P_c(j\Omega_1)\} \cdot \text{Im}\{F_c(j\Omega_1)\} + \text{Im}\{P_c(j\Omega_2)\} \cdot \text{Im}\{F_c(j\Omega_2)\} \end{cases}$$

questo approccio teorico permette di definire 3 parametri F_1 , F_2 , F_3 derivati dall'analisi della frequenza e contengono informazioni per la stima di AFR.

Il parametro F_4 invece è legato alla \bar{T}_{ic} e rimane costante al variare dell'AFR, e per questo motivo non è rilevante nell'analisi.

Svolgimento dei test

Si sono condotte delle prove sperimentali al fine di identificare e validare l'approccio teorico descritto. Di seguito si riportano le caratteristiche del motore e dei sensori utilizzati per lo svolgimento dei test:

Caratteristiche motore	
Tipo	FIAT, Iniezione Multipla, 4 cilindri in linea.
Cilindrata	2.0 liters
Diametro Pistone	84 mm
Corsa	90 mm
Connecting rod length	145 mm
Potenza massima	109 kW at 6200 rpm
Coppia massima	130 Nm at 5000 rpm

Caratteristiche del sensore	
UEGO	HORIBA - MEXA 700 LAMBDA
Sensore di pressione in camera	KISTLER 6051A

Gli esperimenti sono stati condotti in diversi stadi di regime, ovvero a diversa velocità, coppia e anticipo, comunque mantenuti costanti al variare dell'AFR .

In figura sono rappresentati i punti di funzionamento:

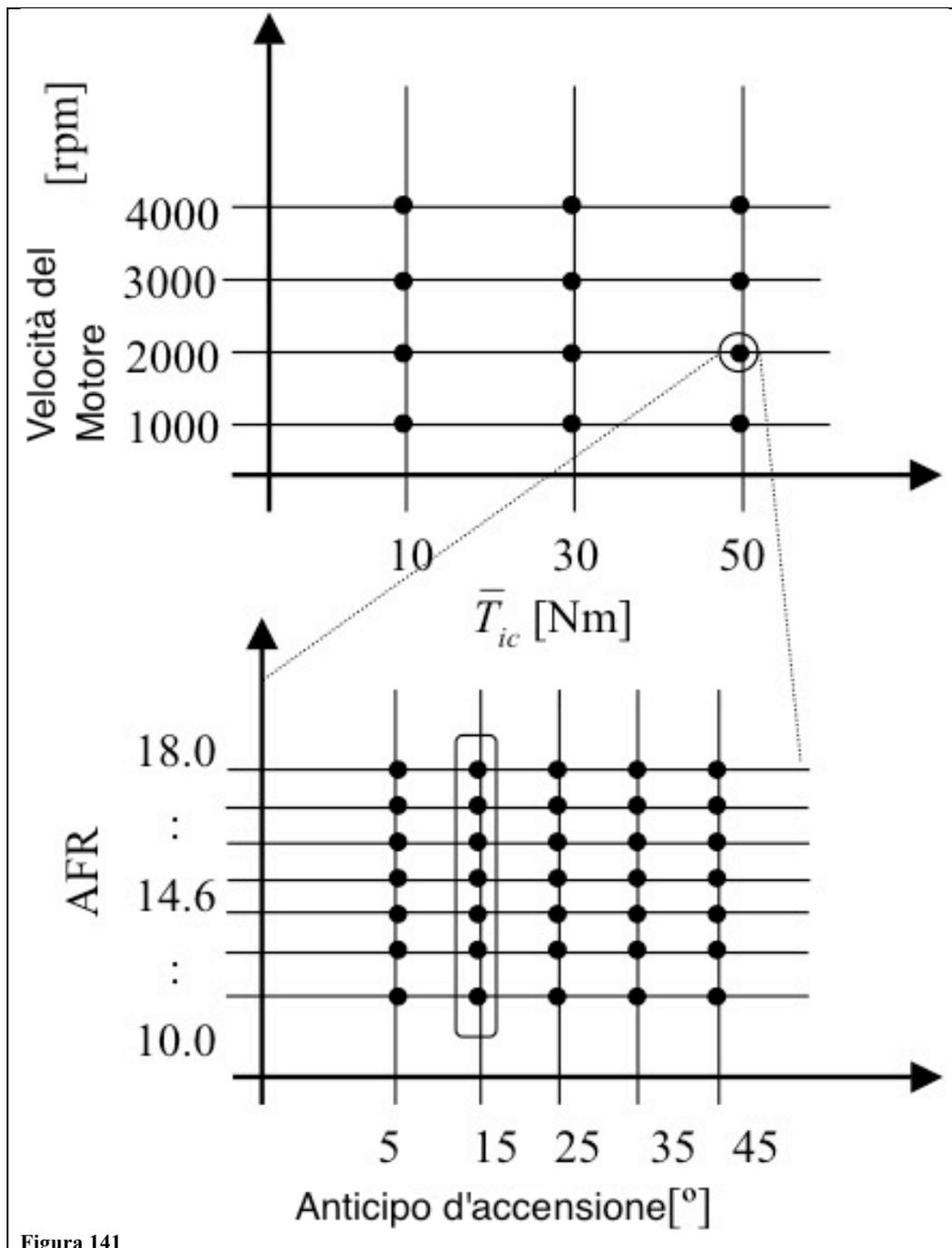


Figura 141

Per ogni condizione di regime sono stati acquisiti campioni per 100 cicli consecutivi. Dopo l'acquisizione dei dati si è provveduto al calcolo della media di tutte le onde di pressione e dei valori di λ così da avere una singola onda di pressione e un singolo valore dell'AFR per ogni condizione di funzionamento considerata.

Dunque al fine di valutare le variazioni delle onde di pressione generate dalla variazione dell'AFR, si sono eseguiti test a parità di coppia, velocità motore e anticipo, inoltre si sono effettuati per più valori di coppia e anticipo.

Si sono così ottenuti i grafici con l'andamento della pressione, la linea verticale serve a indicare la posizione dell'anticipo utilizzato per il test considerato:

Curva di pressione del cilindro #1, a 30Nm di \bar{T}_{ic} , 2000 rpm, 25° di anticipo e differenti valori dell'AFR.

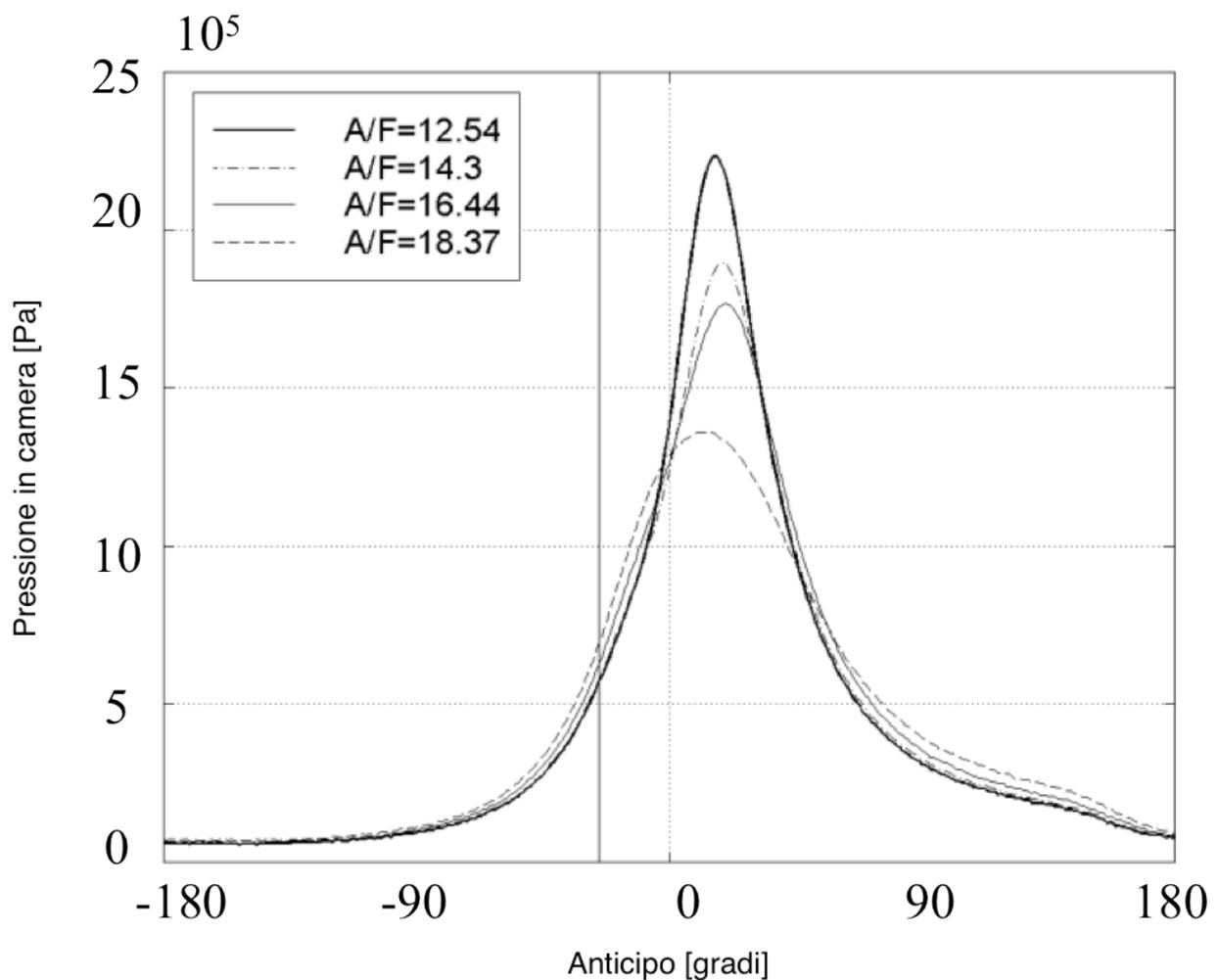


Figura 142

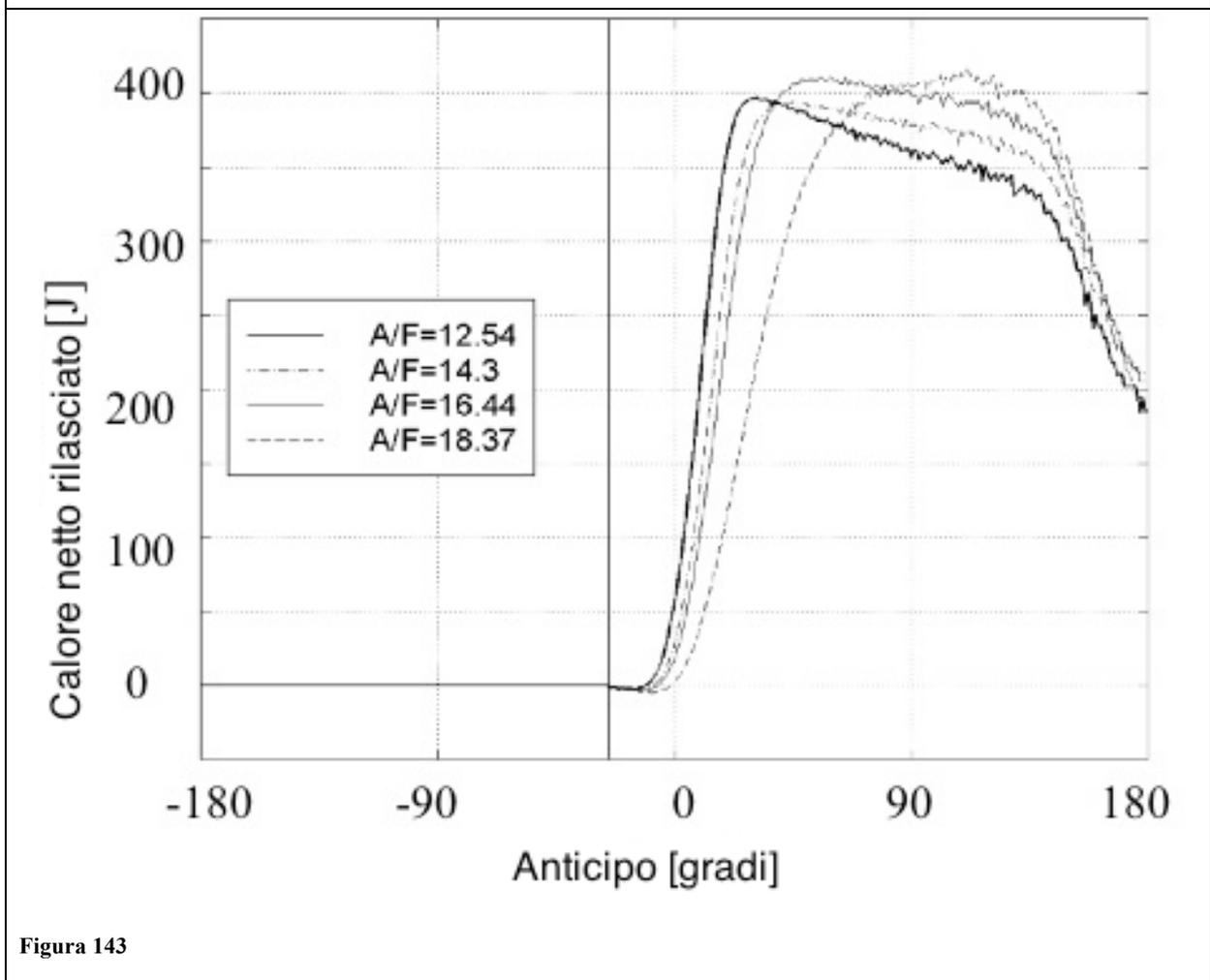
Come si può notare l'andamento delle onde di pressione presenta grosse

differenze, questo è dovuto alla velocità del fronte di fiamma che rallenta con l'incremento dell'AFR.

Dalle onde di pressione si passa alle curve che rappresentano il calore netto rilasciato che è stato determinato dalla pressione in cilindro con l'equazione:

$$\frac{dQ_n}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p_m(\theta) \frac{dV(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V(\theta) \frac{dp_m(\theta)}{d\theta}$$

Curva di pressione del cilindro #1, a 30Nm di \bar{T}_{ic} , 2000 rpm, 25° di anticipo e differenti valori dell'AFR.



Al calare dell'AFR (partendo da valori stechiometrici) la velocità del fronte di fiamma aumenta com'è possibile vedere dalla curva a ombrello e il picco di pressione si avvicina al PMS. Allo stesso tempo la forma d'onda della pressione diventa più regolare col calare dell'AFR.

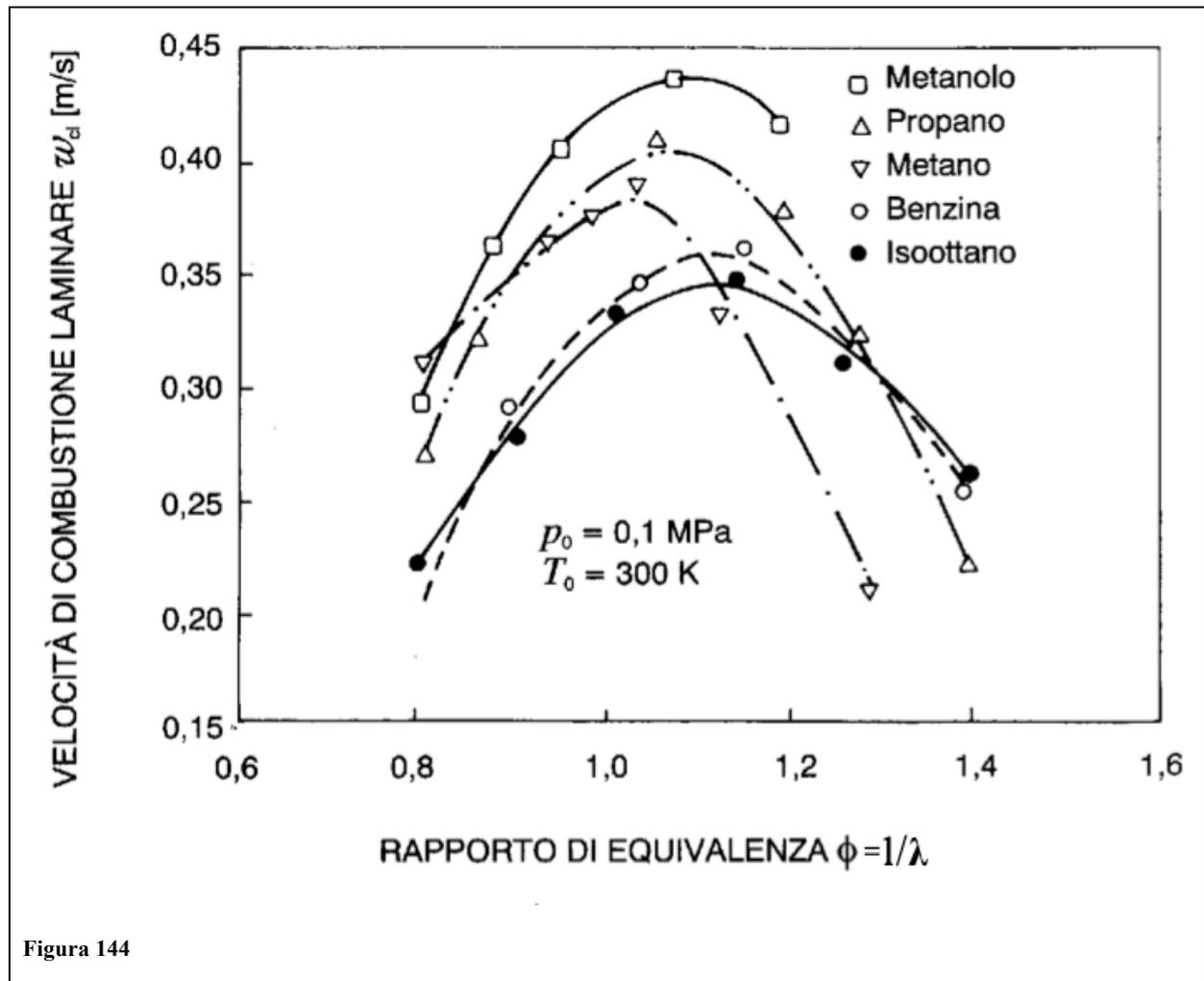


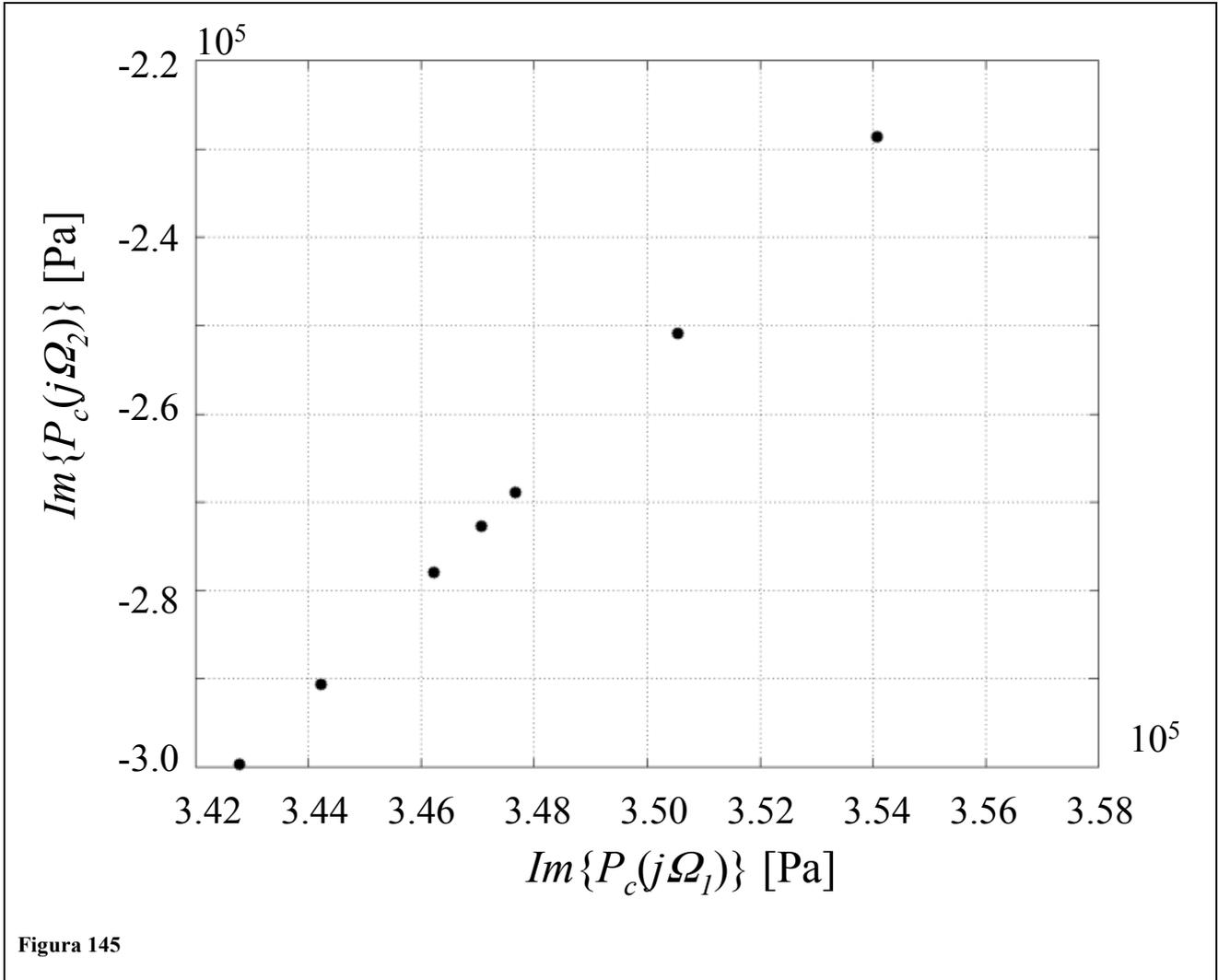
Figura 144

Le forme d'onda della pressione presentano delle diversità anche prima dell'iniezione, questo è dovuto alle diverse condizioni in cui avvengono i test. Come già menzionato prima, per ogni gruppo di test è possibile ottenere un AFR magro senza mutare il valore della coppia \bar{T}_{ic} . Questo si può fare mantenendo lo stesso tempo d'iniezione, come nelle condizioni stechiometriche, ma aprendo più lentamente la valvola. Per tale ragione nei test in cui è stato imposto un $AFR > 1$, si nota un incremento dei picchi di pressione e della $p_c(\theta)$.

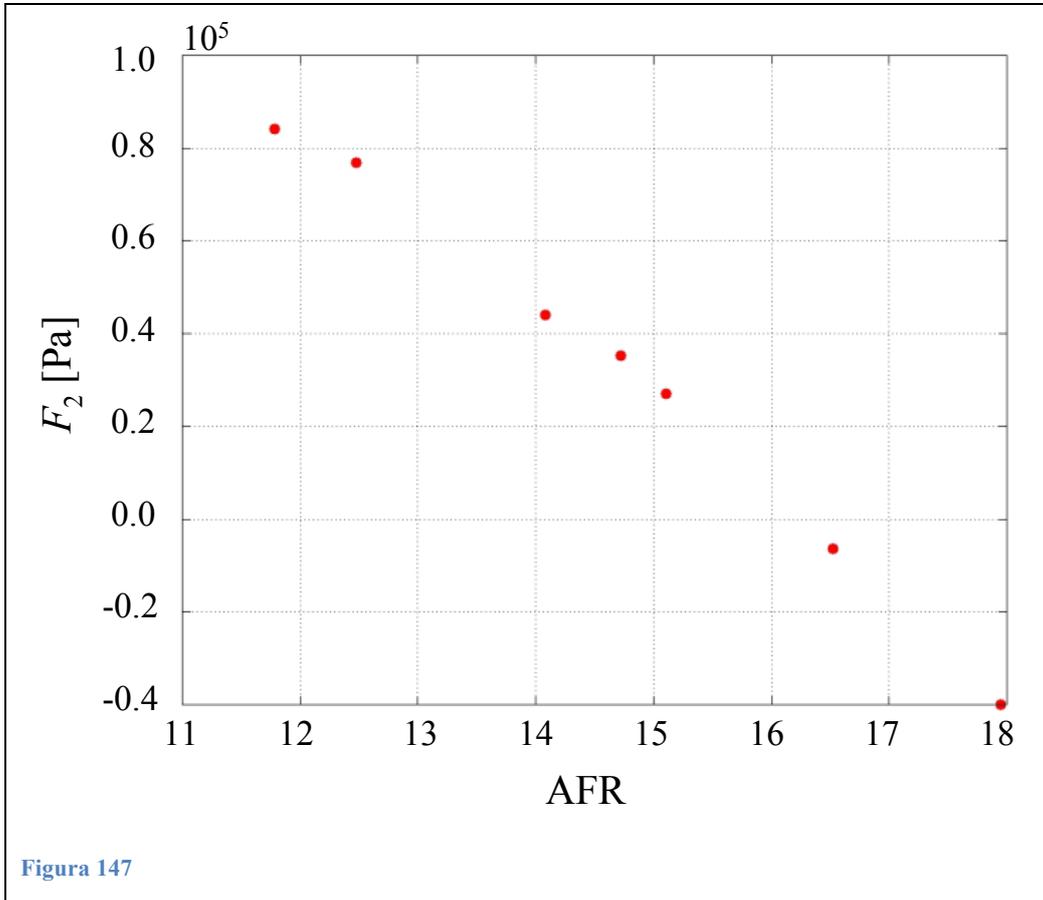
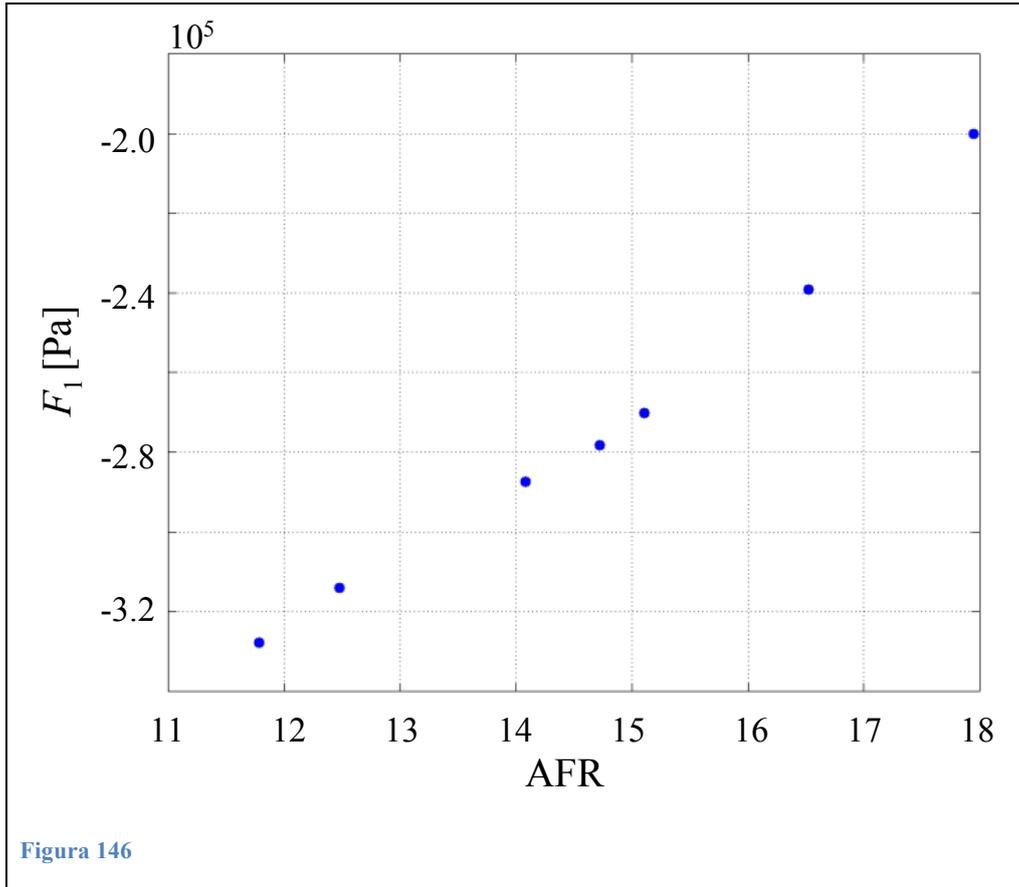
Gli approcci teorici trattati finora han portato a identificare tre parametri F_1 , F_2 , F_3 tutti derivati dall'analisi delle armoniche della pressione in camera per stimare le variazioni di AFR.

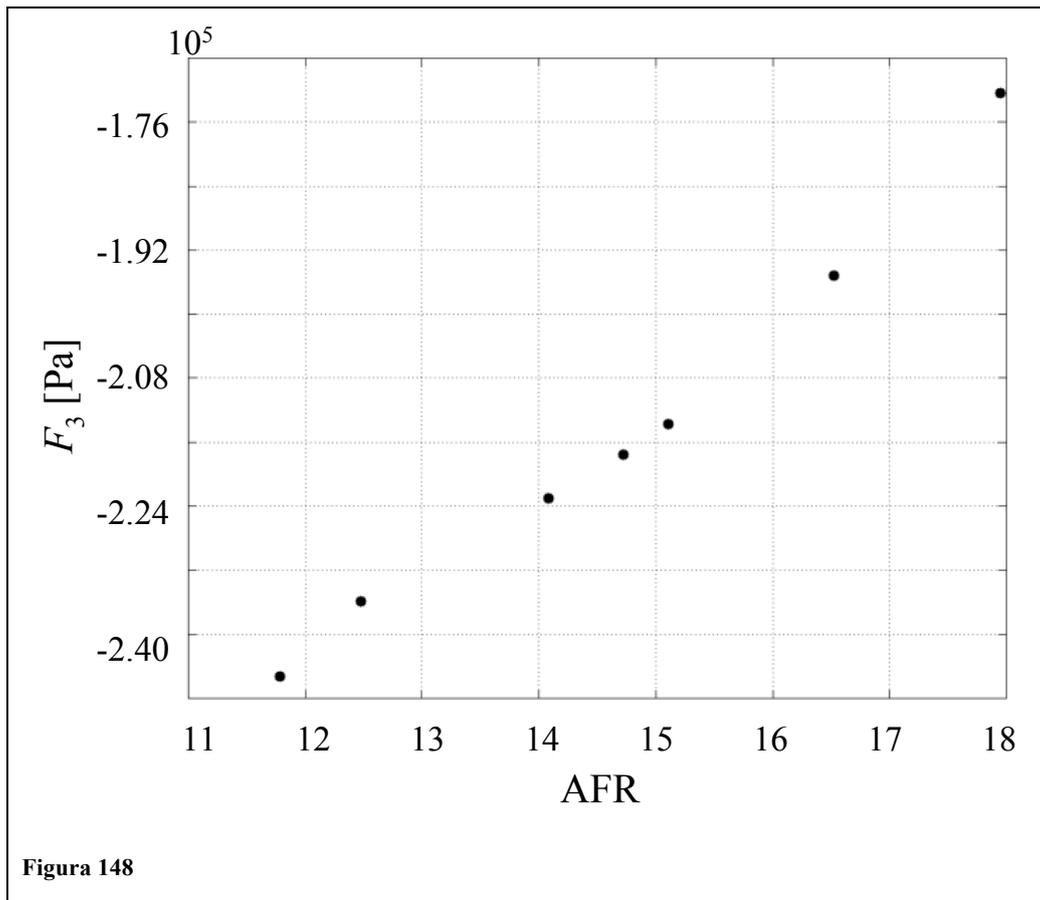
Una volta terminato il processo di raccolta dati, i gruppi di campioni raccolti assieme alle considerazioni teoriche fatte possono essere impiegati per scrivere un algoritmo, che leghi la Pressione=f(AFR) per coppia, velocità e anticipo costanti.

Come primo step si riporta l'andamento delle componenti immaginarie della pressione:



Di seguito si calcola la relazione fra i parametri F_1 , F_2 , F_3 e l'AFR utilizzando i seguenti diagrammi:





Osservando i grafici è ragionevole considerare un tipo di correlazione lineare tra i parametri F_1 , F_2 , F_3 e l'AFR. Al fine di ottenere una caratterizzazione generale su tutto il ciclo e per diverse condizione di funzionamento si sono raccolti tutti i test a coppia, velocità e anticipo costanti.

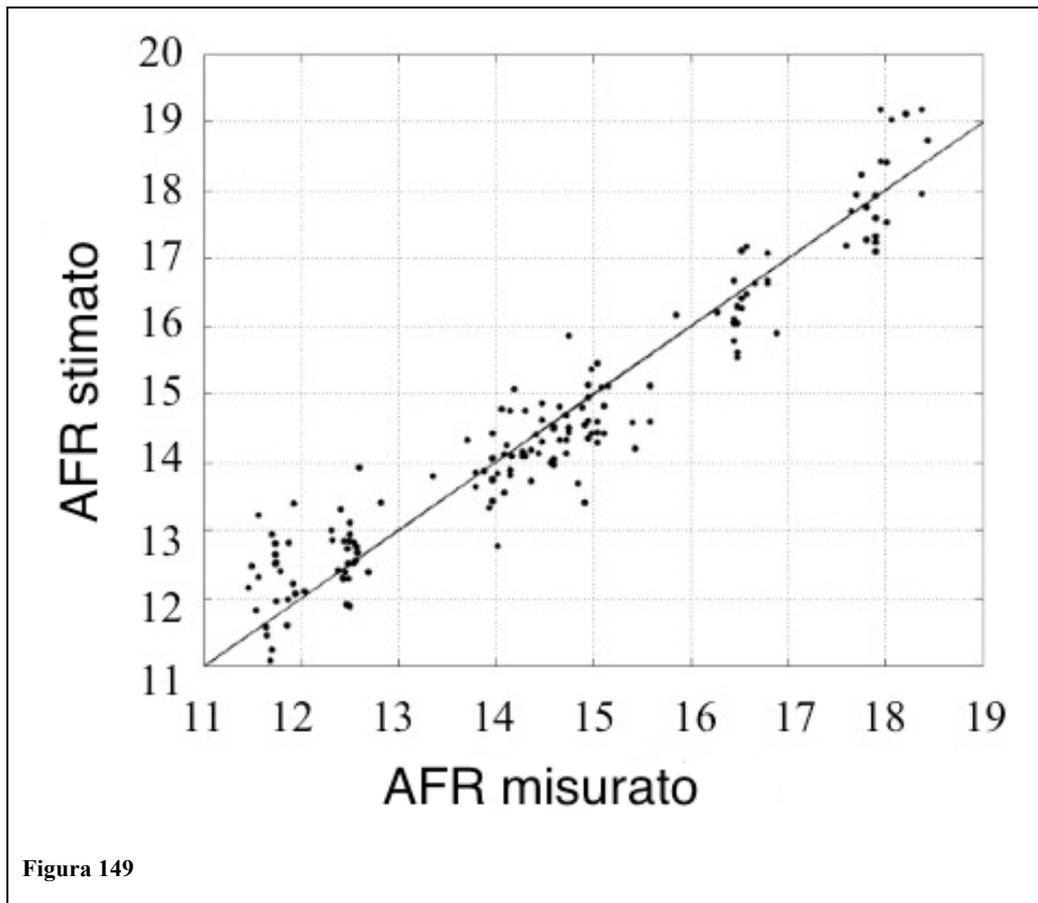
L'algoritmo cercato ha una forma del tipo:

$$AFR_s = C_0(\omega, SA, \bar{T}_{ic}) + C_1(\omega, SA, \bar{T}_{ic})F_1 + \\ + C_2(\omega, SA, \bar{T}_{ic})F_2 + C_3(\omega, SA, \bar{T}_{ic})F_3$$

Dove le costanti C_0 , C_1 , C_2 , e C_3 dipendono dalle condizioni di funzionamento in termini di: \bar{T}_{ic} , anticipo e velocità del motore. Per calcolarli si è imposta la minimizzazione della varianza:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (AFR_s - AFR)^2}{\# di_campioni}$$

Con questo procedimento si riesce può ottenere un valore di σ^2 pari a 0,31 che corrisponde a un errore di 0,45 per un AFR di 14.6, questo significa che la stima può essere valida anche per le moderne strategie di controllo ad anello chiuso.



Dall'analisi del contributo fornito dai parametri per la stima dell'AFR è emerso che i principali parametri sono F_1 e F_2 mentre F_3 contribuisce solo per il 5 %.

	Contributo % alla stima di λ
F_1	65 %
F_2	30 %
F_3	5 %

Al fine di alleggerire l'algoritmo si è eliminato il contributo di F_3 (ponendo $C_3=0$) analizzandone le conseguenze:

$$AFR_{new} = C_0(\omega, SA, \bar{T}_{ic}) + C_1(\omega, SA, \bar{T}_{ic})F_1 + C_2(\omega, SA, \bar{T}_{ic})F_2$$

Per quest'algoritmo il valore di $\sigma^2=0.34$ e corrisponde a un errore di 0,5 per AFR 14,6.

Sebbene le FFT richiedano una grande quantità di memoria e di tempo a livello

computazionale, va sottolineato che non è necessaria la valutazione di tutto lo spettro ma solo delle prime 2 componenti armoniche e quindi il numero di campioni da raccogliere viene sensibilmente ridotto.

Conclusioni

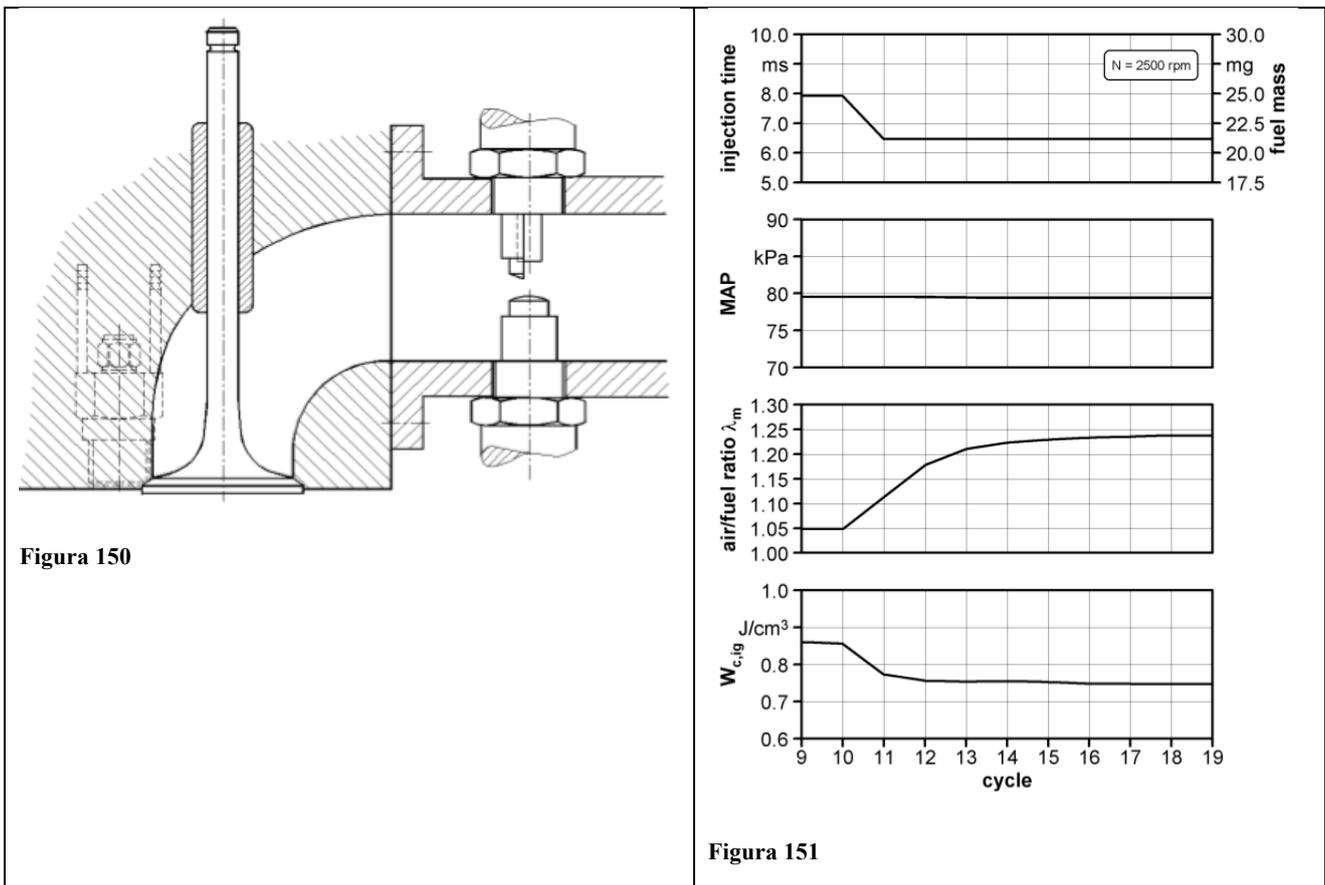
La procedura di stima dell'AFR si è basata sulla relazione esistente tra le variazioni di AFR e gli effetti che provoca sulle onde di pressione. Grazie all'approccio teorico basato sull'analisi in frequenza della pressione è possibile rilevare gli effetti provocati dalla variazione dell'AFR definendo così una procedura per la stima. I risultati così ottenuti mostrano l'attitudine del sistema a un possibile impiego in moderne strategie di controllo in feedback utilizzando sensori low-cost già presenti sul mercato, oppure ricavando la curva di pressione dalle fluttuazioni di velocità del motore, eliminando così l'esigenza di ricorrere a sensori di pressione.

4.3.2 Correlazione dell'AFR al lavoro indicato

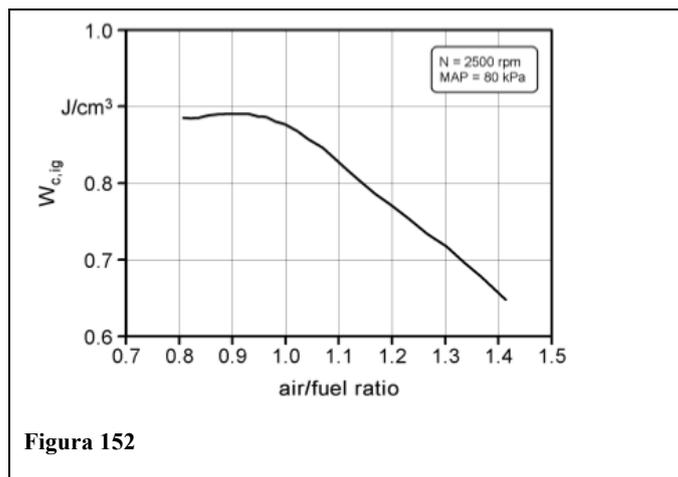
BIBLIOGRAFIA indice 14.

Al fine di poter misurare il rapporto A/F anche durante i transitori, si può utilizzare un trasduttore di pressione per correlare il lavoro lordo (W) al rapporto A/F.

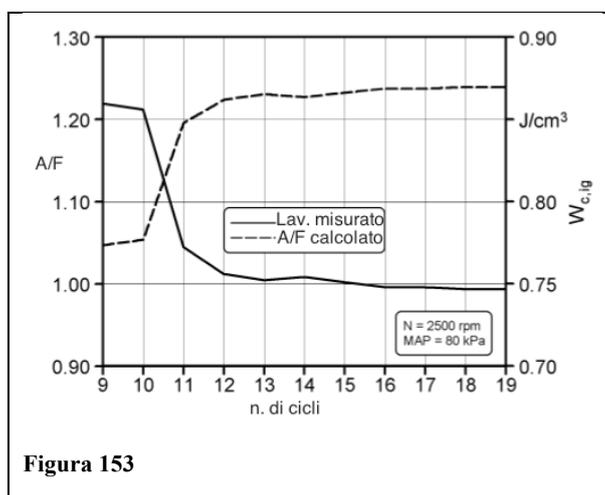
Per sperimentare la validità di tale teoria si è utilizzato un motore quattro cilindri SI da 2.0 l, nel funzionamento a velocità e pressione d'aspirazione (MAP) costanti. Nel collettore di scarico a una distanza di 0,1 m sono collocati due sensori: uno standard UEGO (BOSCH, LSU 4) e uno modificato introducendo un tubo protettivo. Per ricavare il lavoro lordo si usa un trasduttore di pressione piezoelettrico raffreddato ad acqua (Kistler, type 6061). I risultati dei test han permesso di studiare la dinamica dei sensori ricavando i seguenti grafici:



Resta ora da definire la caratteristica W-A/F, si monitorano quindi i due parametri per MAP e velocità del motore costanti; con una fasatura ottimale del motore che vede il picco massimo di pressione in corrispondenza di 15 gradi circa dopo il PMS e con $\lambda=1$:



Grazie a tale caratteristica, frutto della media di 100 segnali di pressione nelle medesime condizioni (per tener conto della diffusione ciclica), è ora possibile calcolare il rapporto di aria combustibile in funzione del lavoro lordo ricavato dal segnale di pressione, così come da figura:



Il principale vantaggio di questa procedura è di fornire il rapporto A/F senza ritardi.

Lo svantaggio invece è la validità ristretta a sole miscele magre, al di fuori di queste si hanno risultati ambigui. Questo è una conseguenza della minore influenza che ha l'idrogeno rispetto agli idrocarburi, sulle prestazioni del sensore.

Un altro svantaggio è il grosso sforzo nell'acquisizione dei dati, poiché ogni ciclo differisce dal precedente a causa della diffusione ciclica. Ciò rende necessaria una media dei campioni acquisiti, pari almeno a 100 cicli.

La misurazione presenta comunque alcuni inconvenienti, i gas residui presenti nel cilindro dal ciclo precedente influiscono sulla misurazione di quello successivo da noi preso in considerazione, alterandone i risultati nei transitori.

Confrontando i due segnali in termini di ritardo, si vede dal grafico come quello calcolato sia più rapido del misurato:

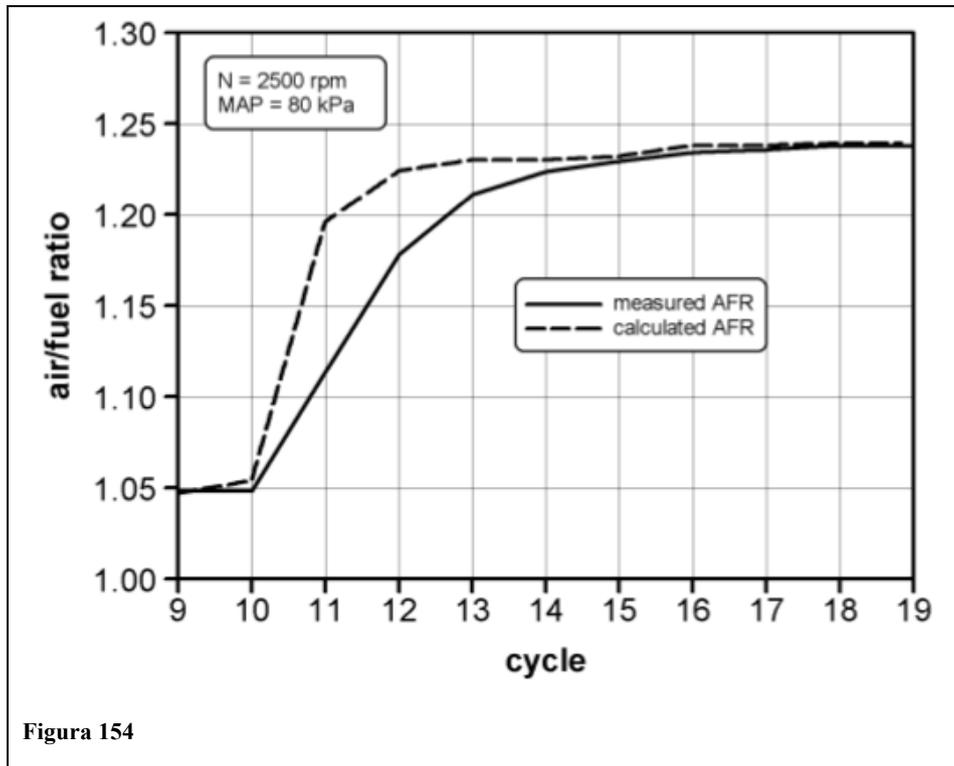


Figura 154

Questo ritardo è dovuto alla dinamica del sensore, ed è esprimibile come somma di tre contributi:

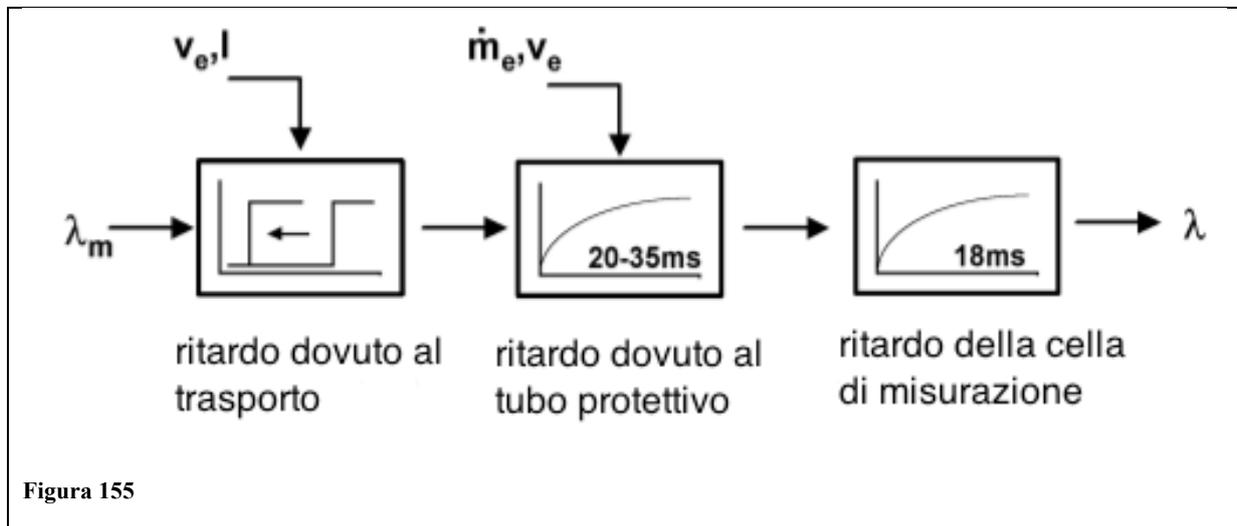
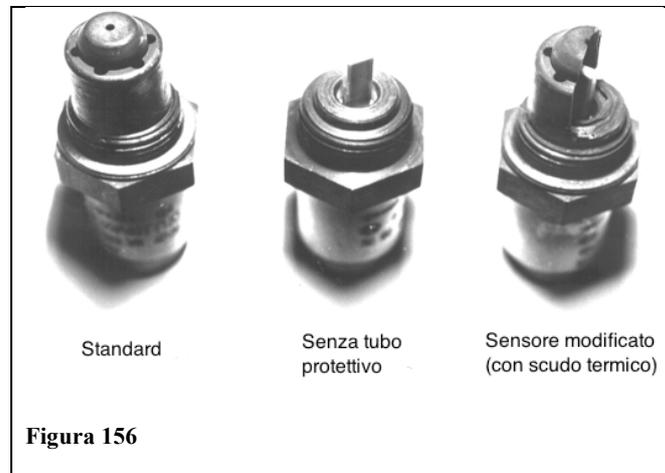


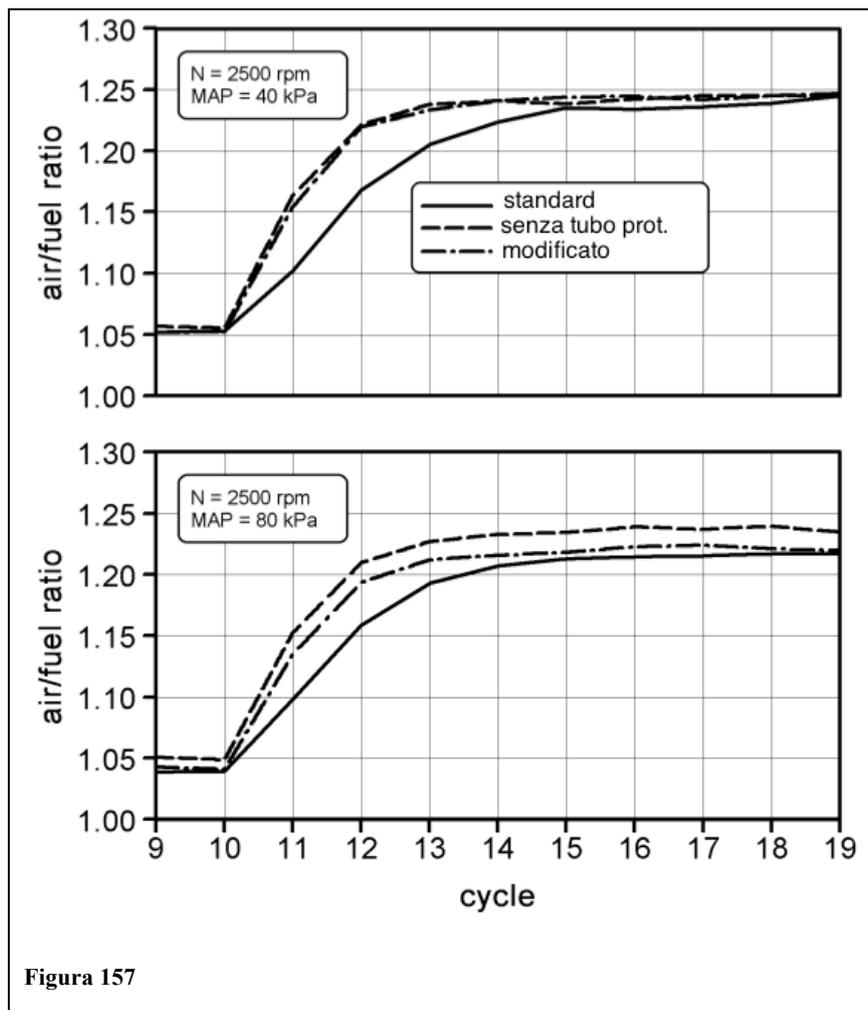
Figura 155

1) Il ritardo dovuto al trasporto varia in funzione della velocità dei gas di scarico e della distanza del sensore dalla valvola di scarico. Una misura di tale ritardo si ha monitorando l'intervallo che intercorre fra l'apertura della valvola e il primo cambiamento di A/F.

2) Il ritardo dovuto al tubo protettivo è invece funzione della pressione all'aspirazione (MAP), e delle caratteristiche della miscela. Il tubo protettivo serve a proteggere la sonda da shock termici e a evitare l'avvelenamento degli elettrodi. Al fine di studiare la dinamica del sensore tale elemento va eliminato:



Indipendentemente dalla MAP il sensore senza tubo protettivo è più reattivo di quello standard:



Al crescere della MAP \uparrow la temperatura dei gas e la velocità del flusso \uparrow , riducendo lo scostamento fra i risultati ottenuti con le diverse sonde.

La sonda modificata differisce dalla standard per la parziale rimozione del cappuccio protettivo, questo sensore è così riparato dall'impatto diretto dei gas di scarico ma l'elemento sensibile è comunque immerso in essi. In questo modo si giunge a un compromesso fra le caratteristiche degli altri due sensori; l'elemento sensibile è protetto dall'impatto diretto, senza rinunciare però alla prontezza di risposta. Va comunque precisato che per temperature dei gas (e di conseguenza MAP) elevate, la misurazione del sensore modificato ne risente, seppur non quanto il sensore completamente privo di protezione.

Al fine di compensare questo scostamento si sono misurate le temperature alle quali il riscaldamento si spegne (fattore della sonda = 0%). Al fine di compensare l'effetto del tubo protettivo s'impiega quindi una funzione che tende ad annullare il gain presente fra la sonda modificata e quella priva di protezione.

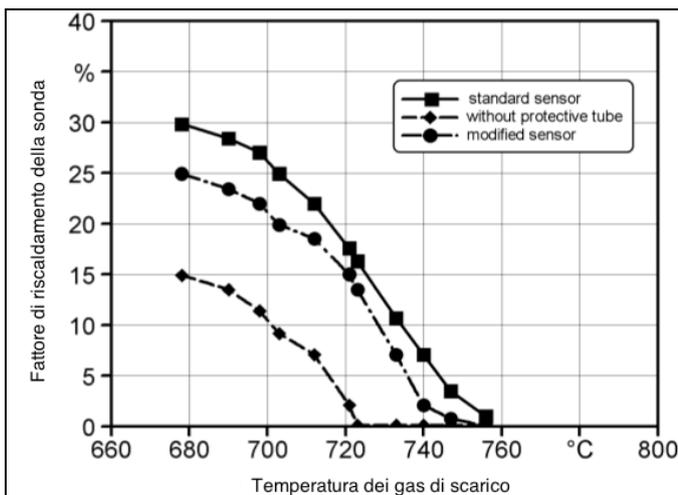


Figura 158

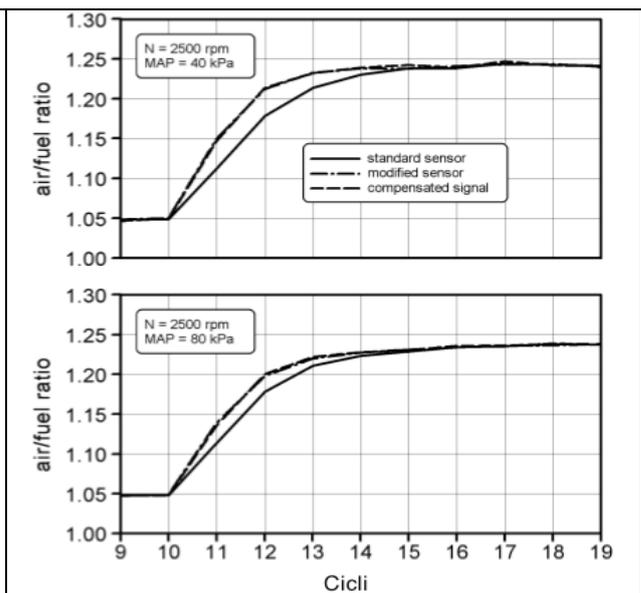
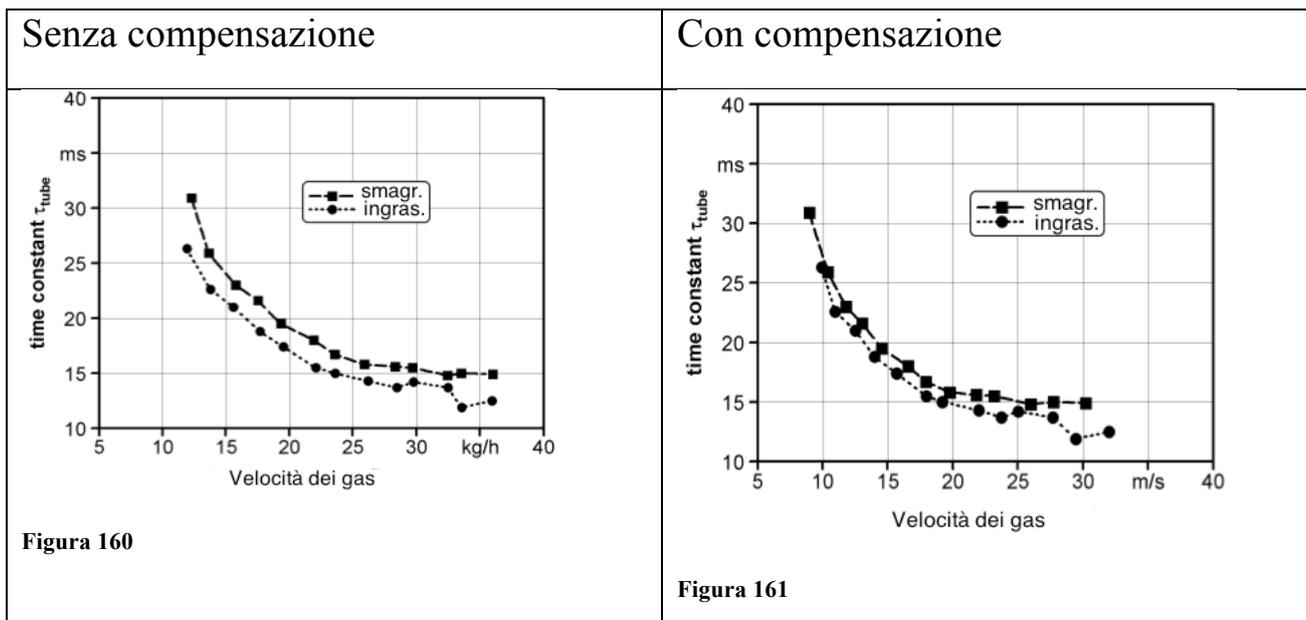


Figura 159

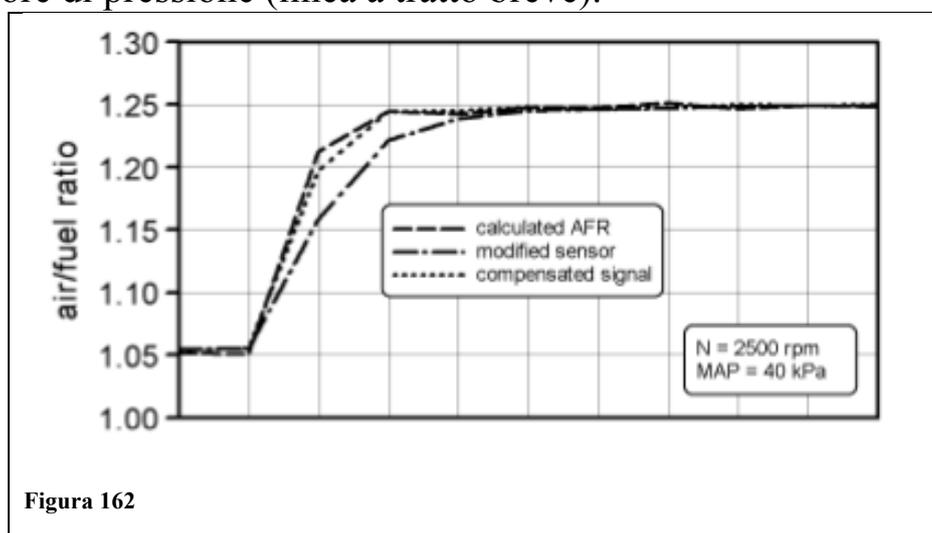
Questa compensazione deve tener conto:

- ❖ Del tipo di transitorio: se il valore di λ cala si ha una costante di tempo che si mantiene inferiore al caso in cui aumenta.
- ❖ Della velocità del fluido: al suo aumentare la costante di tempo diminuisce.



Si hanno comunque degli scostamenti per velocità del fluido intorno ai 29 m/s, la ragione è che per ottenere una simile velocità è richiesta una MPA=90 kPa, cui corrisponde una temperatura dei gas pari a 760°C uguale alla temperatura per cui il fattore di riscaldamento della sonda è nullo e quindi si traduce in una misurazione di λ inaccurata.

3) Il ritardo dovuto alla cella di misurazione del sensore modificato si può compensare, basandosi sul confronto del segnale calcolato utilizzando il trasduttore di pressione (linea a tratto breve).



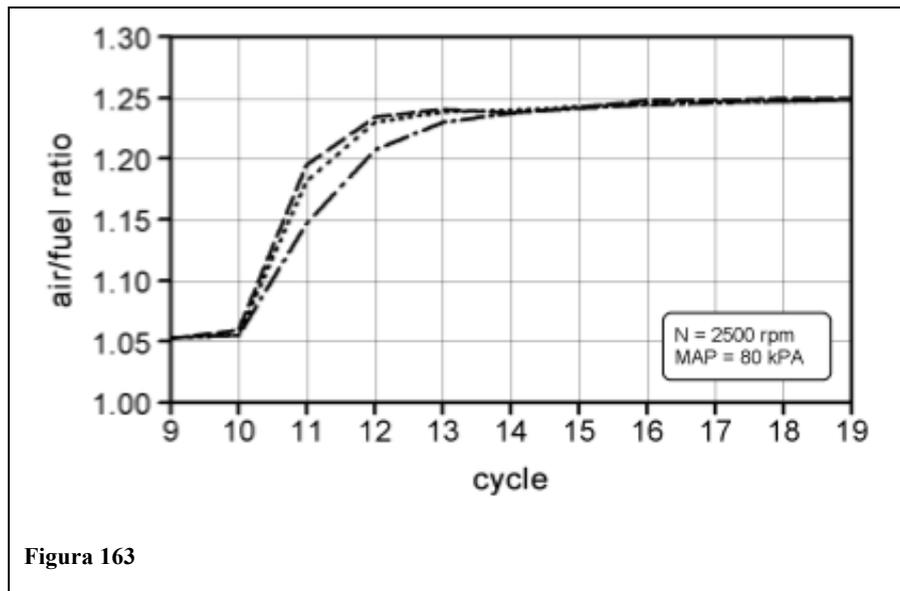


Figura 163

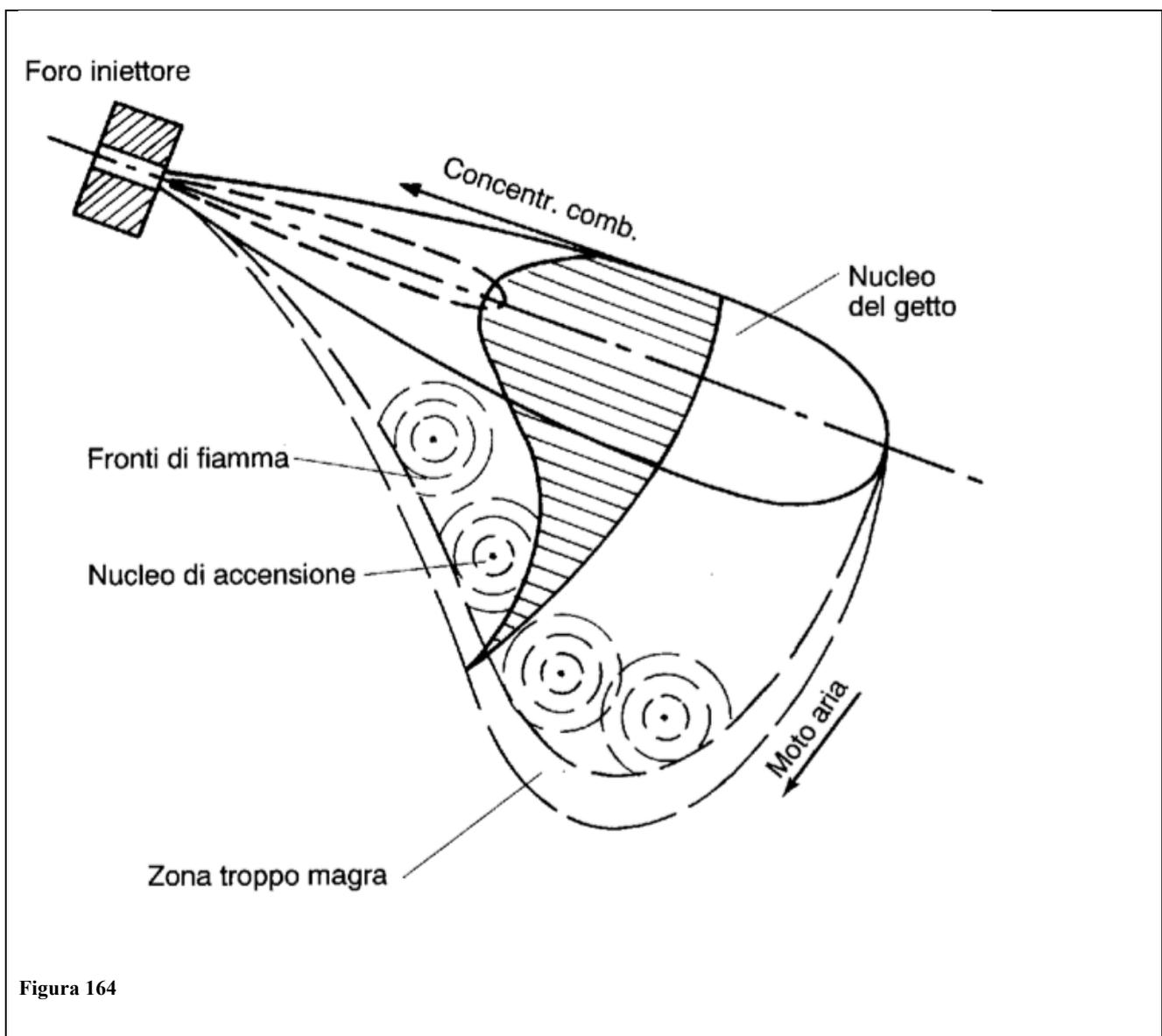
Dallo studio appena affrontato, emergono quindi le seguenti conclusioni:

- Usando un sensore UEGO standard per determinare il rapporto A/F durante il transitorio si hanno risultati inaccurati dovuti alla dinamica del sensore
- Il tubo protettivo del sensore e il comportamento dinamico della cella di misurazione, sono due parametri fondamentali che possono essere considerati separatamente l'uno dall'altro.
- L'influenza del tubo protettivo dipende dalla velocità del fluido e può essere compensata confrontandolo con il sensore senza protezione.
- Usando la correlazione tra il lavoro lordo medio per ciclo e il rapporto A/F è possibile determinare un A/F durante il transitorio, il quale è indipendente dalla dinamica del sensore. Con quest'A/F calcolato si può identificare la dinamica della cella di misurazione e compensare gli scostamenti.

5 Effetto degli NOx sulla detonazione in motori SI

BIBLIOGRAFIA indice n.15

I motori a combustione interna sono spesso denominati erroneamente: “motori a scoppio”, l’inesattezza risiede nella parola “scoppio” poiché in realtà la combustione è graduale e controllata, non è una detonazione immediata di tutta la miscela. Nei motori Diesel occorre specificare che l’autoaccensione del fluido non è un difetto poiché esso (soggetto a rapporti di compressione ben più elevati rispetto ai benzina) non è omogeneo questa caratteristica fa sì che i punti caldi (hot spot, in cui avviene l’autoaccensione) si localizzano solo in punti della miscela che presentino le condizioni favorevoli all’autoaccensione e non in tutta la camera contemporaneamente:



Nei motori Benzina invece il fluido in camera è omogeneo e la combustione avviene per propagazione di un fronte di fiamma generato inizialmente da una scintilla creata fra gli elettrodi della candela e che si propaga in tutto il cilindro:

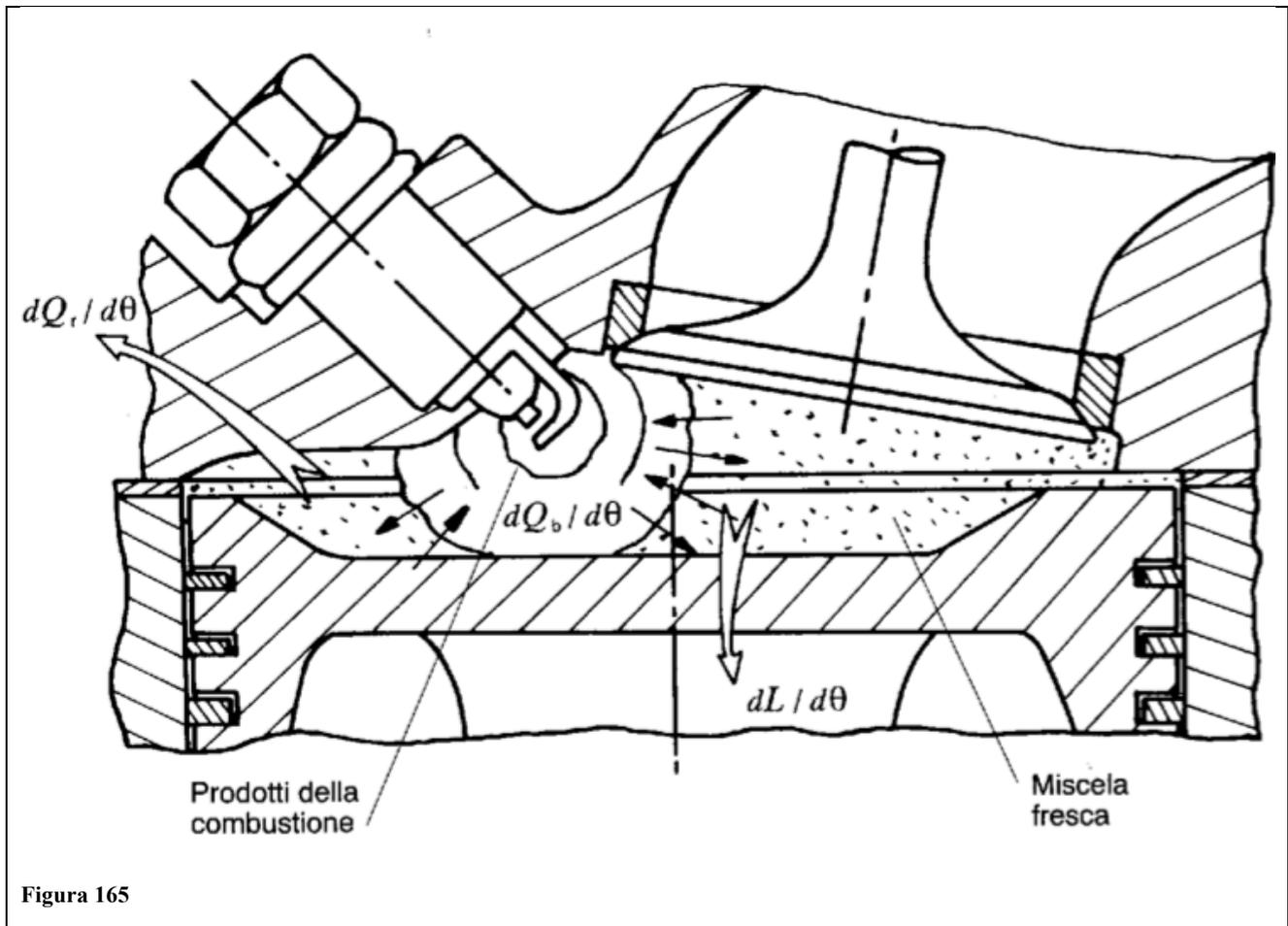


Figura 165

Per via dell'omogeneità del fluido l'autoaccensione della miscela è un fenomeno molto pericoloso e dev'essere impedito, per non incorrere in uno scoppio istantaneo di tutta la miscela che porterebbe al danneggiamento del motore entro pochi cicli.

Lo studio che andremo a riportare ora mostra la tendenza degli NOx a favorire l'accensione spontanea della miscela, fenomeno particolarmente pericoloso per i motori SI. Come primo obiettivo si cercherà di capire come e quanto questa molecola influenzi la detonazione della miscela.

In un qualsiasi motore la miscela presente all'interno della camera è composta sia da quella appena aspirata sia da quella del ciclo precedente, poiché anche a fine corsa di scarico il volume in camera non è nullo, altrimenti si avrebbe una pressione infinita a fine corsa di compressione, a valvola chiusa. Il gas combusto, dei cicli precedenti a temperatura e pressione elevata, miscelandosi

con il fluido fresco proveniente dal collettore d'aspirazione genera un incremento della temperatura di tutta la miscela favorendone la detonazione, visibile osservando le oscillazioni ad alta frequenza della curva di pressione. È proprio all'interno di questi gas incombusti che gli eventuali NO_x formatisi durante le fasi di funzionamento a elevate temperature, raggiunte in camera nei cicli precedenti, vengono a contatto con la miscela incombusta.

Metodologie e Calcoli dello studio

L'obiettivo è quindi quello di valutare e verificare che se effettivamente gli NO_x contribuiscano alla detonazione. Per far ciò si è studiata la miscela durante la compressione e il riscaldamento dovuto alla propagazione del fronte di fiamma.

La prima difficoltà riscontrata è stata la determinazione della quantità di NO_x presente nel gas incombusto poiché la sonda allo scarico rileva la quantità di NO_x generati dalla combustione. Per questa ricerca si è utilizzata una pseudo-aria come ossidante, costituita dal 79% in vol. da Ar e dal restante 21% da ossigeno. La miscela, utilizzata come combustibile, è composta all'88% in vol. da CH₄ e al 12% da C₂H₄. Durante i test si è usato un eccesso d'aria (λ) pari a 1 e 1.5, mentre la temperatura iniziale del fluido all'aspirazione è di 330K corrispondente a 27°C circa, e pressione di 0.1 MPa. Variando il livello di NO_x contenuto nel fluido utilizzato nei test si è monitorato il grado d'accensione spontanea della miscela. Le misurazioni sono avvenute sia durante la compressione, adiabatica e con r_c (rapporto di compressione) pari a 5, sia durante la propagazione del fronte di fiamma. Il calcolo delle reazioni è stato eseguito utilizzando l'applicazione Senkin del pacchetto Chemkin. Senkin è un programma in grado di predire il comportamento temporale della cinetica chimica di una miscela omogenea di gas in un sistema chiuso. Qualora venga richiesto, Senkin è capace di calcolare anche i coefficienti di sensitività del primo ordine rispetto ai parametri dai quali dipendono le costanti di velocità delle reazioni elementari. L'analisi di sensitività consente di individuare a quali parametri del modello le soluzioni risultano maggiormente sensibili. Un'analisi di questo tipo è utile anche per ottenere meccanismi di reazione.

Senkin permette di affrontare diverse tipologie di problema, secondo le condizioni termodinamiche esterne imposte al sistema. Fra le scelte possibili, quella che, meglio delle altre, rispecchia le condizioni che s'incontrano nella camera di combustione di una turbo-macchina è quella che considera adiabatico il sistema e costante la sua pressione. Sotto tali ipotesi la miscela è libera di espandersi e l'entalpia del sistema si mantiene costante.

Tra i diversi meccanismi di reazione che descrivono la cinetica chimica della reazione $\text{CH}_3 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{NO}$ si è scelta il GRI versione 2.11.

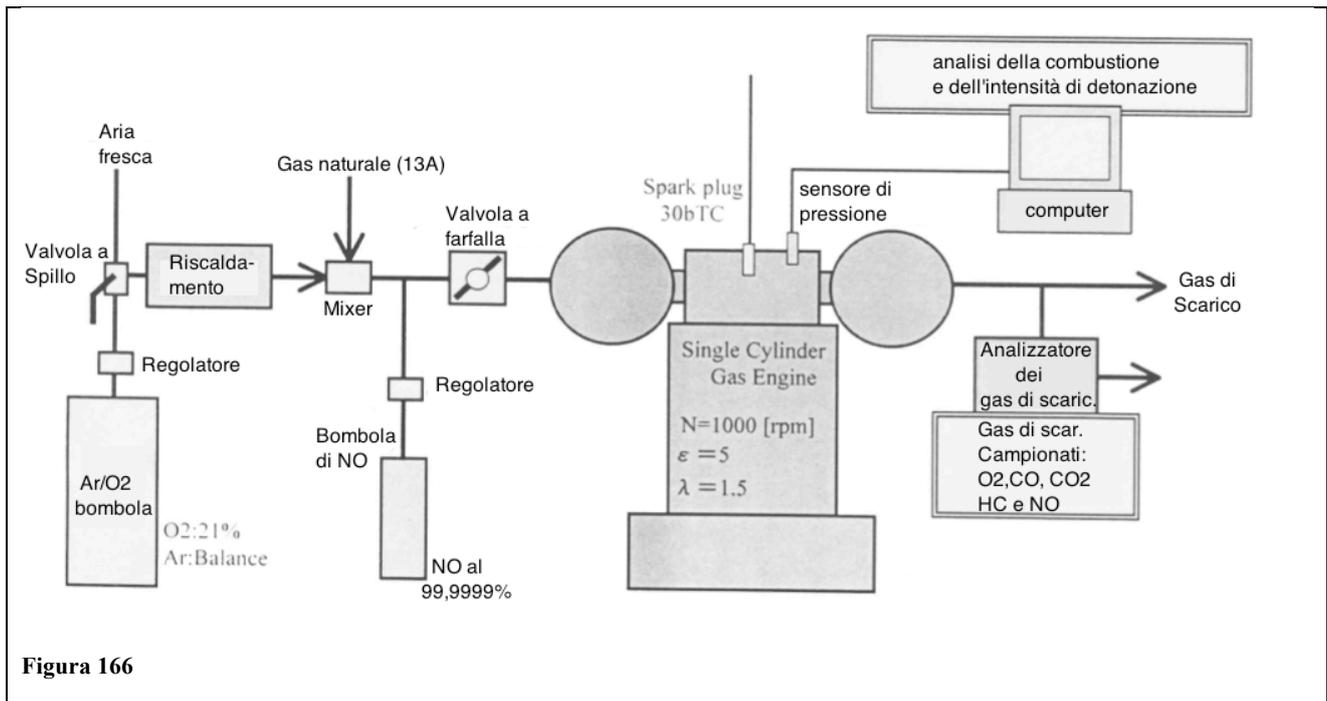
Apparato sperimentale

Le specifiche del motore monocilindrico utilizzato negli esperimenti, sono riportate in tabella:

Tabella 12

Tipo	Motore ad accensione comandata 4 tempi monocilindrico
AlesaggioxCorsa	124x130 mm
Cilindrata	1595 cc
Rapporto di compressione	5:1(Ar/O ₂) 12:1(Air)
Camera di combustione	Verticale e Centrale

Mentre l'apparato utilizzato per gli esperimenti è visibile in Fig.166:



Il motore monocilindrico utilizzato è stato ricavato da un motore diesel modificato per la ricerca. L'aspirazione e lo scarico sono dotati di polmoni smorzatori in grado di sopprimere le pulsazioni caratteristiche dei motori monocilindrici. Il motore è inoltre collegato a un dinamometro (in genere incorporato nel freno del banco). Per dare al motore le stesse caratteristiche di un motore attuale, è stato dotato di un compressore, di un riscaldatore all'aspirazione di un sistema di lubrificazione e di un riscaldatore allo scarico.

Le performance del motore sono state misurate in termini di:

- ❖ Efficienza termica
- ❖ Composizione dei gas di scarico
- ❖ Pressione in camera da cui sono state ricavate:
 - Le condizioni in cui è avvenuta la combustione.
 - L'intensità della detonazione.

La pseudo-aria, all'interno di una bombola in pressione, usata negli esperimenti è portata in aspirazione passando attraverso una linea di by-pass, dotata di un regolatore. La pseudo aria con la composizione descritta in precedenza è contenuta all'interno di 8 bombole per un totale di 47 litri alla pressione di 150 kg/cm². L'impianto è anche dotato di una bombola contenente NO al 99,9% in volume che vanno a miscelarsi con il fluido in aspirazione passando attraverso un regolatore di flusso.

Condizioni e metodi utilizzati negli esperimenti

Si sono eseguiti due tipi di esperimenti:

- Utilizzando la pseudo-aria come ossidante
- Utilizzando aria normale

In entrambi i test il motore è mantenuto a una velocità costante di 1000 rpm e con una fasatura d'iniezione pari a 30° bTC. Per ottenere un indice di paragone si è preriscaldata dell'aria secca a 300 K tipica temperatura ambientale e durante il funzionamento del motore si è utilizzato un λ pari a 1 con un rapporto di compressione pari a 12. Poiché il rapporto fra i calori specifici, γ , della pseudo-aria è pari a 1,61 ed è più elevato di quello dell'aria, la temperatura dei gas incombusti, dopo la corsa di compressione è maggiore di quella dell'aria. Le caratteristiche della detonazione dentro il cilindro variano molto in funzione della temperatura del fluido che si ritrova al proprio interno, per cui si è dovuto adottare un accorgimento che renda la temperatura di fine compressione pari a quella dell'aria atmosferica, per far ciò il rapporto di compressione è stato abbassato a 5 arrivando a una temperatura di 700 K pari a quella dell'aria utilizzata come indice di paragone. Gli esperimenti sono stati condotti con un rapporto λ pari a 1 e 1.5, quest'ultimo valore è stato utilizzato per i test con aggiunta di NOx, contenuti in una bombola, a una BMEP costante pari a 0,4 (MPa). I test in cui venivano aggiunti gli NOx seguivano la seguente procedura: in primo luogo si accende il motore e lo si lascia riscaldare alimentandolo con dell'aria, dopo questo warm-up si passava alla miscela di Ar-O₂ cambiando la linea di alimentazione con quella della bombola, in modo che la pseudo aria a temperatura e pressione controllate da un regolatore, arrivasse alla camera di combustione. L'analizzatore dei gas di scarico è usato

sia per studiare la concentrazione di NO_x nel gas di scarico, sia per aggiustare opportunamente λ . Una volta a regime, l'alimentazione di NO è gradualmente aggiustata e si misurano: le performance del motore, le caratteristiche della detonazione e della composizione dei gas di scarico, a concentrazioni variabili di NO_x residui.

Le caratteristiche delle detonazioni sono state misurate valutando l'ampiezza delle oscillazioni ad alta frequenza, caratteristiche della curva di pressione, rilevata all'interno del cilindro, durante la detonazione. La frequenza delle oscillazioni tendenzialmente è costante e funzione delle dimensioni del cilindro e della velocità del suono dei gas contenuti al suo interno. Le caratteristiche acquisite tramite il sensore sono poi state filtrate da un filtro passa-banda al fine di dividere le armoniche a bassa frequenza da quelle ad alta, rendendo più chiara la lettura dei risultati. L'intensità delle detonazioni (KI=Knock Intensity) è stata registrata con un circuito analogico a ogni ciclo. Con il motore con cui si sono eseguiti i test, le detonazioni diventano udibili da un livello d'intensità pari a 50 kPa e il rumore diviene piuttosto intenso a 75kPa.

Per ottenere dei valori (sui quali compiere delle valutazioni), che tenessero conto della dispersione ciclica e che fossero rappresentativi delle detonazioni, si sono utilizzati i valori medi dei dati raccolti. Si è così determinato il limite KI delle detonazioni pari a 100 kPa, questo valore è del 30% minore rispetto al più alto valore misurato su 350 cicli.

Analisi dei risultati ottenuti

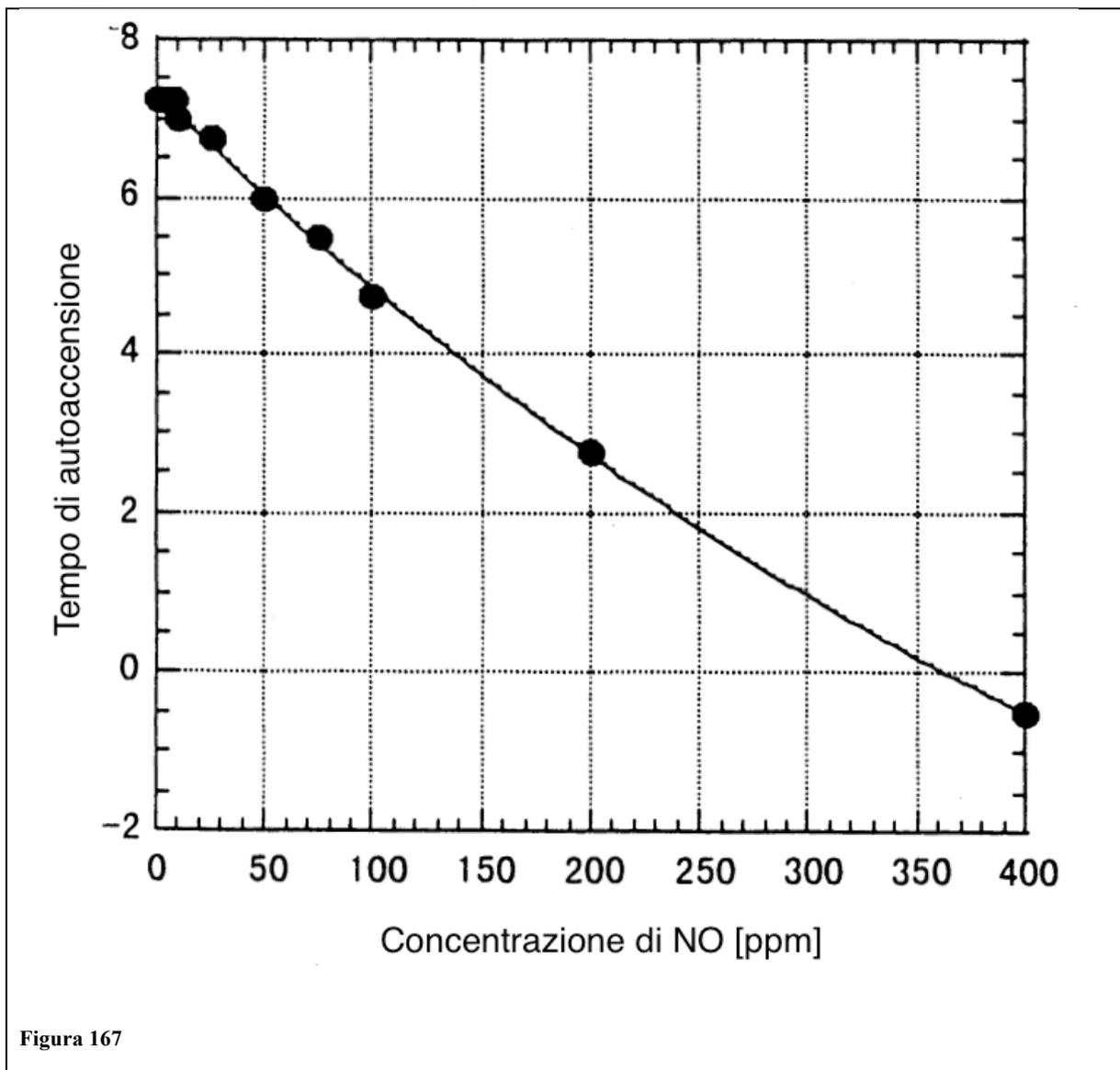


Figura 167

La figura mostra come varia l'autoaccensione della miscela al variare della concentrazione di NOx. Il tempo che la miscela impiega per auto-accendersi è inversamente proporzionale alla quantità di NOx presenti, è così possibile affermare che la presenza di NOx incrementa la tendenza all'autoaccensione della miscela.

Esperimenti di verifica

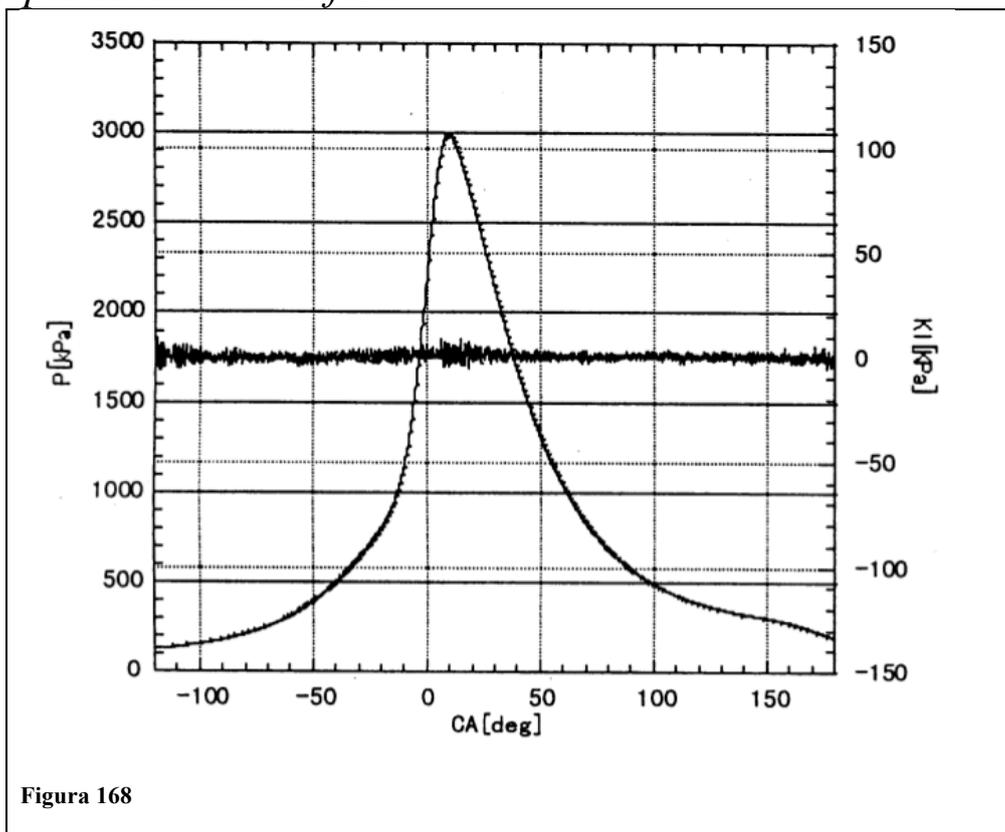


Figura 168

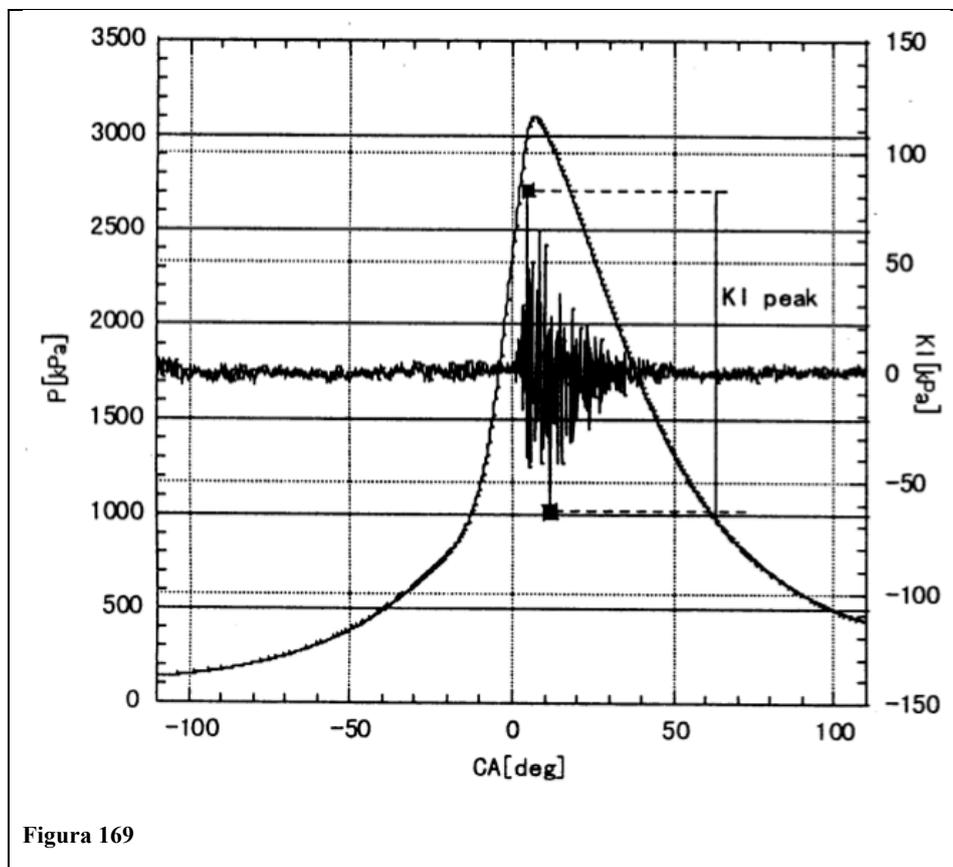


Figura 169

Poiché gli NOx come abbiamo già detto influenzano le caratteristiche della detonazione, si hanno delle ripercussioni sulle curve di pressione in camera e sulle oscillazioni ad alta frequenza ben visibili dopo aver attraversato il filtro passa-alto, i risultati riportati sono stati ottenuti grazie agli esperimenti in cui era aggiunto NOx a basse concentrazioni.

La concentrazione di NOx è rilevata tramite il campionamento dei gas di scarico e dal volume di NOx aggiunto dalla bombola. Per ricavare il valore iniziale si è assunto che il contenuto presente allo scarico (post-combustione) sia pari al 10% di quello pre catalizzatore. Com'è visibile nelle due figure sopra riportate, sebbene per ciò che riguarda le armoniche a bassa frequenza non vi siano differenze rilevanti, sulle armoniche a elevata frequenza si registrano dei picchi in corrispondenza di elevate concentrazioni di NOx, tanto che l'ampiezza di questo rumore arriva a 100 kPa picco-picco.

Nella figura sottostante è invece possibile vedere la relazione fra l'intensità di detonazione media e la concentrazione residua di NOx col metodo menzionato sopra, ottenuta interpolando i punti frutto della media di 350 cicli acquisiti:

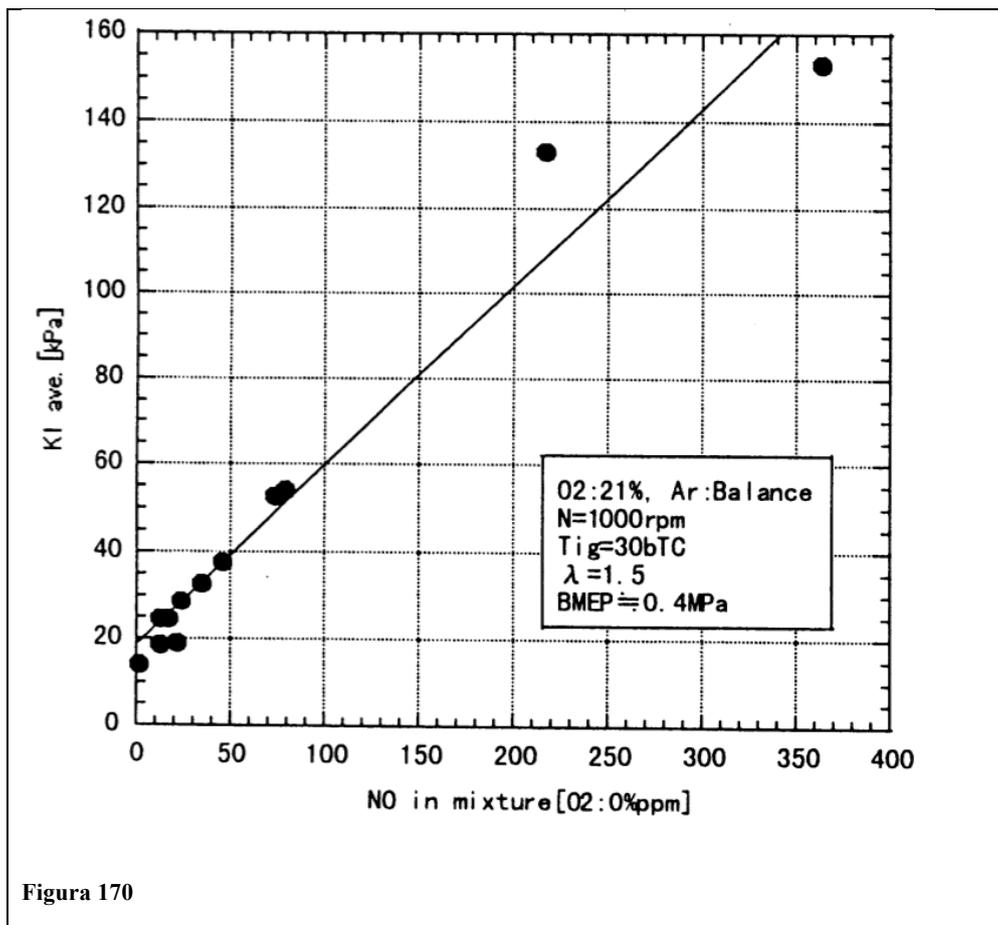
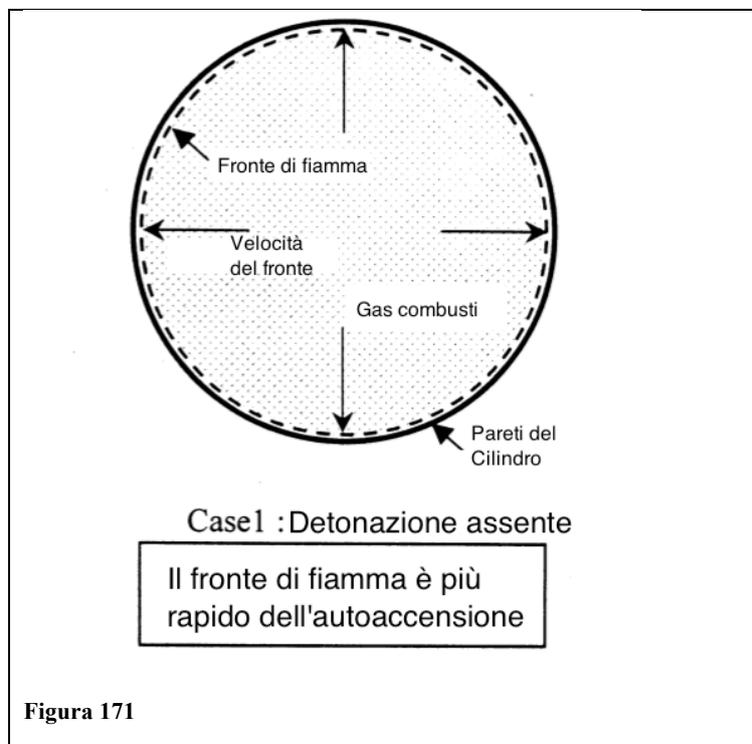


Figura 170

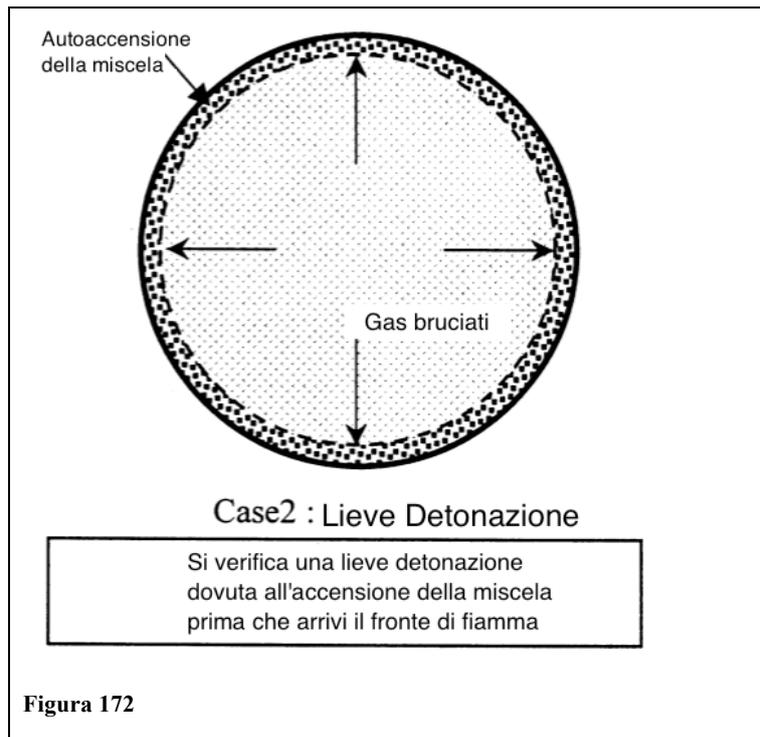
Il valore del KI medio mostra la tendenza a incrementare all'aumentare della

concentrazione di NOx, in particolare i risultati mostrano una relazione lineare tra i residui di NOx e l'intensità di detonazione. A questo punto si considera il meccanismo col quale avvengono le detonazioni, provocate dall'autoaccensione della miscela e aiutate dalla compressione dovuta alla propagazione del fronte di fiamma. È semplice immaginare che l'intensità della detonazione sarà proporzionale alla quantità di gas incombusto che prenderà parte al fenomeno di autoaccensione.

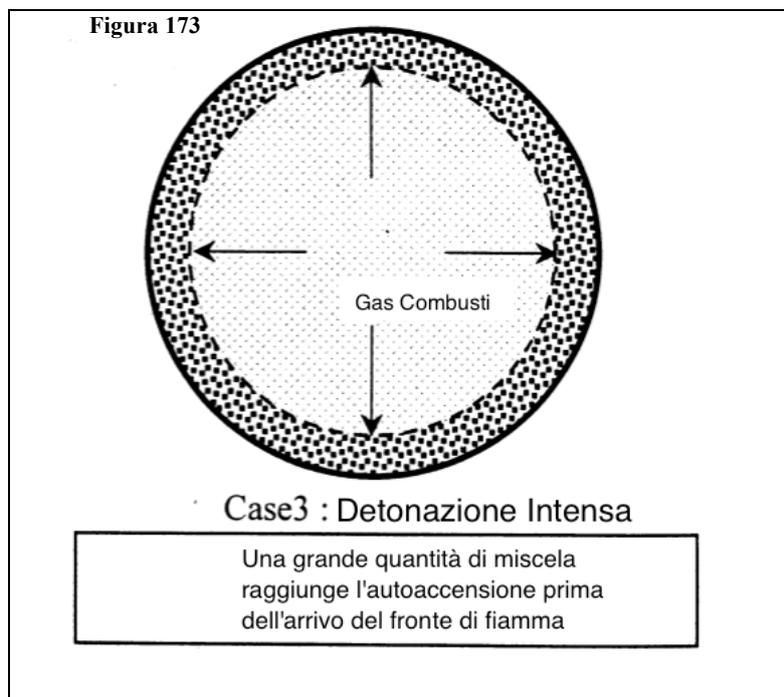
Nelle figure sottostanti si vedono delle rappresentazioni schematiche del fenomeno d'auto-accensione della miscela a tre diversi gradi d'intensità. La KI è risultata essere funzione del tempo impiegato dalla miscela ad auto accendersi e della velocità del fronte di fiamma, ritenuta costante in tutti i test effettuati.



In questo primo caso il fronte di fiamma coinvolge tutta la miscela prima che questa possa auto accendersi e non si presenta alcuna detonazione.

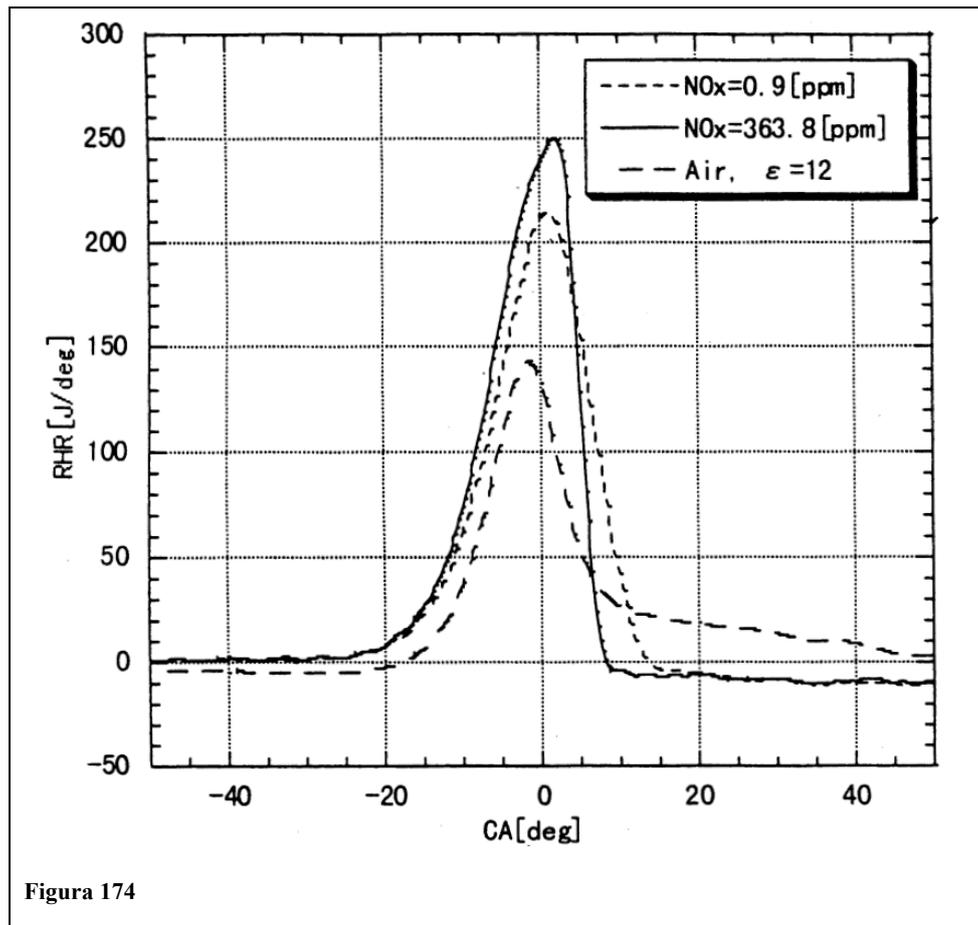


In questo caso la velocità del fronte di fiamma non è sufficientemente elevata per evitare la detonazione che, anche se poco intensa, avviene nelle ultime zone della camera investite dal fronte di fiamma.



Infine in quest'ultima rappresentazione si vede una detonazione piuttosto intensa che coinvolge una quantità considerevole di miscela ancora incombusta dal fronte.

Più veloci saranno i gas ad auto accendersi, e più grande sarà l'ammontare di miscela soggetta a detonazione, questo può essere confermato anche dalle differenti curve di rilascio di calore:

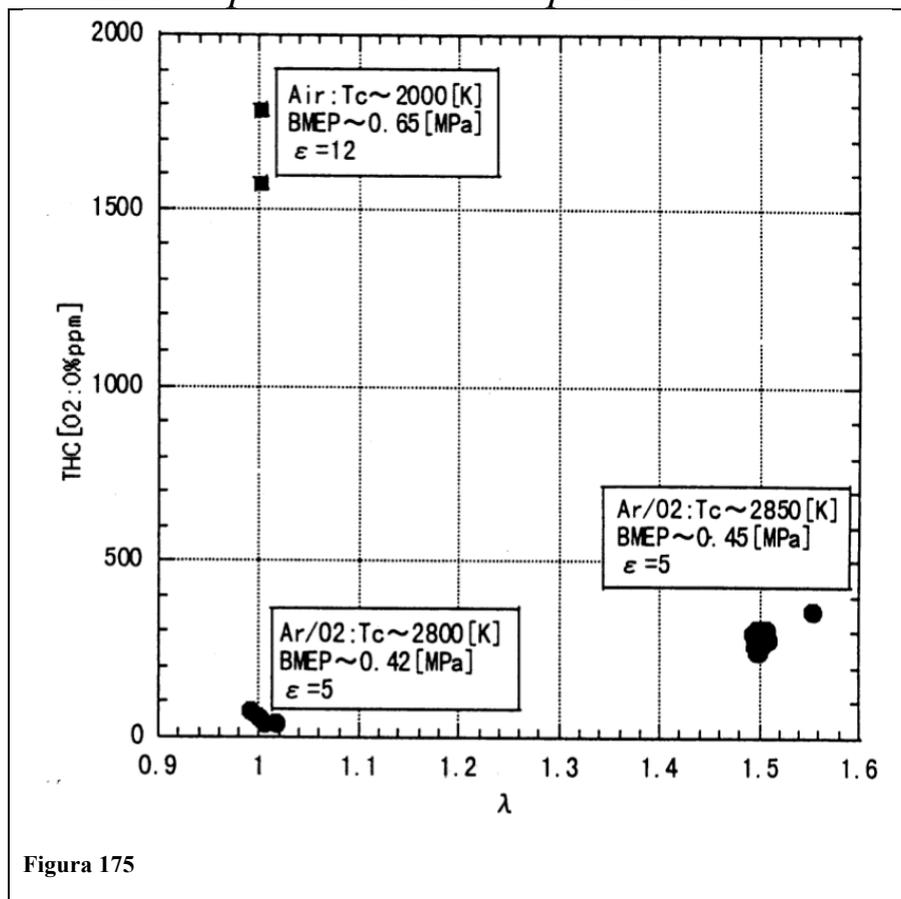


Fino a 10 BTC il processo di combustione a basse concentrazioni di NOx non si discosta da quello ad elevate concentrazioni, superati i 10 gradi prima del PMS, invece, l'andamento delle caratteristiche varia e si ha un netto incremento del rilascio di calore per i test a elevate concentrazioni. Questo poiché fino a 10 BTC il gas incombusto in camera non si accende spontaneamente e non è nemmeno investito dal fronte, una volta superato questa prima fase però:

- Nel caso in cui la concentrazione di NOx sia bassa, si verifica una combustione graduale di tutta la miscela grazie al fronte di fiamma.
- Se invece la concentrazione di NOx è elevata, la costante di tempo d'auto accensione della miscela cala e avviene una detonazione d'intensità proporzionale alla quantità d'incombusti, portando così a un rilascio immediato di calore.

Si è così potuto confermare che gli NOx hanno la caratteristica di favorire l'autoaccensione della miscela incombusta.

Test utilizzando pseudo-aria in aspirazione



Cambiando il fluido in aspirazione e utilizzando la pseudo-aria, composta da AR/O₂ con i necessari accorgimenti già menzionati (ad es il rapporto di compressione, nel grafico denominato ϵ), si è notata una riduzione della quantità d'incombusti dal confronto dei risultati ottenuti con i due diversi fluidi in aspirazione per $\lambda=1$. Questo è dovuto alle differenti caratteristiche della combustione poiché gli stati fisici dei fluidi a fine compressione non presentano scostamenti rilevanti con le modifiche apportate al rapporto di compressione.

Pertanto si esegue il confronto fra la temperatura dei gas durante la combustione e la curva di rilascio di calore. I calcoli riguardanti le variazioni della temperatura di combustione sono stati fatti utilizzando parametri caratteristici della composizione dei gas, come il rapporto dei calori specifici diverso per i due gas. È possibile vedere chiaramente dal confronto delle curve di rilascio calore in fig. 176 che la combustione con la pseudo aria è più veloce rispetto quella con l'aria normale.

Guardando nuovamente i cambiamenti delle temperature in camera:

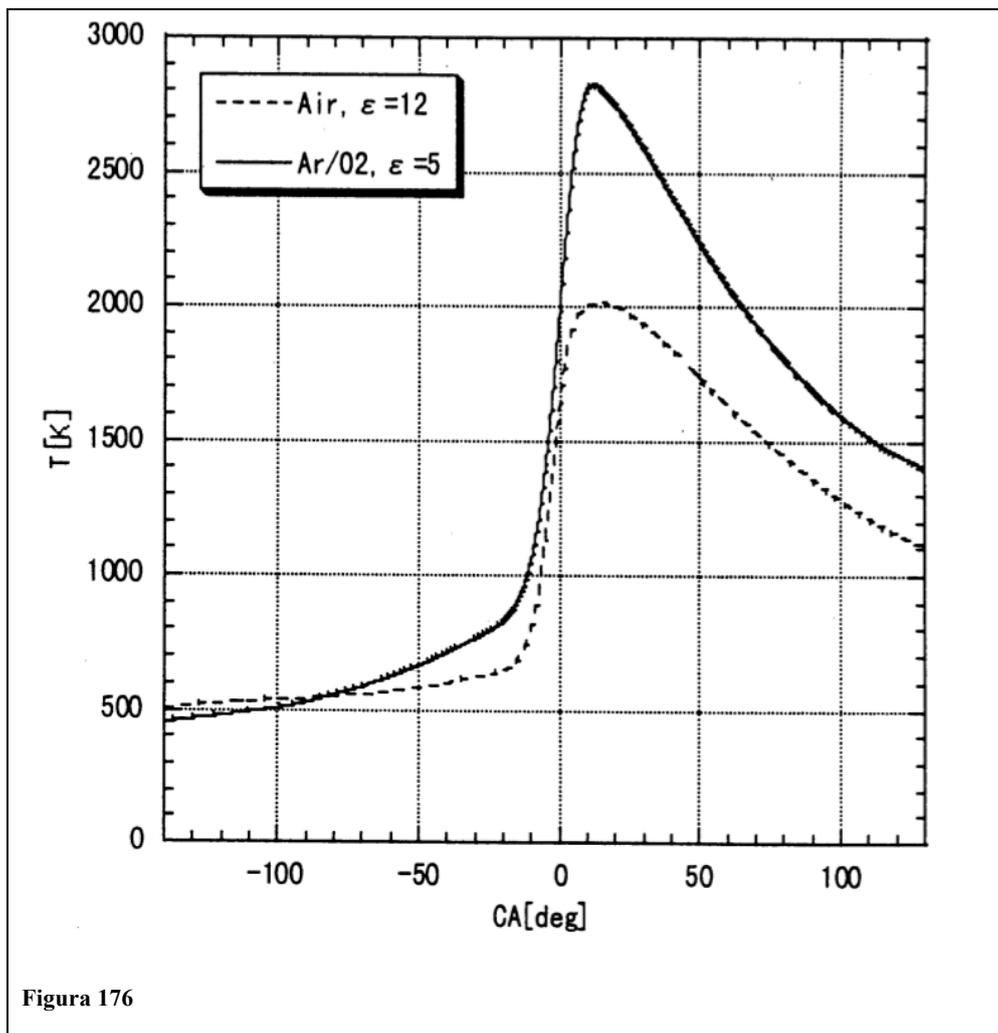


Figura 176

Si può notare che la temperatura di fine compressione è praticamente la stessa, (e coincide a -80°) mentre dopo l'accensione si ha uno scostamento che va via via crescendo, fino a circa 800K in corrispondenza del picco massimo di temperatura. Questa maggior temperatura raggiunta dalla pseudo-aria è

imputabile al rapporto $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, essendo $\gamma_{pseudo-aria} < \gamma_{aria}$ il riscaldamento dell'aria

è più difficile. Ciò significa una temperatura massima più elevata e anche un maggiore gradiente. Queste caratteristiche favoriscono una combustione più veloce e per miscele magre anche una riduzione della concentrazione di gas incombusto.

Conclusioni

Dagli esperimenti condotti si è confermata la tendenza degli NO_x a favorire l'accensione spontanea della miscela, lo studio delle detonazioni ha poi consentito di capirne le cause. Dalla simulazione delle auto-accensioni utilizzando della pseudo-aria composta da Ar e O₂ si può affermare che:

- Vi è una correlazione iperbolica fra la costante di tempo d'auto-accensione e la quantità di NO_x.
- All'aumentare della concentrazione di NO_x aumenta l'intensità della detonazione a causa di quanto detto nel punto precedente.
- Per via delle diverse proprietà fisiche, quando si utilizza la pseudo-aria la temperatura in camera incrementa, e di conseguenza si ha una maggior velocità di combustione, e una riduzione dei gas incombusti.

6 BIBLIOGRAFIA

1. Lino Guzzella and Christopher H. Onder: “Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems”, Springer.
2. Giancarlo Ferrari: “Motori a combustione interna”, edizioni “Il capitello” Torino.
3. <http://www.ngk-elearning.de/>
4. <http://www.cambustion.com/>
5. Nobuhide Kato, Hiroshi Kurachi and Yasuhiko Hamada of NGK Insulators, Ltd: “Thick Film ZrO₂ NO_x Sensor for the Measurement of Low NO_x Concentration”, Sae technical paper series 980170
6. Takashi Abe, Shinichi Kuratani, Yoshinobu Mori, and Daisuke Yanase of Dawasaki Heavy Industres, Ltd: “ Application of Air Fuel Ratio Control to a Motorcycle with Dual Oxigen Sensor”, Sae technical paper series 2011-32-0629
7. Daniel E. Davison, Stephen J. Cornelius, Nick Collings and Keith Glover of Cambridge University Engineering Department: “Observations of Transstoichiometric AFR Spikes in UEGO Sensors”, Sae technical paper series 2000-01-2837
8. Jim Cowart of Massachusetts Institute of Technology: “Air-Fuel Ratio Measurement Diagnostics During Cranking and Startup in a Port-Fuel-Injected Spark-Ignition Engine”, Sae technical paper series 2004-01-1915
9. J. G. Buglass of Shell Research and Technology Centre, Amsterdam, T. D. B. Morgan of Shell Research and Technology Centre, Thornton and J. O. Graupner of Shell Research and Technology Centre, Hamburg: “Interactions Between Exhaust Gas Composition and Oxygen Sensor Performance” Sae technical paper series 982646.

10. Massimo Carriero and Mauro Miorali of Euron and Carlo Gommellini of Agip Petroli: "Poisoning of Lambda Sensor: An Experimental Method to Measure the Lambda Sensor Switch Velocity and Its Effect on Air-Fuel Ratio Excursion", Sae technical paper series 982647
11. Xiaoguo Tang, Ford Motor Company: "An Artificial UEGO Sensor for Engine Cold Start - Methodology, Design, and Performance", Sae technical paper series 2000-01-0541.
12. P.W. Davis and M. S. Peckham of Cambustion Ltd: "Measurement of Cycle-by-Cycle AFR using a Fast Response NDIR Analyzer for Cold Start Fuelling Calibration Applications", Sae technical paper series 2006-01-1515
13. Nicolò Cavina and Fabrizio Ponti of DIEM - University of Bologna – Italy: "afr estimation using in-cylinder pressure frequency analysis"
14. Michael A. Winkler and Eckart Mueller of Technical University of Braunschweig: "Determination of the Air/Fuel Ratio of a SI Engine During Transients With a Standard UEGO Sensor", Sae technical paper series 2001-01-1955
15. Y. Kawabata, T. Sakonji and T. Amano of Energy technology research inst. Tokyo Gas Co. Ltd:" The Effect of NO_x on Knock in Spark-Ignition Engines"

1 ANALISI DATI

1.1 Introduzione

In questa sezione si riporta l'analisi di una serie di dati, di diversa natura, acquisiti durante i test al banco. Questi test sono stati eseguiti al fine di caratterizzare un motore durante i transitori di λ , di un singolo cilindro, misurando la costante di tempo del sensore e osservando gli effetti sull'output di due sensori posti alla confluenza dello scarico dei quattro cilindri.

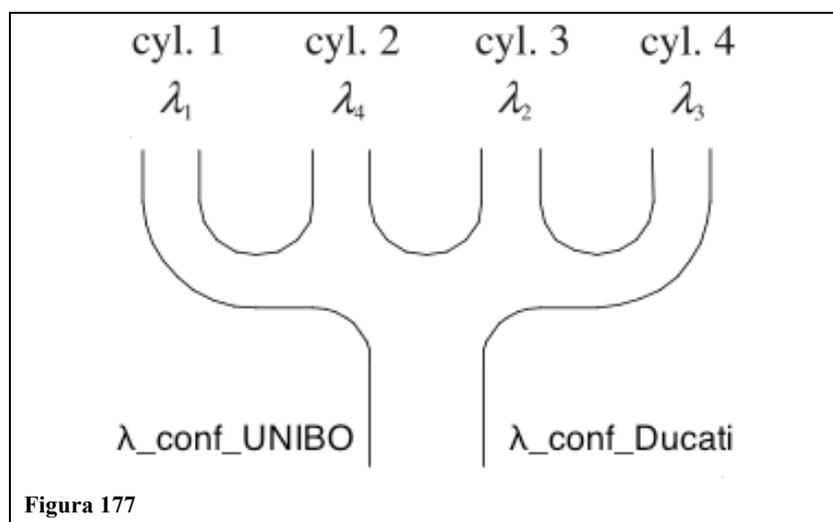
I dati così raccolti durante i test contengono l'output di svariati sensori, quelli di nostro particolare interesse sono sei sensori UEGO.

I dati sono stati analizzati creando uno script (Appendice A) in Matlab (abbreviazione di Matrix Laboratory): noto ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla MathWorks. MATLAB consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi. In questo studio è stato utilizzato per:

- “Plottare” i dati raccolti
- Trasformare i valori da Volt a unità fisiche (bar per la pressione, AFR per i sensori UEGO).
- Vedere come il transitorio del titolo in un solo cilindro influenza la misurazione alla confluenza.
- Ricavare la costante di tempo del sensore.

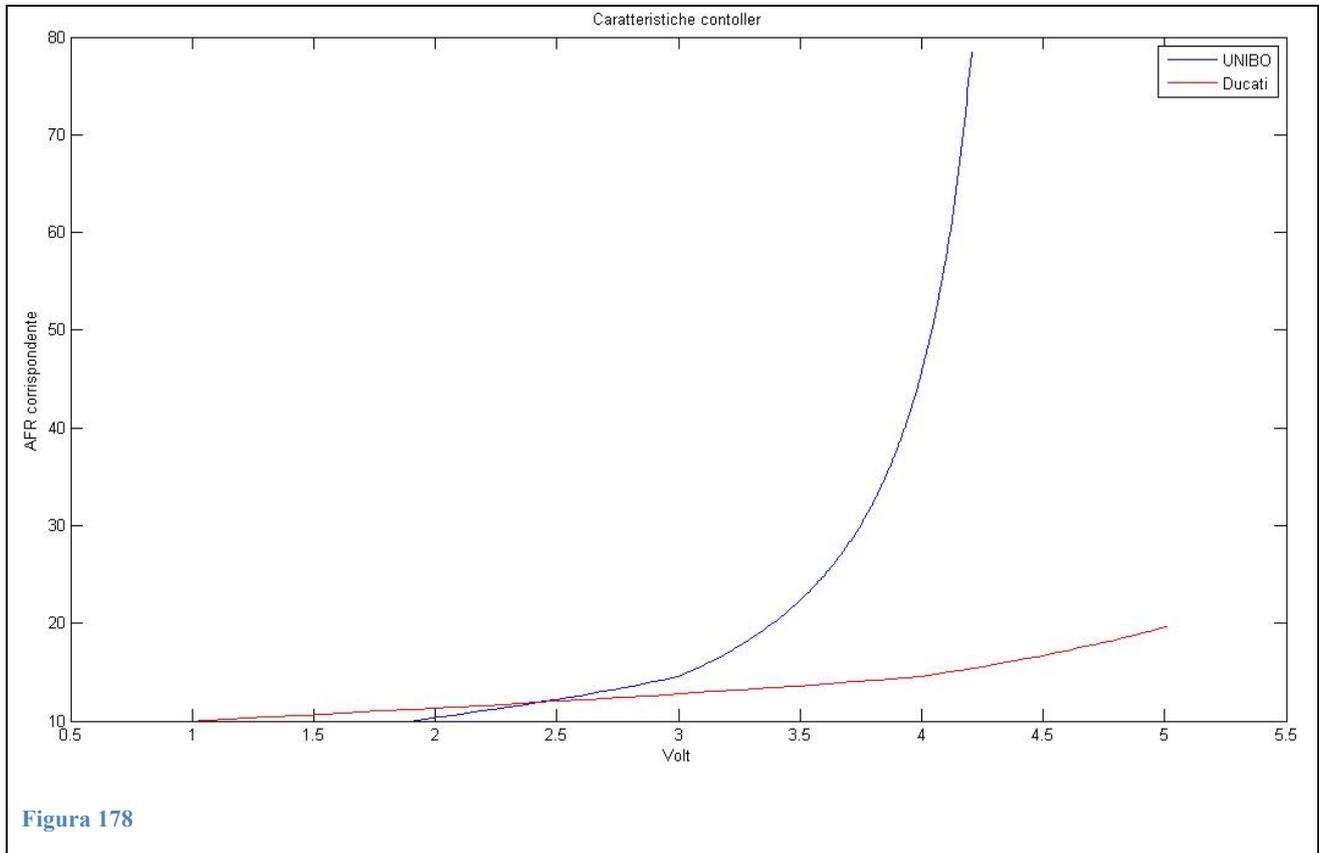
1.2 Descrizione dei test

Allo scarico del motore impiegato per i test (un quattro cilindri, in linea, aspirato) sono stati praticati sei fori: quattro in prossimità della valvola di scarico dei quattro cilindri, e i restanti due alla confluenza. Su ogni foro sono poi state saldate delle boccole opportunamente maschiate per ospitare i sensori.



Il controller delle quattro sonde in prossimità delle valvole (denominato “UNIBO”) è lo stesso utilizzato su una delle due sonde alla confluenza, mentre per l’altro sensore s’impiega un controller (denominato “λ_conf_Ducati”) che filtra maggiormente il segnale.

In figura si riportano le caratteristiche dei due controller sovrapposte:



Il campionamento dei dati avviene a una frequenza di 10 kHz per un tempo di 60 secondi generando un totale di 600000 campioni ad ogni acquisizione.

I dati così raccolti sono poi inseriti in un’unica matrice 600000x12, di seguito si riportano i contenuti delle colonne e i grafici delle grandezze più importanti:

- 1) Durata di ogni ciclo su base tempo.
- 2) Segnale Camma (Scam): Onda quadra di periodo pari a un ciclo motore, formata attribuendo ad ogni campione uno dei seguenti valori: alto (c.ca 5V) o basso (c.ca 0 V) .

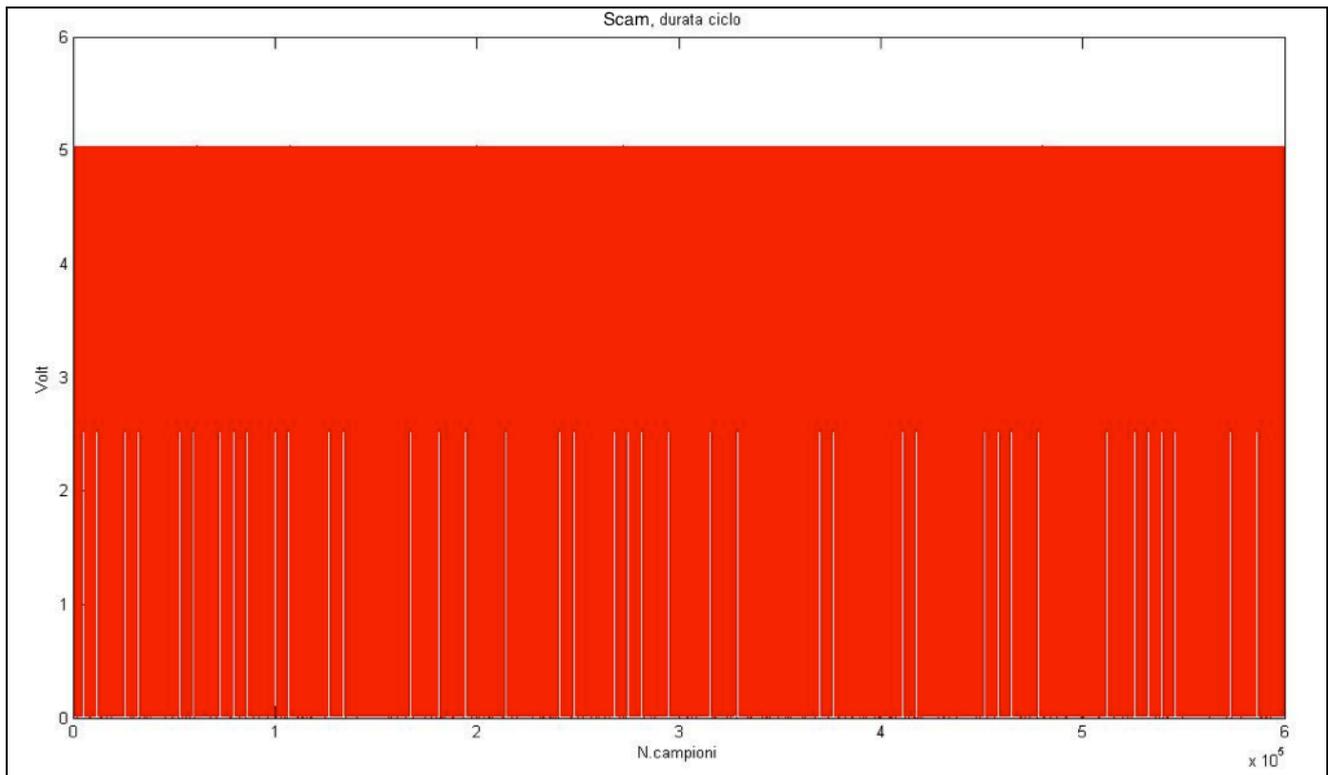


Figura 179

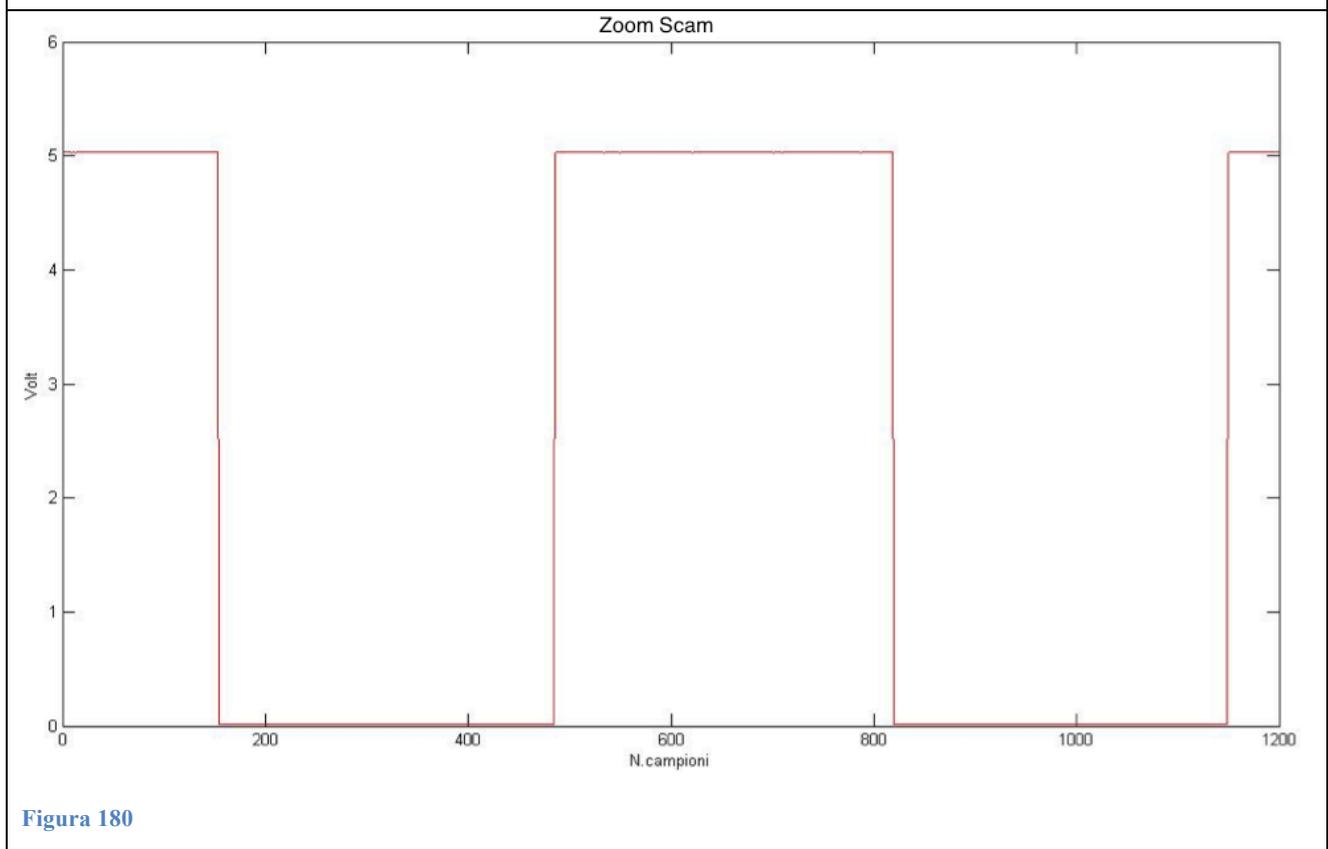


Figura 180

3) Segnale motore (Smot): Insieme di valori che forma una sinusoide basata sui segnali raccolti da una ruota fonica.

- 4) Colonna contenente i valori in “V” del segnale di pressione, scalati di una costante di guadagno e con valore medio nullo, si vedrà in seguito come riportare in bar questo segnale.

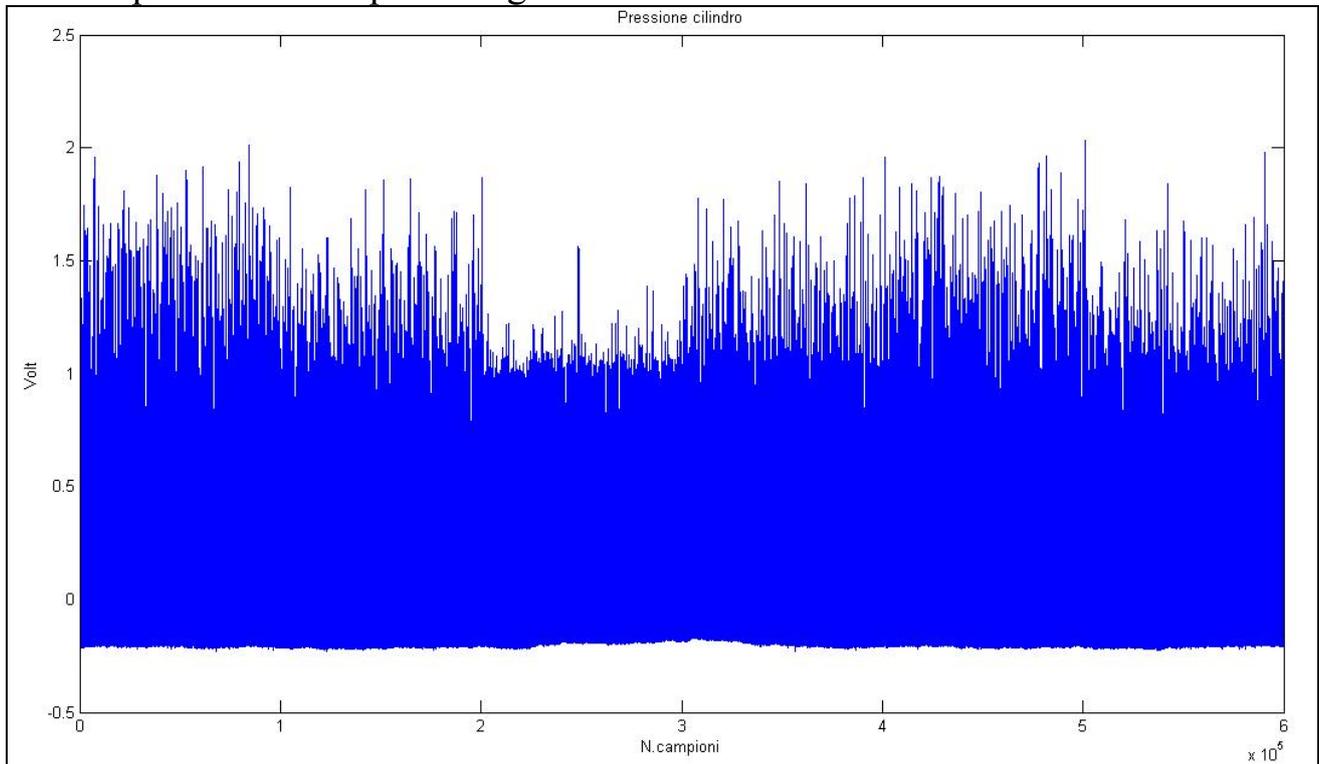


Figura 181

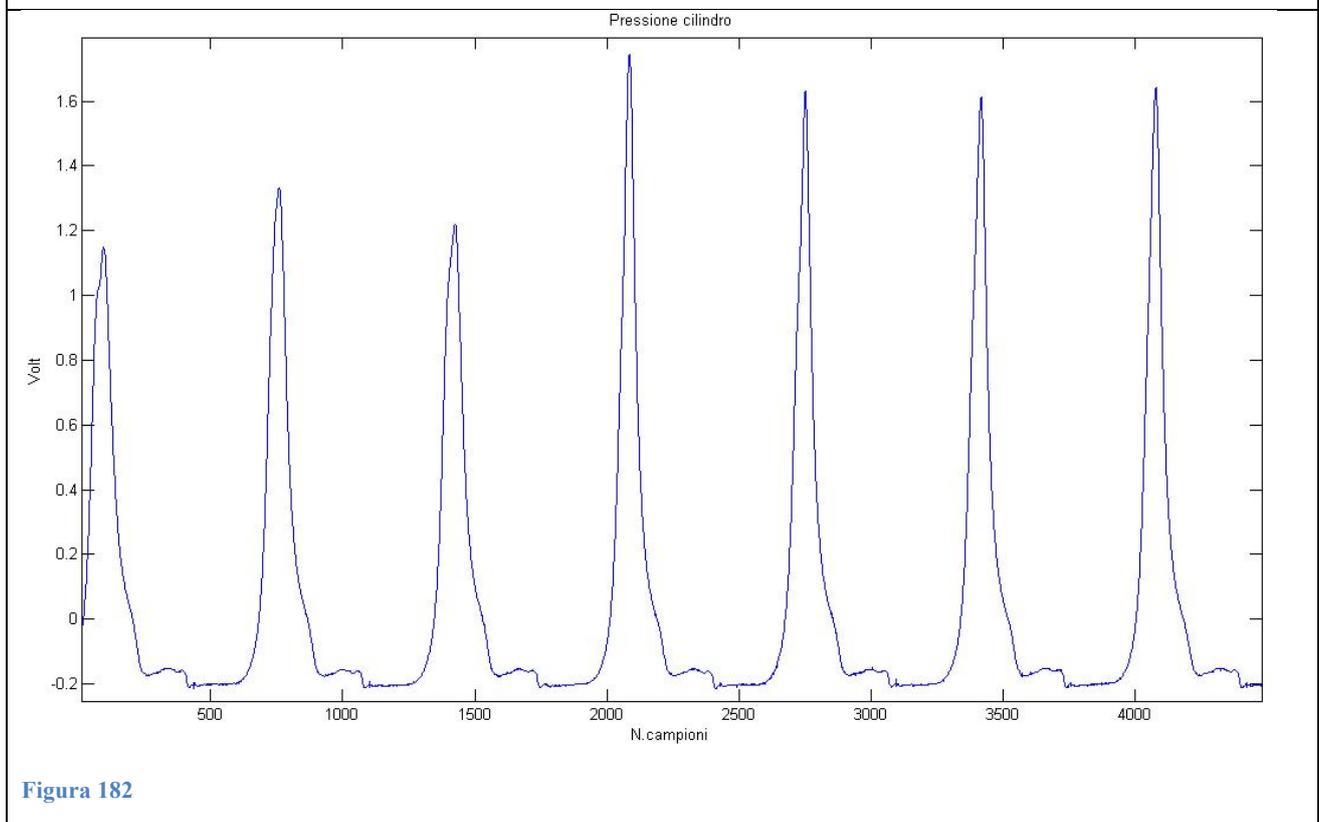


Figura 182

5) Output del sensore λ posto alla confluenza, con controller UNIBO.

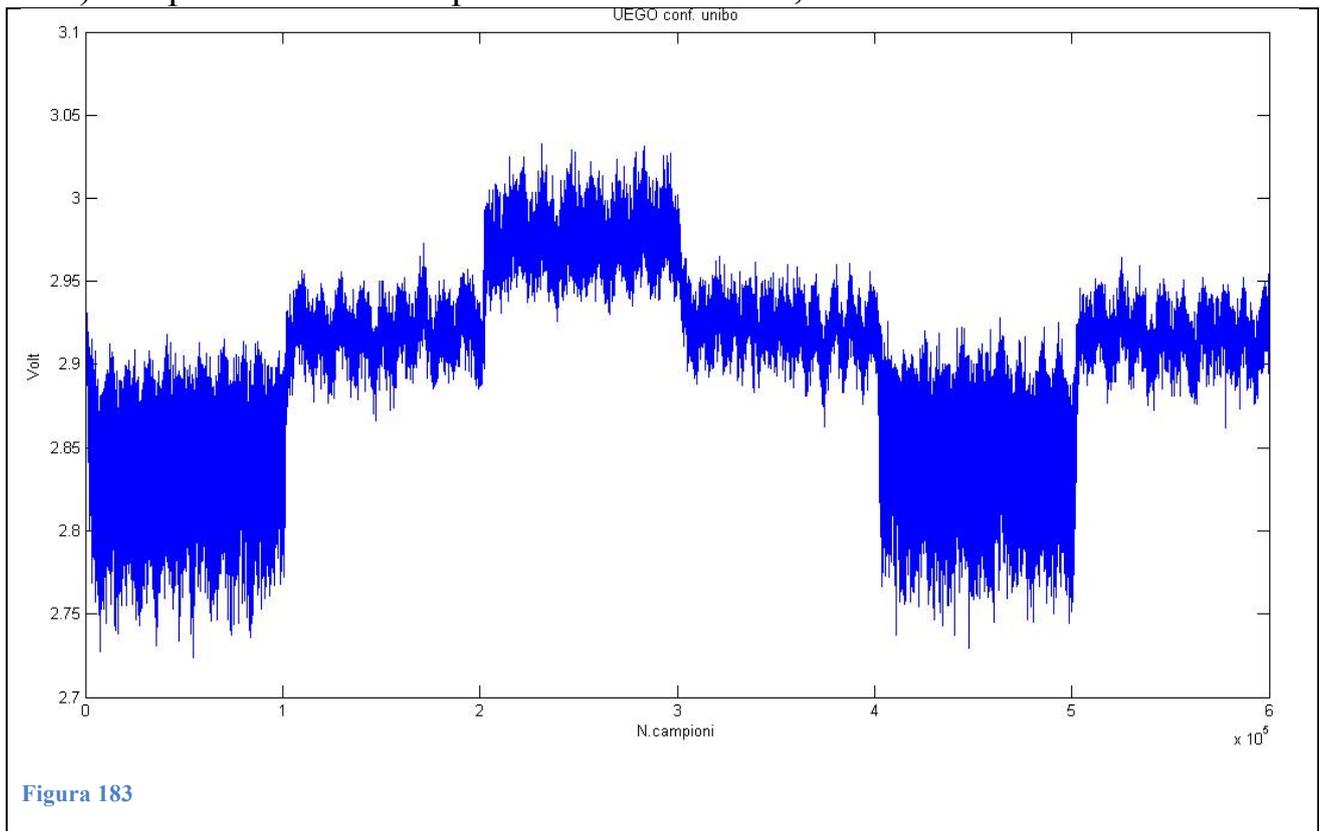


Figura 183

6) Output del sensore λ posto sul cilindro 1

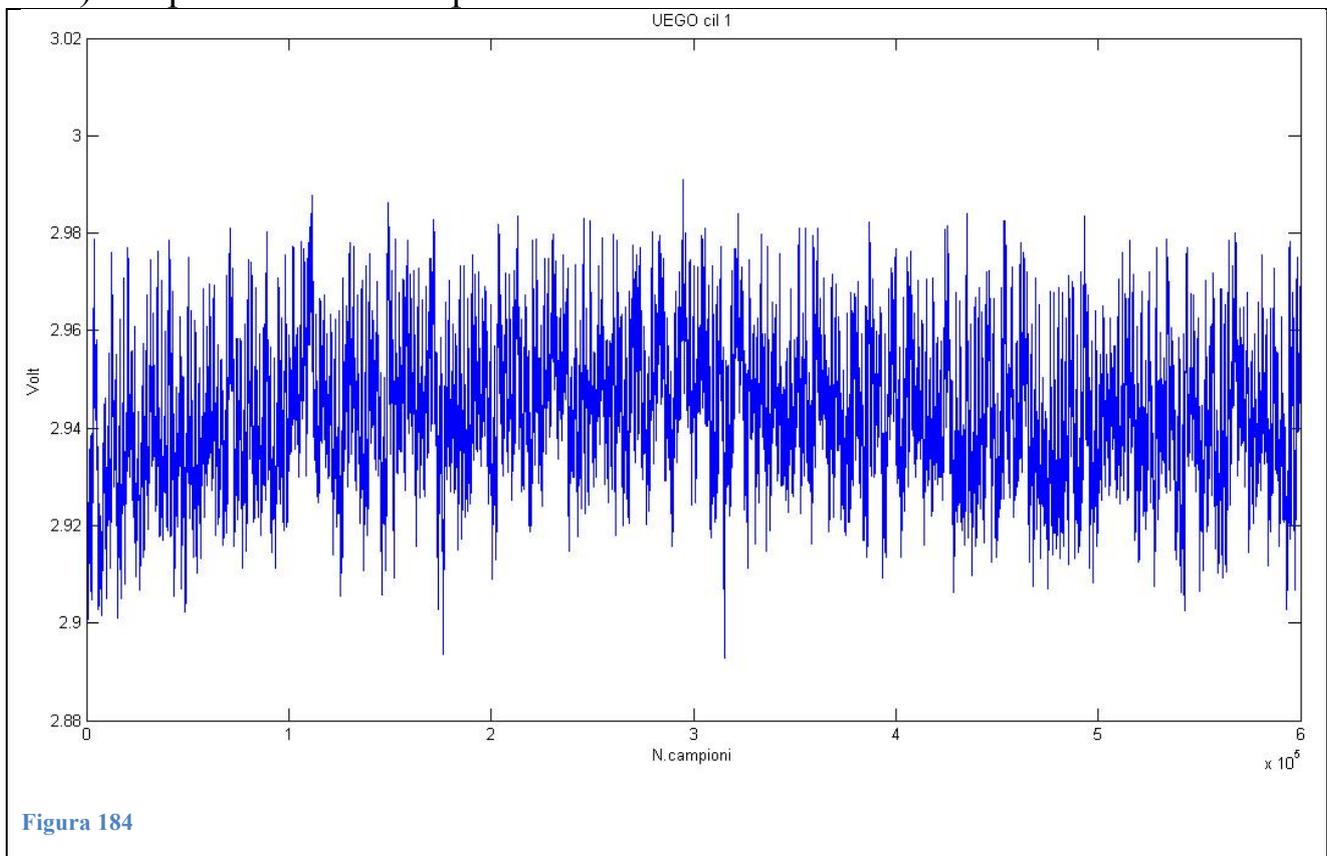


Figura 184

7) Output del sensore λ posto sul cilindro 2

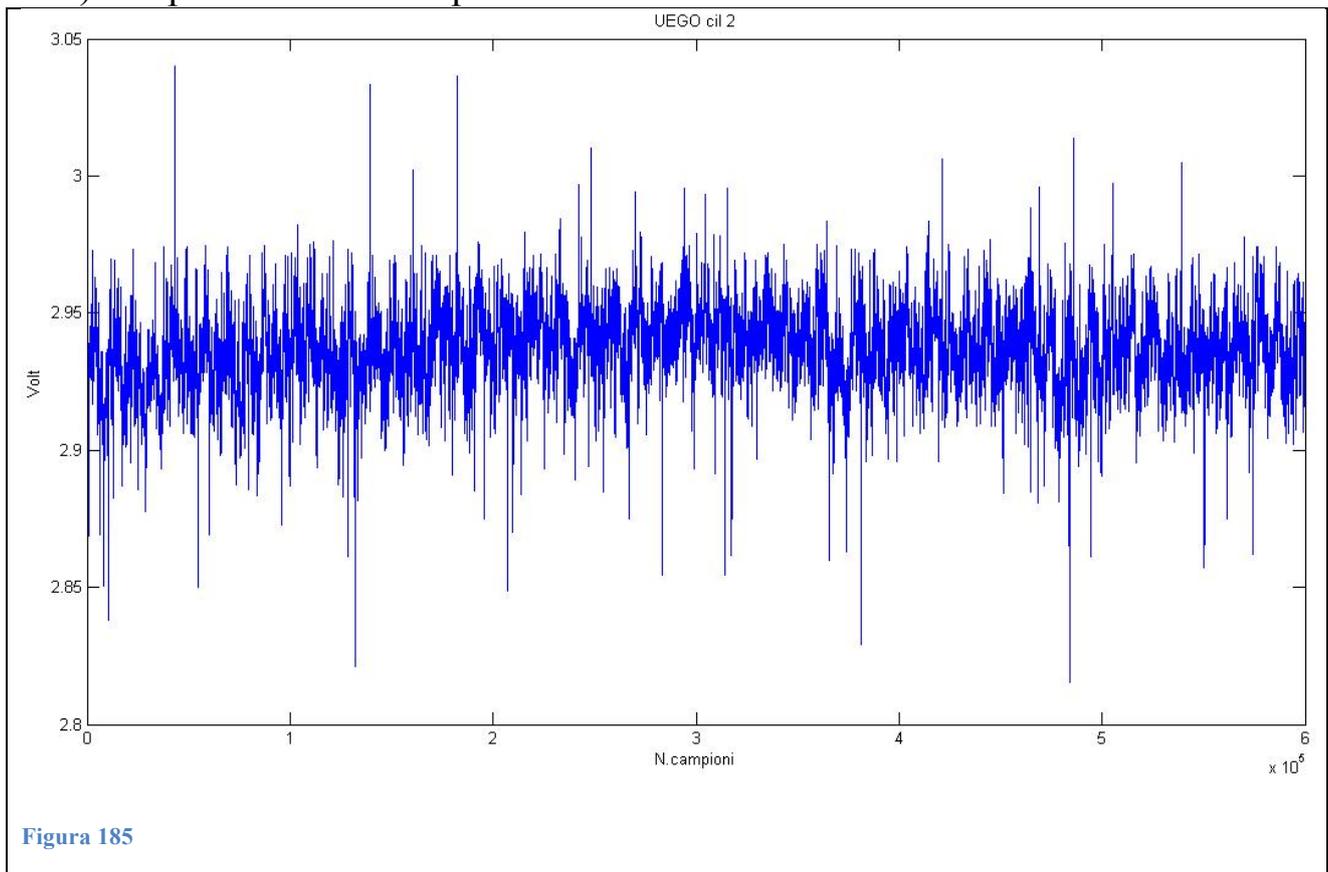


Figura 185

8) Output del sensore λ posto sul cilindro 3

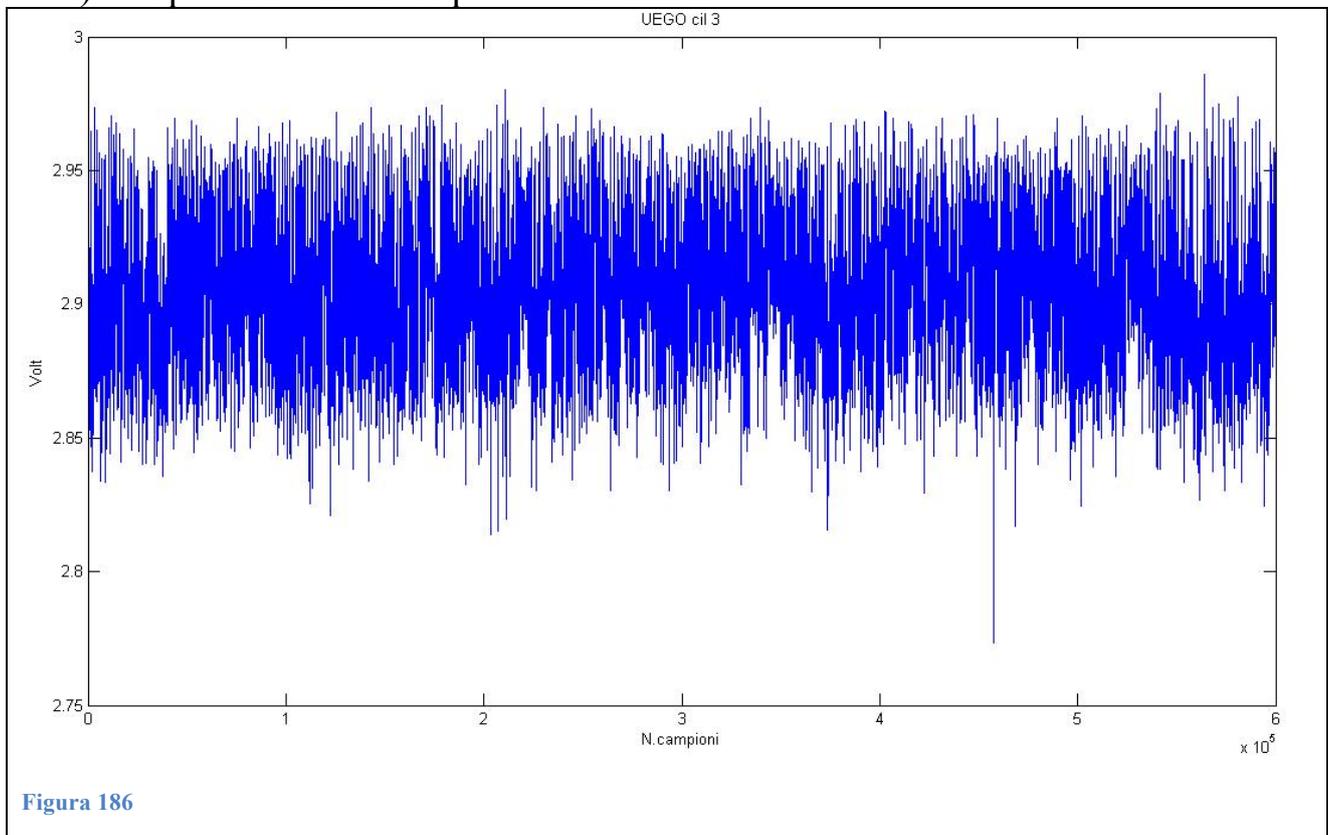
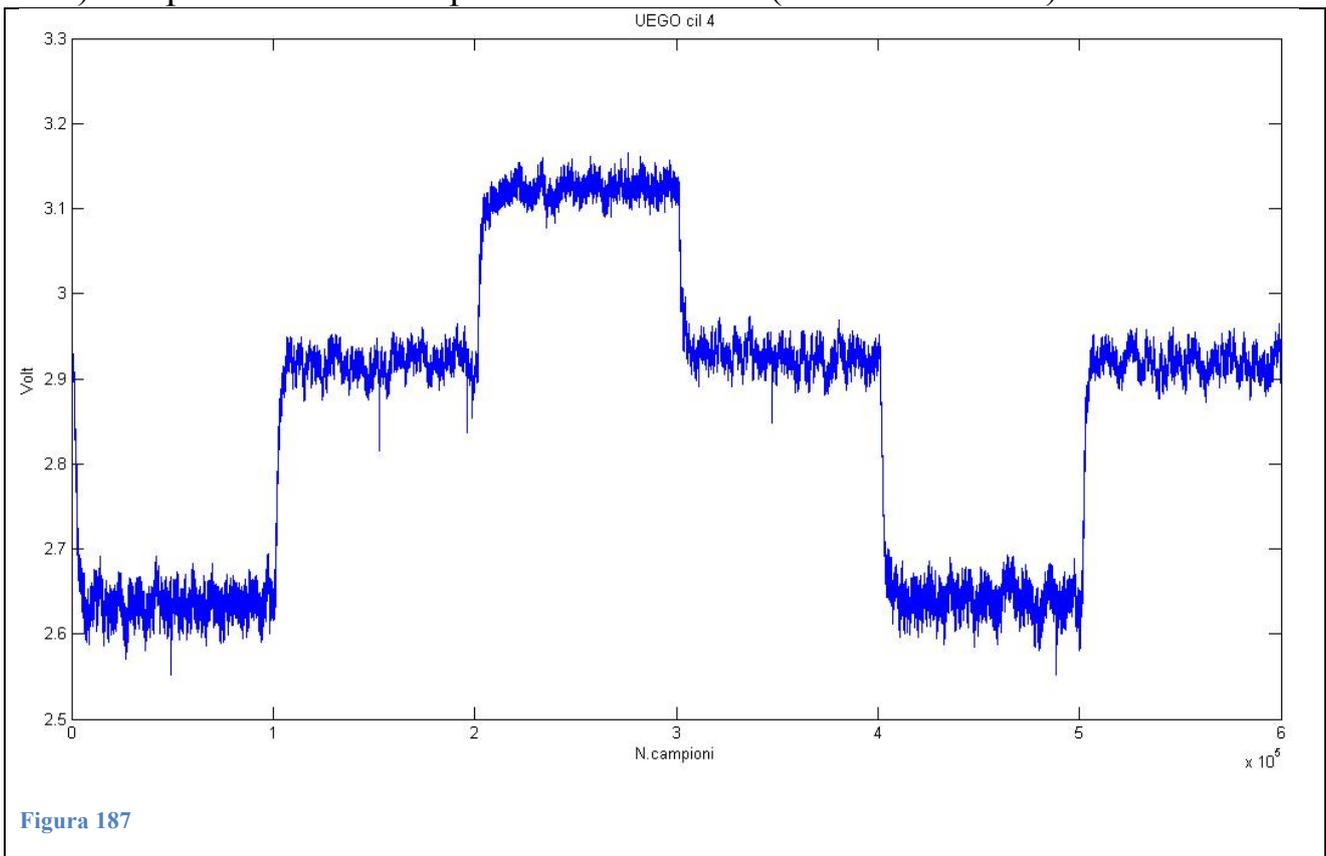
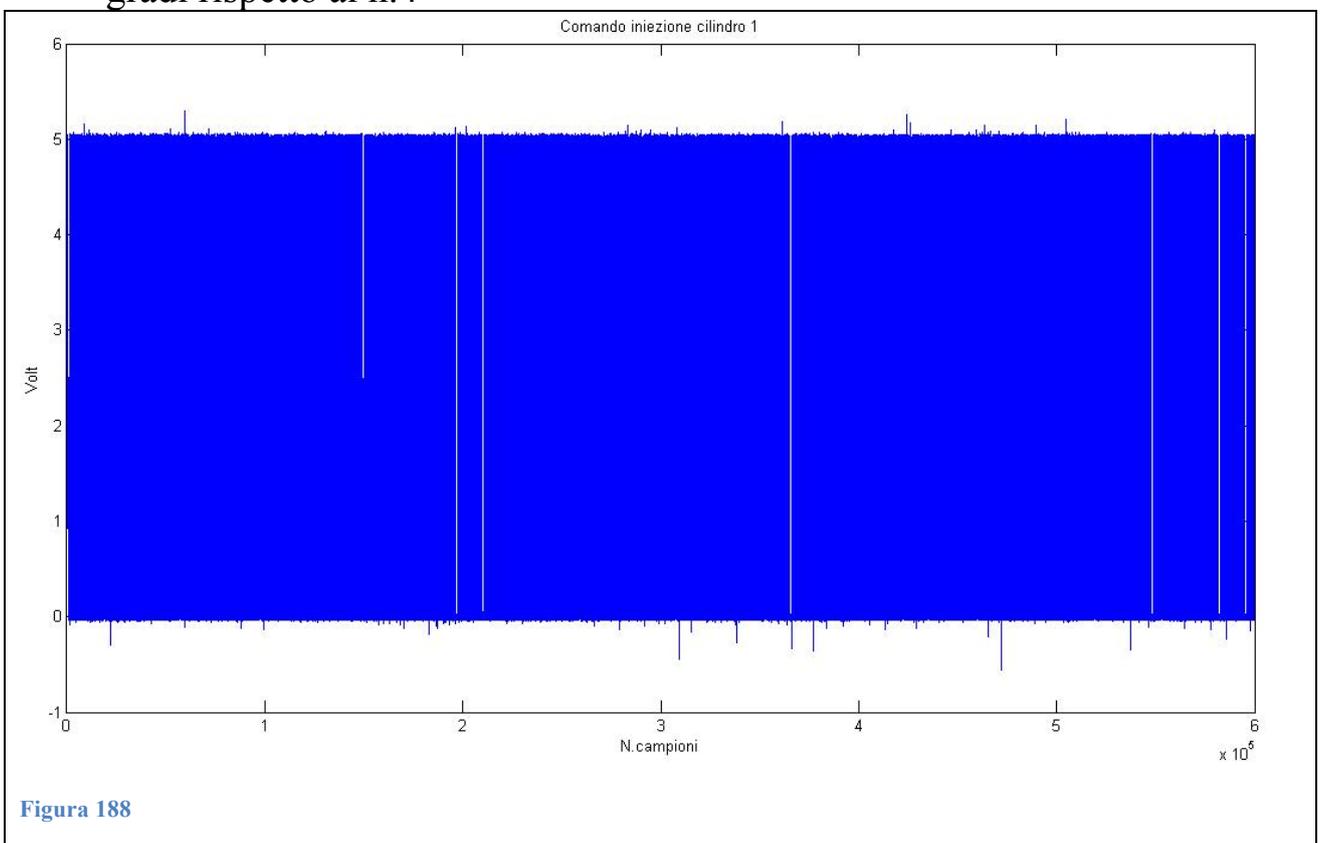


Figura 186

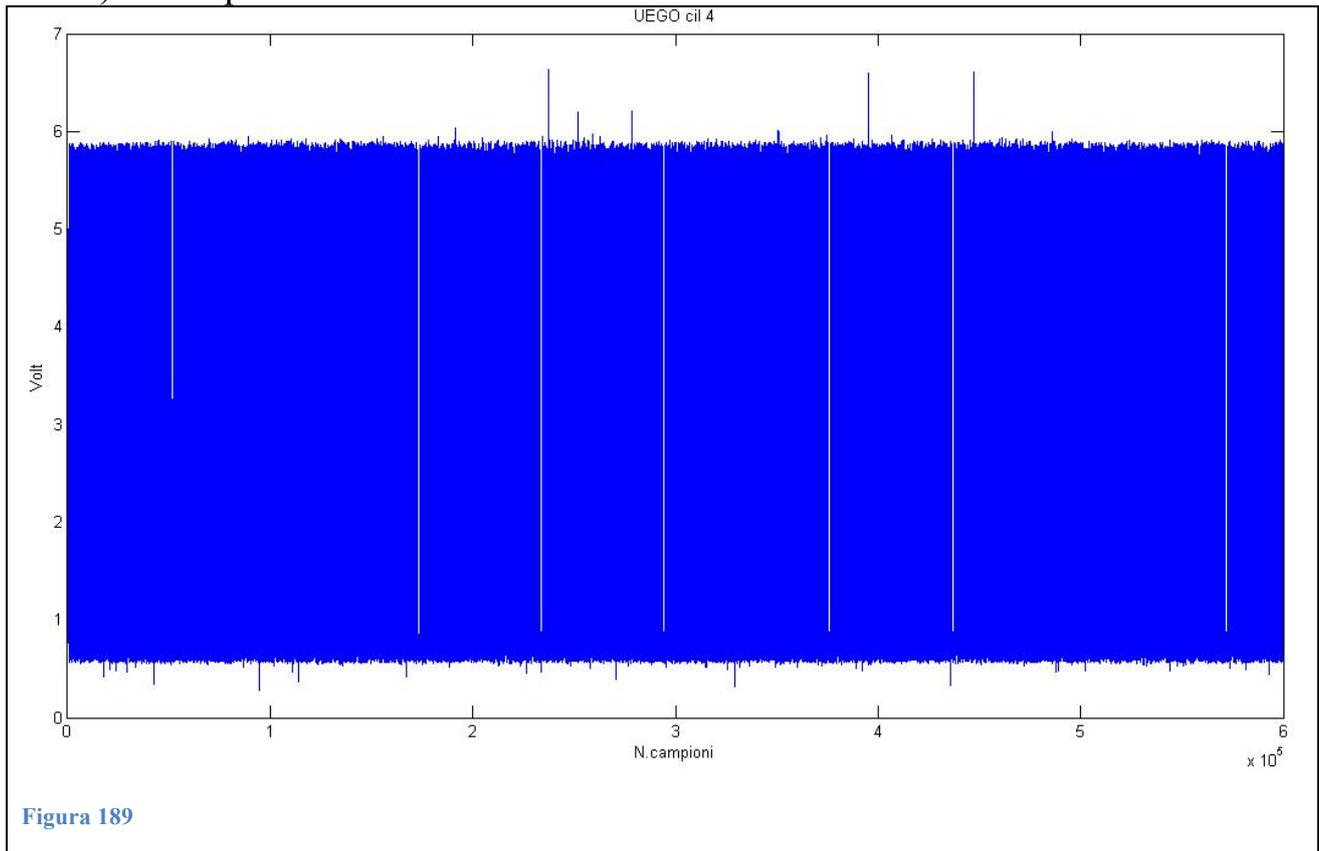
9) Output del sensore λ posto sul cilindro 4 (a titolo variabile)



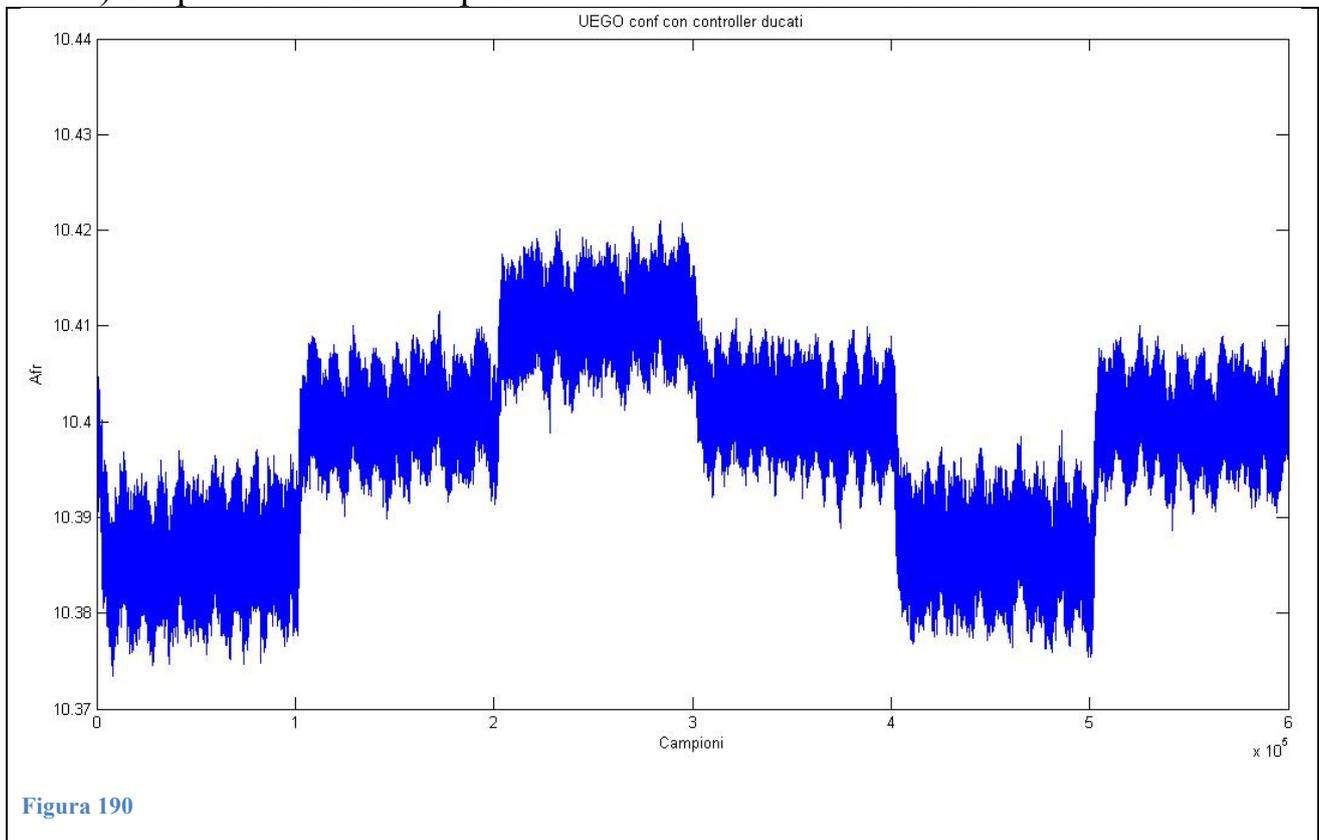
10) Segnale relativo al comando d'iniezione del cilindro n.1 sfasato di 360 gradi rispetto al n.4



11) Onda quadra del comando d'iniezione del cilindro n.4



12) Output del sensore λ posto alla confluenza con controller Ducati.



Affinché le prove siano effettuate correttamente prima di procedere con le misurazioni si utilizzano i quattro sensori posti sui collettori di scarico dei cilindri per controllare in anello chiuso il titolo di ciascuno dei cilindri: questa operazione consente di ricavare il tempo d'iniezione atto a garantire un predeterminato livello di AFR. Durante lo svolgimento del test verrà attuato questo valore, eliminando l'effetto della retroazione. Ovviamente quanto detto, non vale per i sensori alla confluenza il cui output è troppo disturbato perché sia utilizzato in un controllo in retroazione.

Com'è ben visibile, su tutte le misurazioni lambda, è presente del rumore ad alta frequenza, questo può essere attribuito a molteplici fattori, uno di questi è l'ossigeno proveniente dall'ambiente esterno che, infiltrandosi all'interno dello scarico e passando attraverso la boccola saldata su di esso, anche se in piccole quantità, può alterare le misurazioni. Questo fenomeno è favorito dall'atmosfera presente allo scarico, la quale contiene concentrazioni d'ossigeno tendenti a zero.

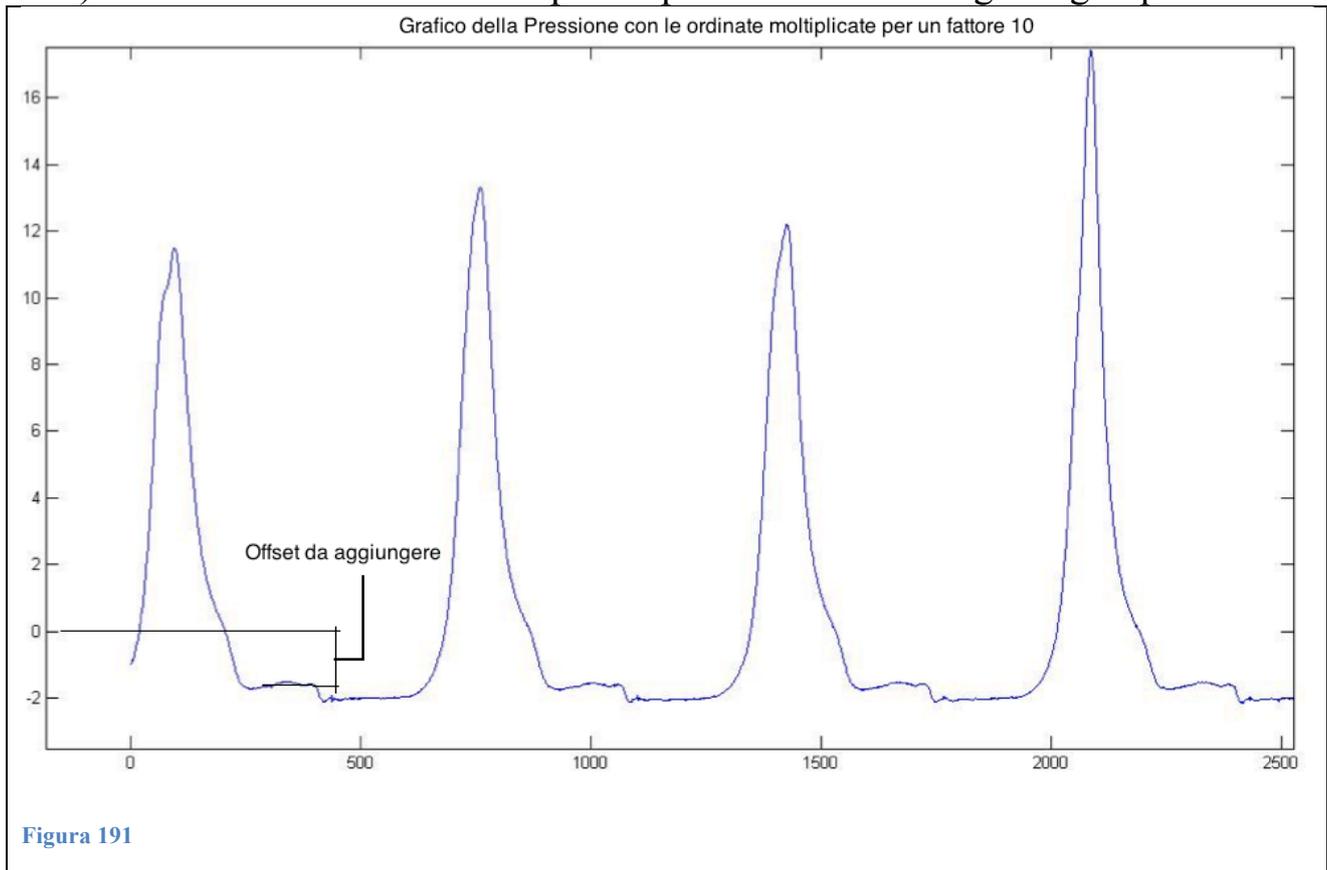
1.3 Elaborazione dei dati

Come primo passo i valori in volt della pressione e delle misurazioni di λ sono stati trasformati in [bar] e valori di [AFR] rispettivamente.

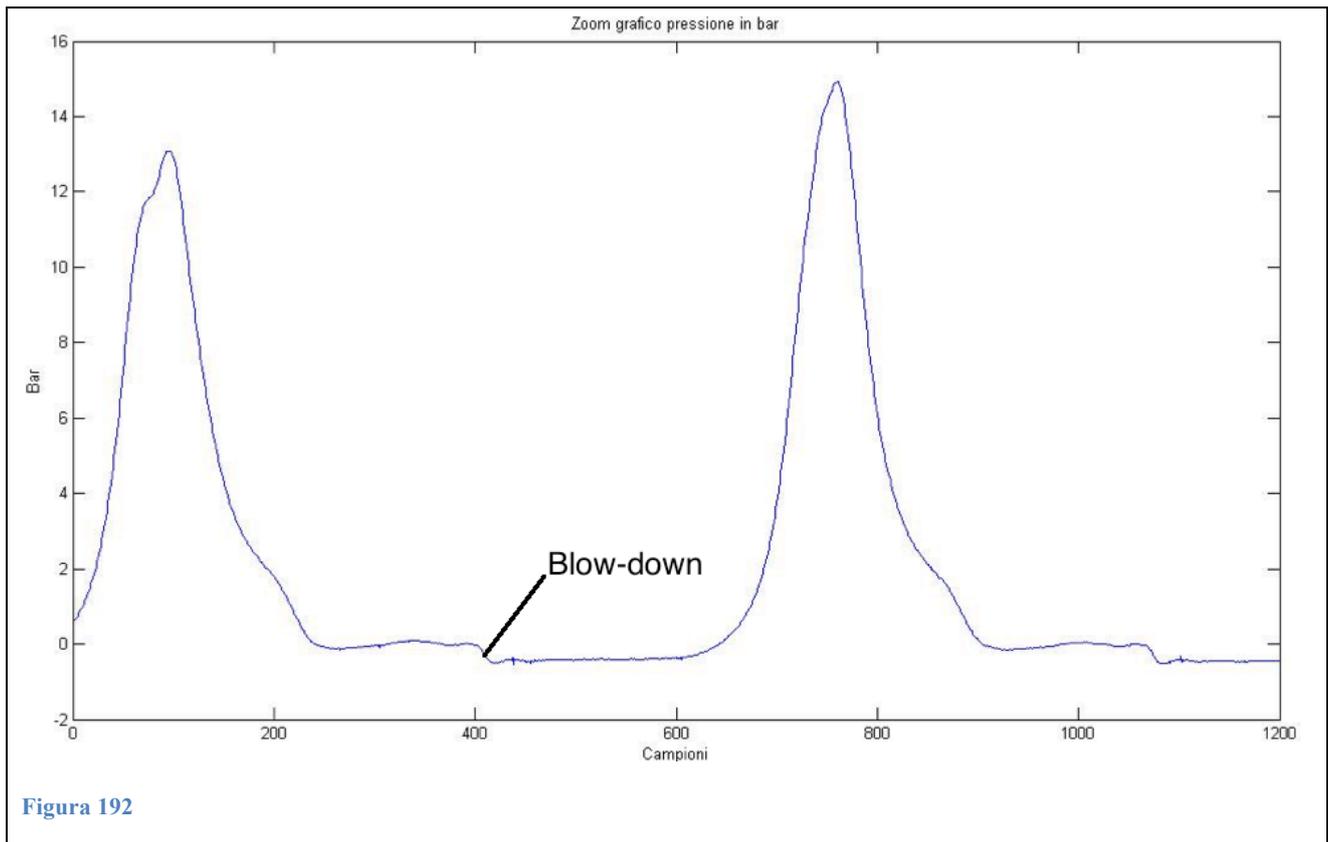
Pressione

Per quanto il grafico della pressione per passare da V a bar, si devono eseguire le seguenti operazioni:

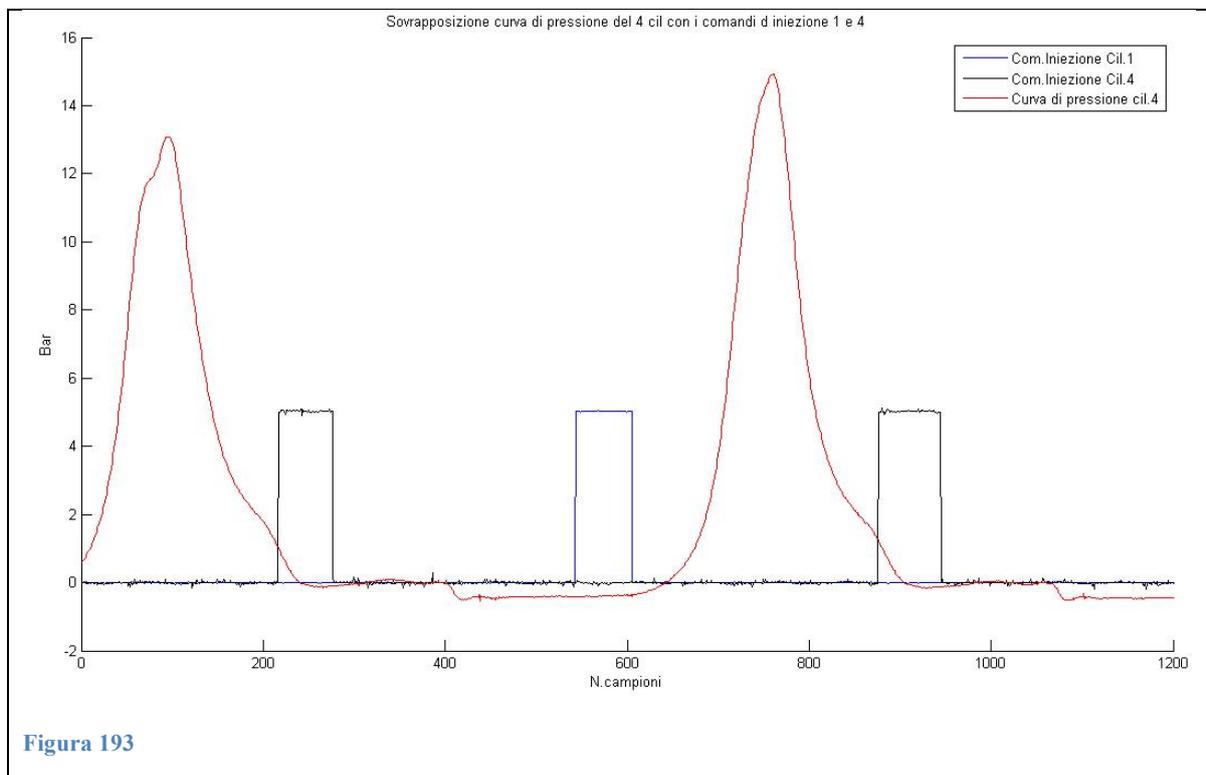
- 1) I valori in Volt vanno moltiplicati per una costante di guadagno pari a 10.



- 2) Una volta fatto ciò si plotta il grafico al fine di trovare l'offset da sommare ai seguenti valori. Per far ciò si prende come valore di riferimento la pressione durante la fase di scarico, prima che avvenga il blow-down dovuto all'apertura della valvola. In questo punto, a meno della contropressione allo scarico (che in un motore aspirato è nell'ordine di grandezza dei mbar), la pressione è pari a quella atmosferica [1bar].



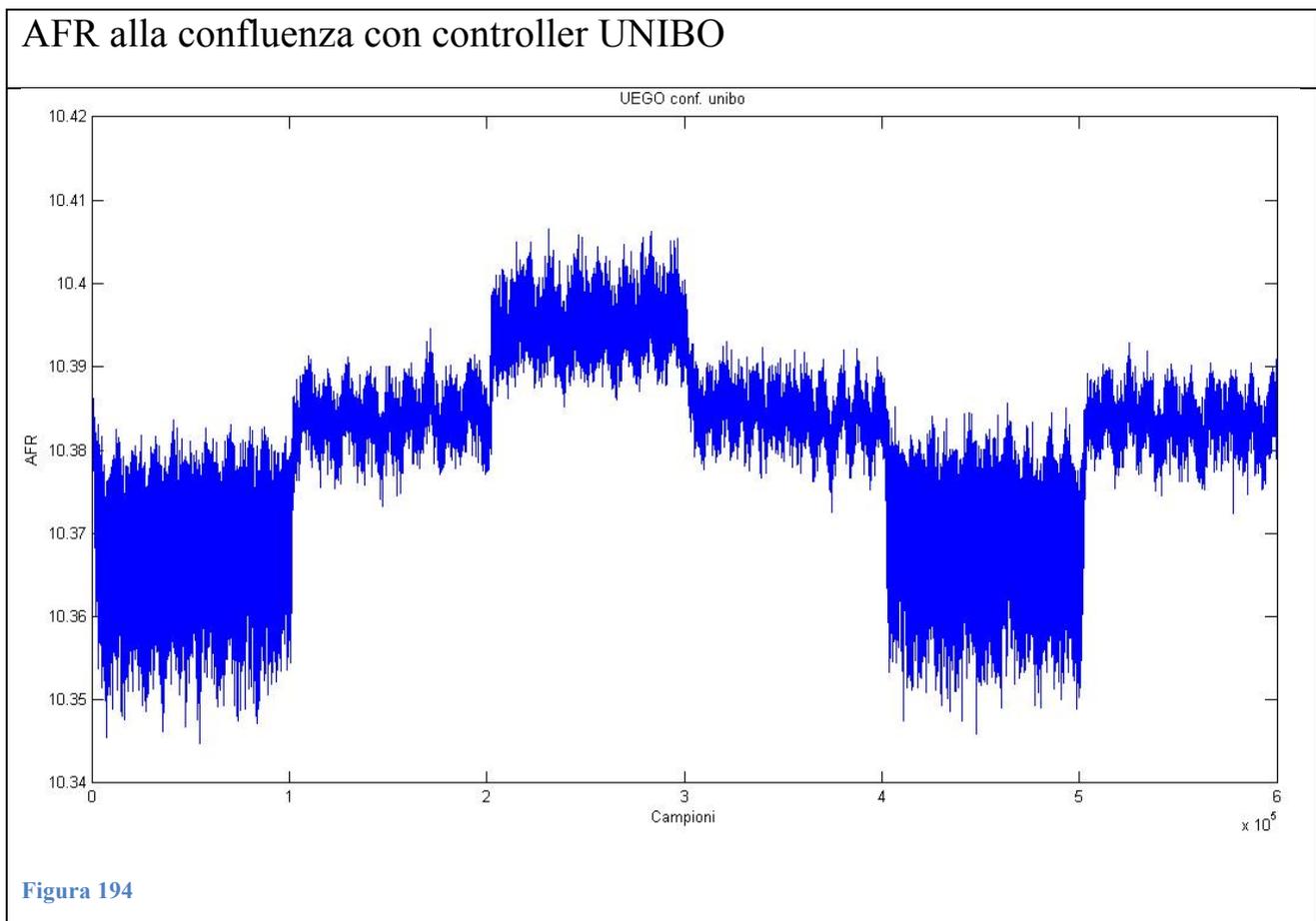
Sovrapponendo il grafico della pressione in camera a quello del comando d'iniezione, è possibile notare come quest'ultima avvenga durante la corsa di scarico (a valvola d'aspirazione chiusa), consentendo una miglior evaporazione del fluido combustibile:



Output dei sensori UEGO

Per ricavarsi i rispettivi valori in AFR partendo dai valori in Volt occorre interpolare questi valori con la caratteristica riportata nel capitolo precedente ([Descrizione dei test](#)) occorre dunque far distinzione fra i dati acquisiti con il controller “UNIBO” e quelli con il “Ducati”.

La caratteristica del controller è contenuta all’interno di una matrice 2x252, nella prima riga si hanno i valori d’AFR mentre nella seconda quelli in Volt. Una volta caricato il file contenente la matrice e utilizzando la funzione interp1 per interpolare i valori in volt con quelli in AFR si ottengono i seguenti grafici:



AFR cil.1

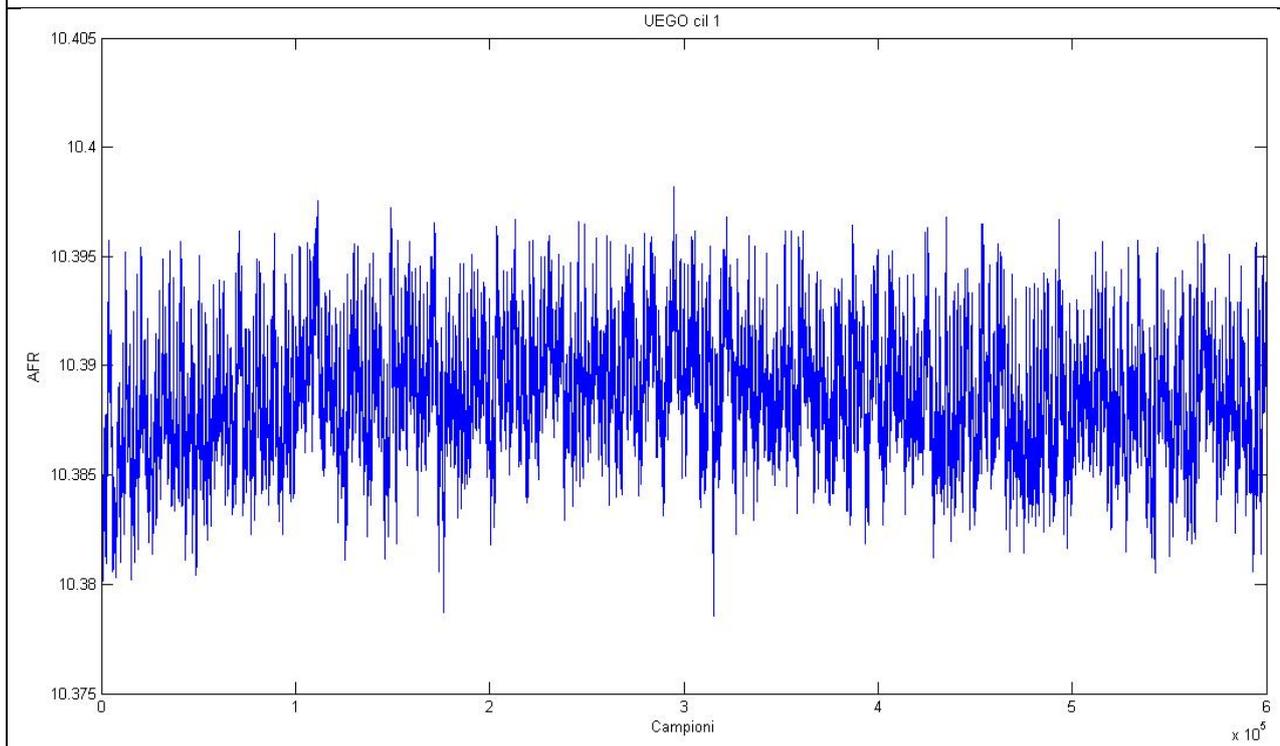


Figura 195

AFR cil.2

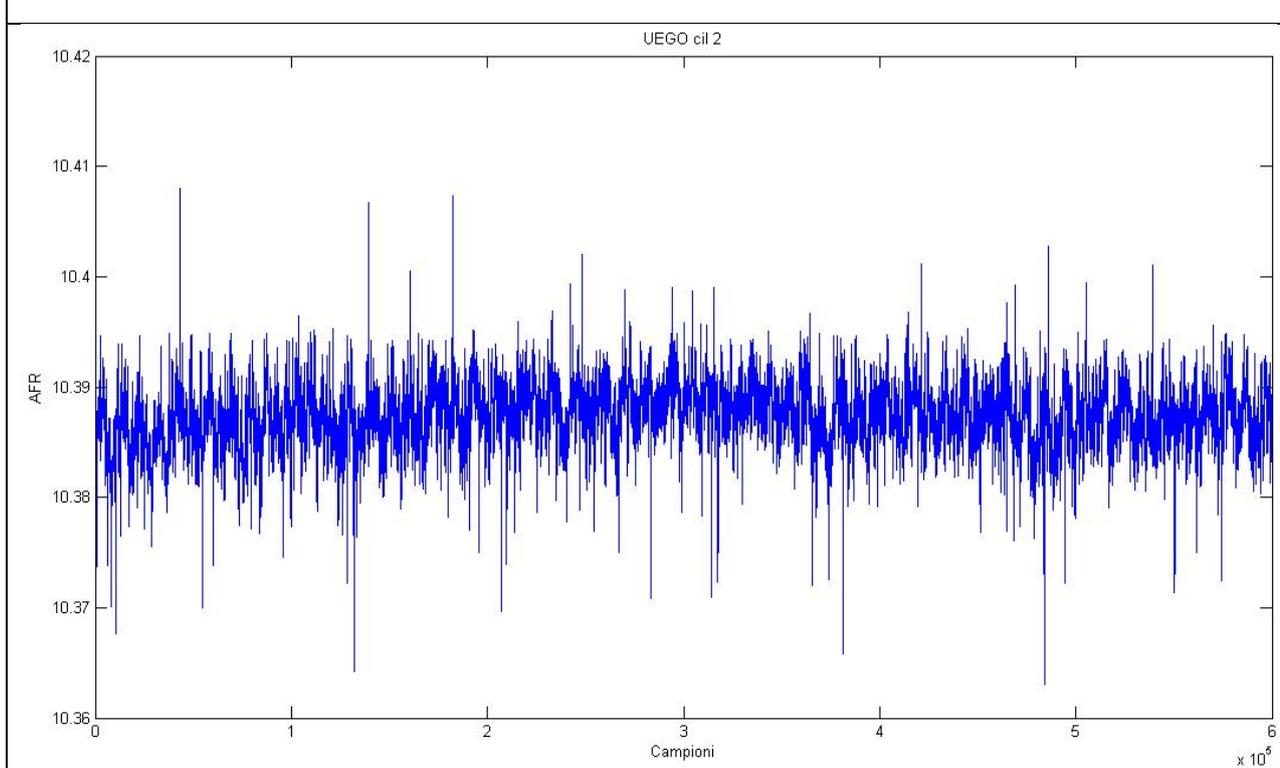


Figura 196

AFR cil.3

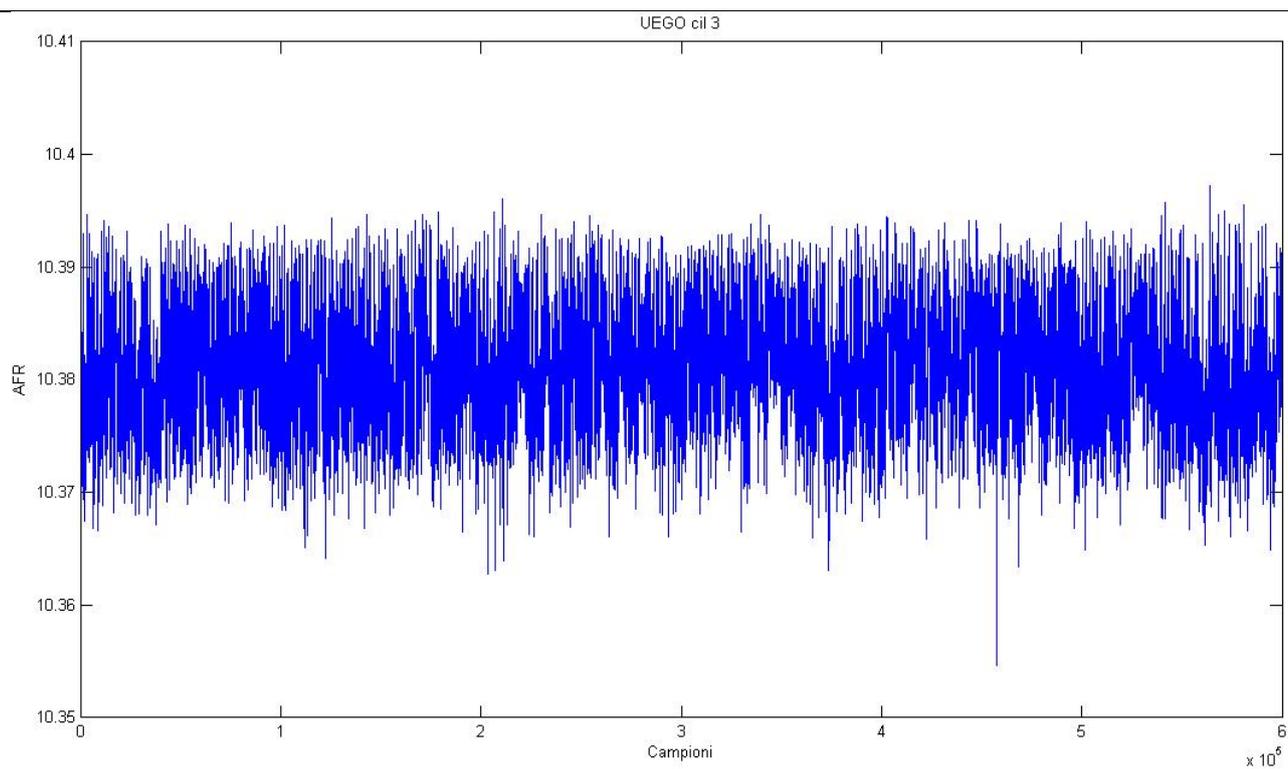


Figura 197

AFR cil.4

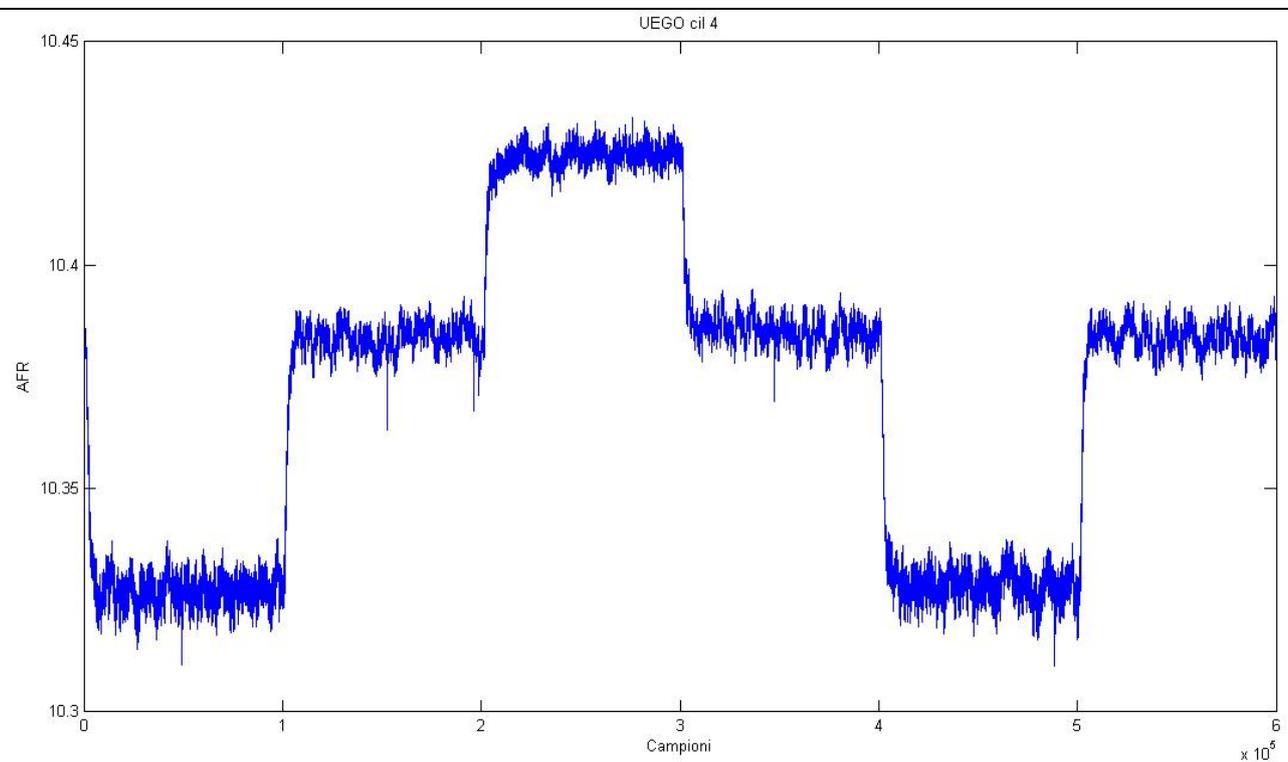


Figura 198

AFR alla confluenza con controller Ducati

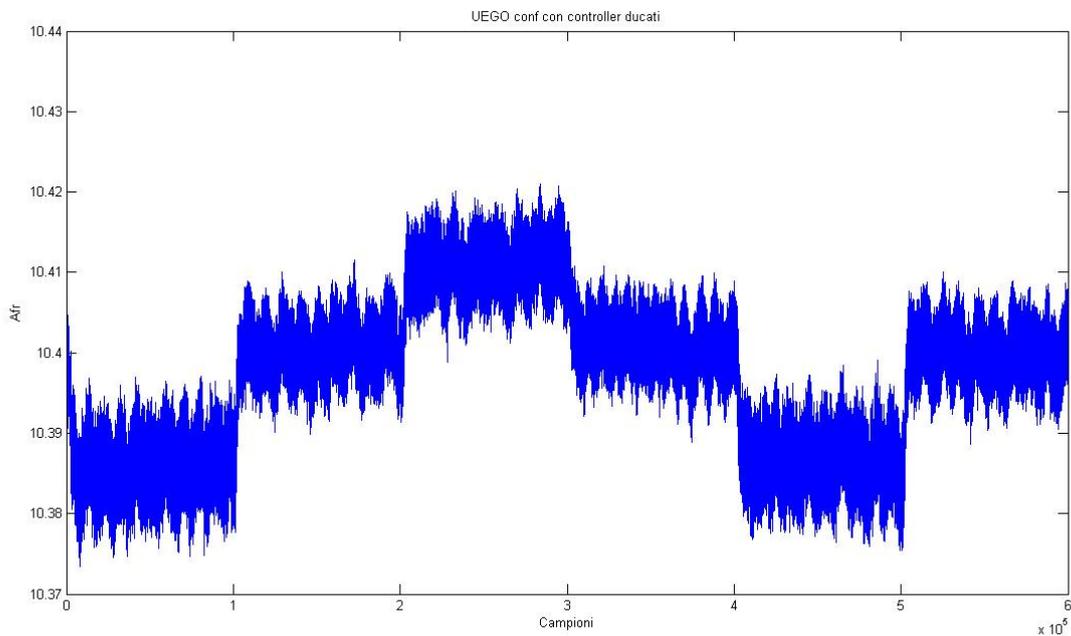


Figura 199

Misurazioni d'AFR dei quattro cilindri sovrapposti alla caratteristica del sensore posto alla confluenza con controller UNIBO [AFR-N.campioni]

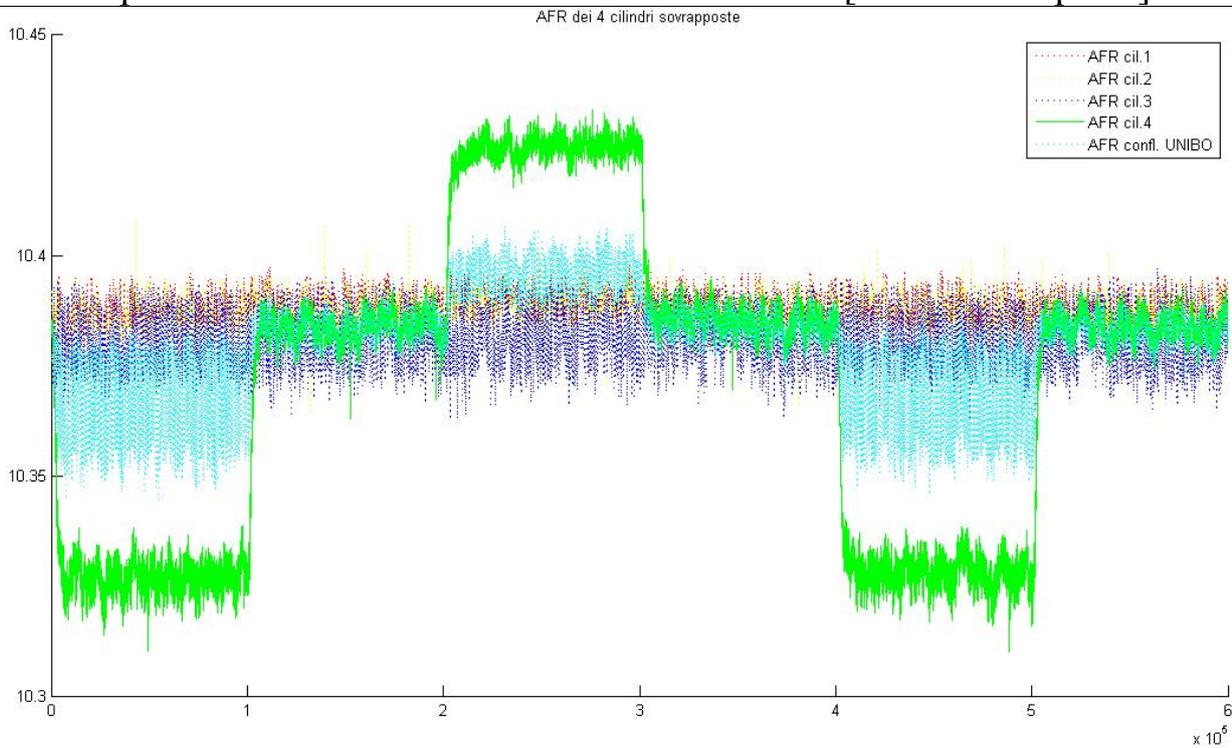


Figura 200

Osservazioni

Il titolo della miscela nel quarto cilindro varia a gradino assumendo tre valori (ricavati dalla media dei campioni a regime) durante le acquisizioni compiute:

Valore basso d'AFR: 10,328 (primo e quinto "livello" del titolo in camera)

Valore medio d'AFR: 10,384 (secondo, quarto e sesto "livello" del titolo in camera e coincidente con quello degli altri tre cilindri)

Valore alto d'AFR: 10,425 (terzo "livello" del titolo in camera)

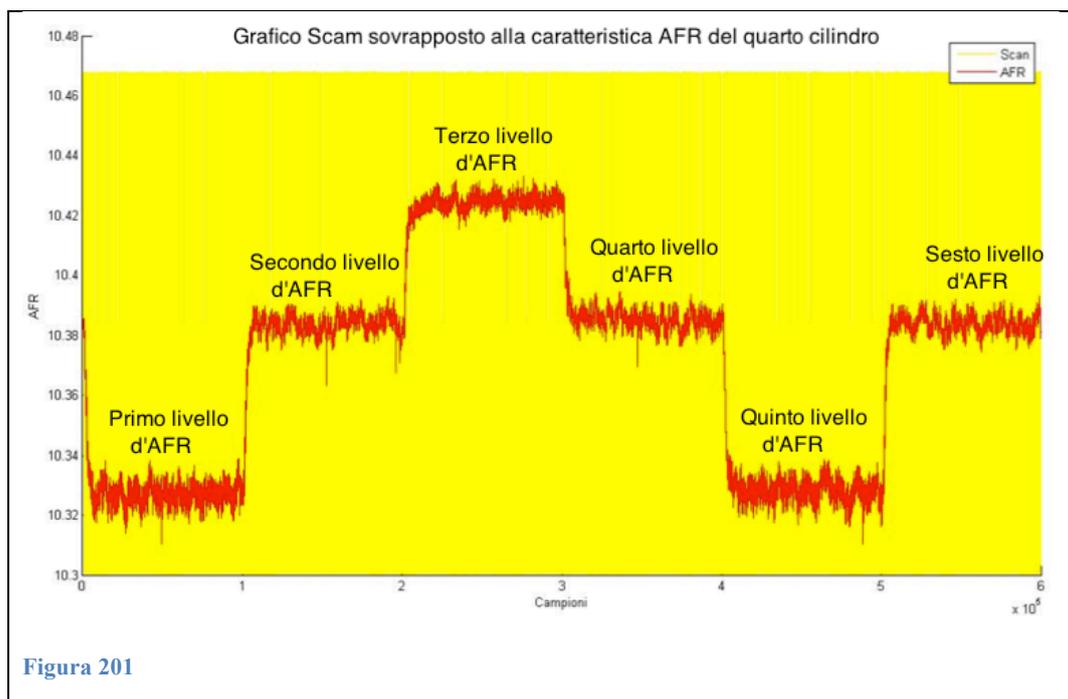
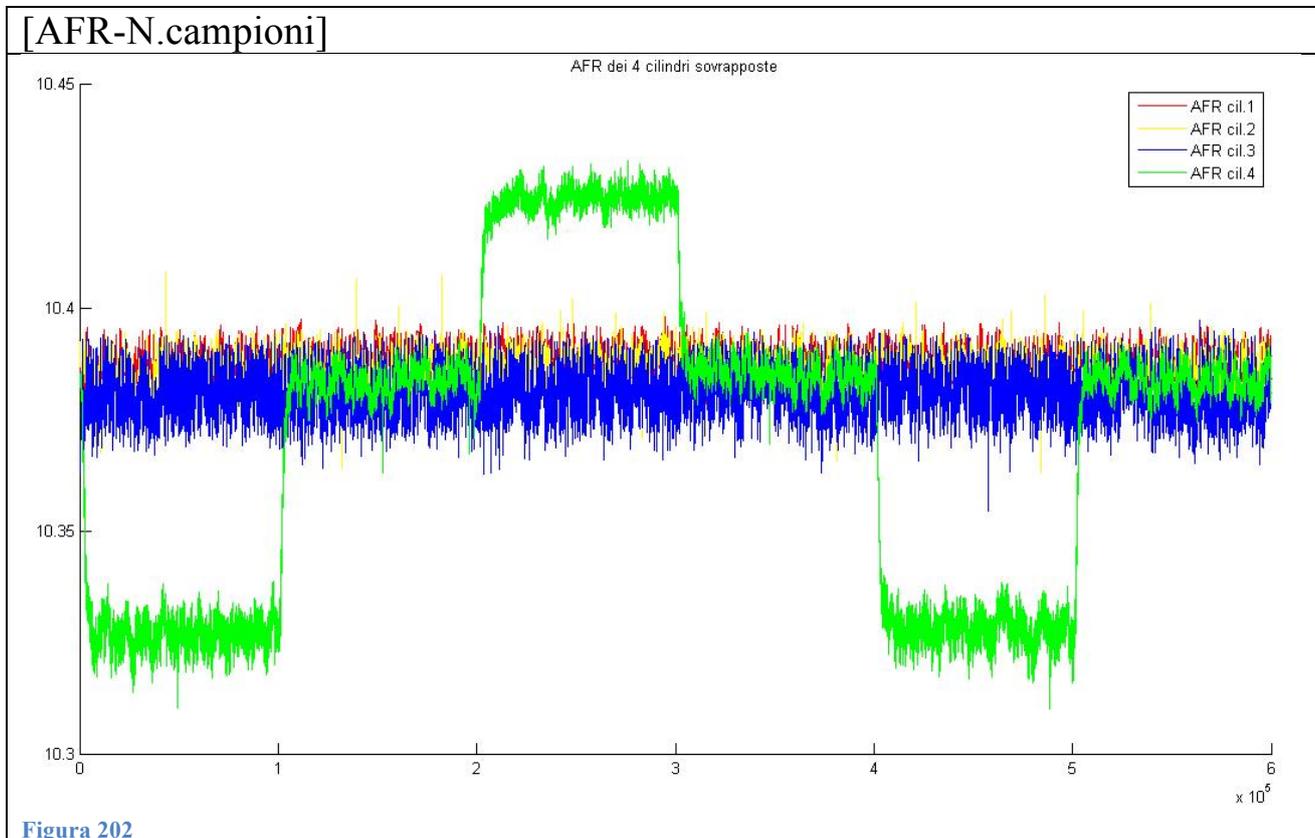


Figura 201

1.4 Calcolo della costante di tempo del sensore posto sul runner del quarto cilindro

La sonda posta sul runner di scarico del cilindro quattro vede un titolo non costante a differenza degli altri tre cilindri:



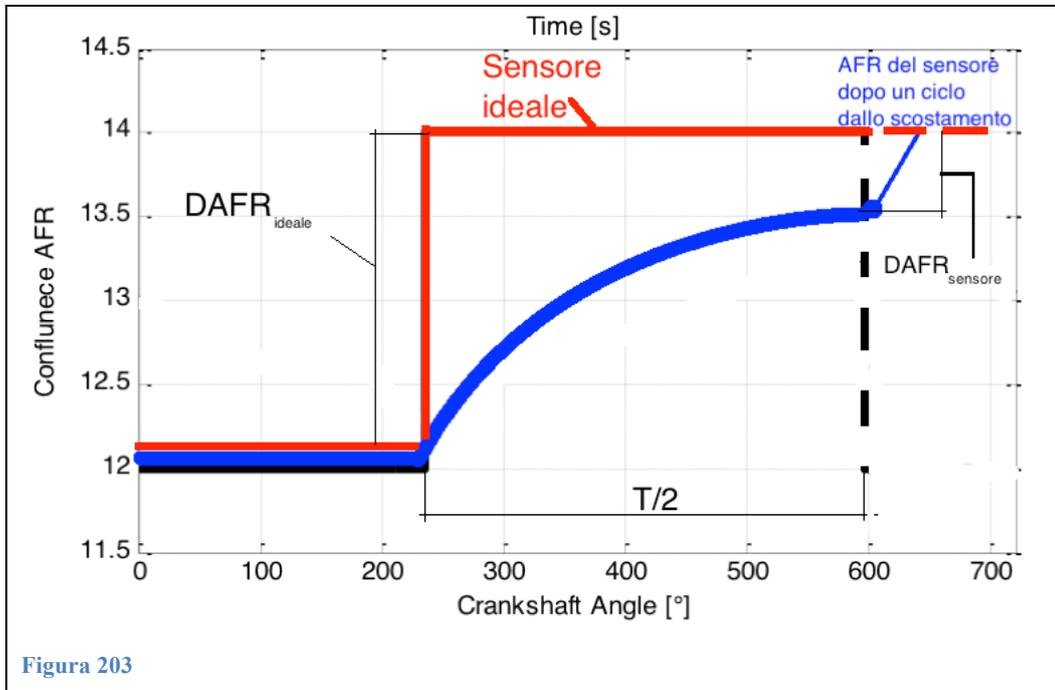
Occorre precisare che variando il tempo d'iniezione, passando da uno step di λ a un altro, si deve tener conto della dinamica del combustibile.

Una volta che l'iniettore spruzza il combustibile (nel nostro caso benzina), nel collettore d'aspirazione esso forma una sorta di "pozzanghera" che non è detto che evapori entro l'apertura della valvola di aspirazione: il titolo in camera non risulta quindi essere quello che ci si potrebbe aspettare sulla base della sola variazione del tempo di iniezione. Questo fenomeno genera un transitorio di AFR che si assesta solo dopo un certo numero di cicli.

Il ritardo fra la variazione del tempo d'iniezione e la rilevazione da parte del sensore del nuovo titolo è dovuto a molteplici fattori fra cui:

- Il ritardo dovuto alla dinamica benzina di cui si è appena parlato.
- Il ritardo causato dal tragitto che i gas devono superare per arrivare al sensore una volta aperta la valvola di scarico.
- Il ritardo dovuto al "cappuccio" protettivo del sensore (di cui si è già discusso nel capitolo [Correlazione dell'AFR al lavoro indicato](#)).
- Il ritardo dovuto alla misurazione all'interno dell'elemento sensibile.

Per avere un'idea della costante di tempo del sensore posto sul runner del quarto cilindro, utilizzando i dati a nostra disposizione, si è studiato l'output del sensore come se fosse un sistema del prim'ordine trascurando la dinamica benzina, il tragitto dei gas prima di arrivare al sensore e l'influenza del cappuccio protettivo. Questa ipotesi ci porta a dire che l'output del sensore è funzione dell'input che esso riceve e della sua derivata prima.



La fig. 203 mostra il confronto l'output di due sensori: uno ideale avente una costante di tempo nulla (variazione a gradino dell'output) e uno la cui caratteristica ha un andamento del prim'ordine (linea blu).

Se un sensore è un sistema del primo ordine, il suo output AFR_s a fronte di un input AFR_R sarà descrivibile come: $AFR_s = AFR_R \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$.

Se l'input è una sollecitazione a onda quadra di periodo T e di ampiezza pari a ΔAFR_R , dopo mezzo periodo ci si aspetta che l'output faccia rilevare un'oscillazione del tipo $\Delta AFR_s = \Delta AFR_R \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right)$.

L'attenuazione che ci si attende dipenderà allora dalla costante di tempo, ovvero $a = \frac{\Delta AFR_s}{\Delta AFR_R} = \left(1 - e^{-\frac{60}{rpm\tau}}\right)$, in cui si è esplicitato il valore del periodo T, che dipende dalla velocità di rotazione. Infine, si può esplicitare τ in funzione dell'attenuazione:

$$e^{-\frac{60}{rpm\tau}} = 1 - a \Rightarrow -\frac{60}{rpm\tau} = \log(1 - a) \Rightarrow \tau = -\frac{60}{rpm \cdot \log(1 - a)}$$

Per calcolarsi ΔAFR_R del sensore ideale si sono mediati i valori d'AFR precedenti e successivi al transitorio trovando i due livelli (alto e basso) del gradino. Il ΔAFR_s rilevato dal sensore sul runner di scarico, è stato calcolato considerando lo scostamento fra il segnale, dopo mezzo ciclo da quando ha inizio il transitorio, e la media d'AFR dei campioni precedenti.

Poiché la formula richiede che siano noti gli rpm motore è stato calcolato il numero di campioni per ciclo, pari a 666, e, nota la frequenza di campionamento si è utilizzata la seguente formula:

$$\left(\frac{camp.ciclo}{freq \cdot 2 \cdot 60}\right)^{-1} = rpm = 1800$$

Risultati ottenuti

Valore medio d'AFR al primo livello=	10.327
Valore medio d'AFR al secondo livello=	10.384
$DAFR_{ideale}$ del primo gradino=	0.057
$DAFR_{sensore}$ del primo gradino=	0.020
Costante di tempo del primo gradino=	0.0763



Valore medio d'AFR al secondo livello=	10.384
Valore medio d'AFR al terzo livello=	10.425
$DAFR_{ideale}$ del secondo gradino=	0.041
$DAFR_{sensore}$ del secondo gradino=	0.01
Costante di tempo del secondo gradino=	0.121



Figura 205

Valore medio d'AFR al terzo livello=	10.425
Valore medio d'AFR al quarto livello=	10.386
$DAFR_{ideale}$ del terzo gradino=	0.04
$DAFR_{sensore}$ del terzo gradino=	0.012
Costante di tempo del terzo gradino=	0.091



Figura 206

Valore medio d'AFR al quarto livello=	10.386
Valore medio d'AFR al quinto livello=	10.329
$DAFR_{ideale}$ del quarto gradino=	0.057
$DAFR_{sensore}$ del quarto gradino=	0.014
Costante di tempo del quarto gradino=	0.12



Figura 207

Valore medio d'AFR al quinto livello=	10.329
Valore medio d'AFR al sesto livello=	10.384
$DAFR_{ideale}$ del quinto gradino=	0.056
$DAFR_{sensore}$ del quinto gradino=	0.015
Costante di tempo del quinto gradino=	0.103

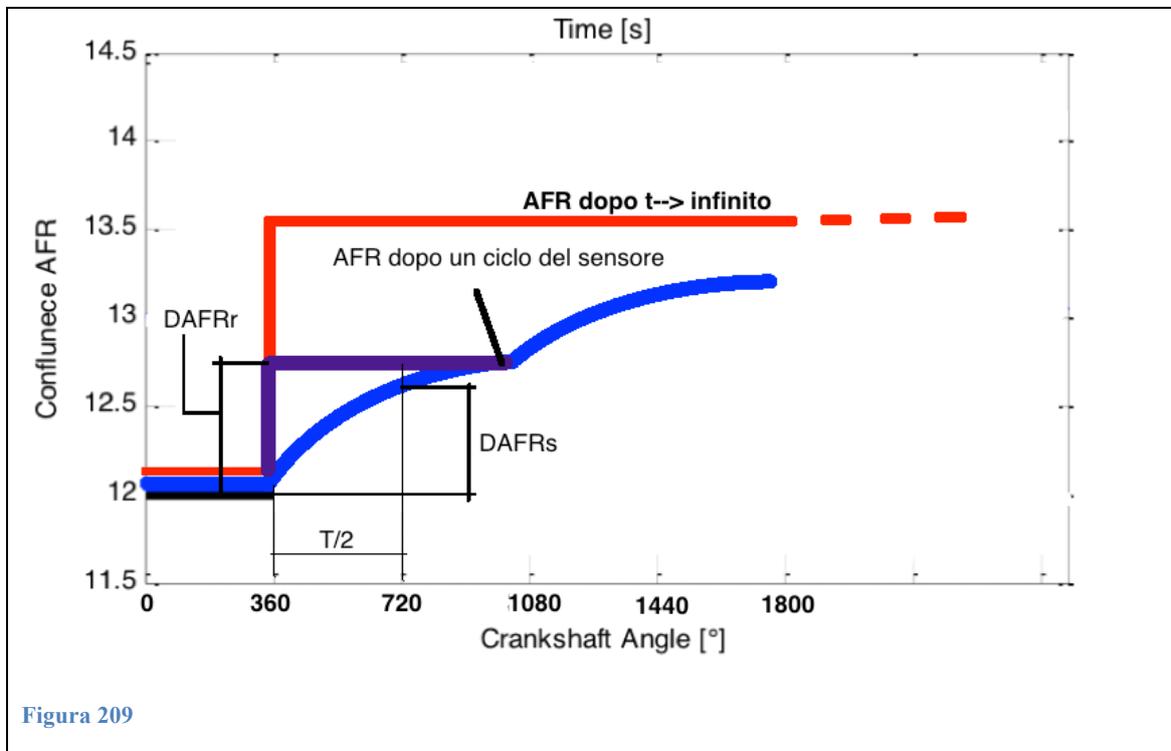


Figura 208

Si sono inoltre ricavati i seguenti parametri:

- Costante di tempo media per passare da grasso a magro= 0.100
- Costante di tempo media per passare da magro a grasso= 0.105
- Costante di tempo media= 0.102

Va precisato che tutti i sensori però hanno un funzionamento a cicli ovvero non rilevano subito il valore finale di AFR impartito dal tempo d'iniezione (e raggiunto per $t \rightarrow \infty$ da un sistema del prim'ordine): questo comportamento è da imputarsi alla presenza di un'altra componente dinamica (quella del combustibile), che 'inquina' la valutazione che si fa sulla risposta della sonda.



Occorre dunque variare il valore di $DAFR_{ideale}$ come da figura, in questo modo si ottengono i seguenti risultati per il sensore posto sullo scarico del quarto cilindro:

Primo gradino:

Primo Ciclo

DAFR _{ideale} =	0.02035
DAFR _{reale} =	0.02010
Costante di tempo =	0.00753

Secondo Ciclo

DAFR _{ideale} =	0.01294
DAFR _{reale} =	0.00897
Costante di tempo =	0.02817

Terzo ciclo:

DAFRideale=	0.00732
DAFRreale=	0.00555
Costante di tempo=	0.02345

Secondo gradino:

Primo Ciclo

DAFRideale=	0.01288
DAFRreale=	0.00836
Costante di tempo=	0.03178

Secondo Ciclo

DAFRideale=	0.01068
DAFRreale=	0.00537
Costante di tempo=	0.04765

Osservazioni:

Tendenzialmente la costante di tempo tende a crescere di ciclo in ciclo coerentemente con quanto ci si aspetta dalla curva logaritmica che (ipoteticamente per un sistema del prim'ordine) rappresenta il comportamento del sensore nell'intero transitorio. Occorre precisare che oltre il secondo ciclo è complicato individuare i campioni da scegliere per la valutazione poiché l'ampiezza dello scostamento da ciclo a ciclo tende a diminuire fino a confondersi con le oscillazioni della caratteristica.

Calcolo della costante di tempo per il sensore alla confluenza

Per il calcolo della costante di tempo del sensore alla confluenza occorre apportare delle modifiche all'approccio utilizzato per il sensore sul runner del quarto cilindro.

In particolare il sensore alla confluenza vede per $\frac{3}{4}$ di ciclo un valore costante di AFR e per $\frac{1}{4}$ il titolo del quarto cilindro.

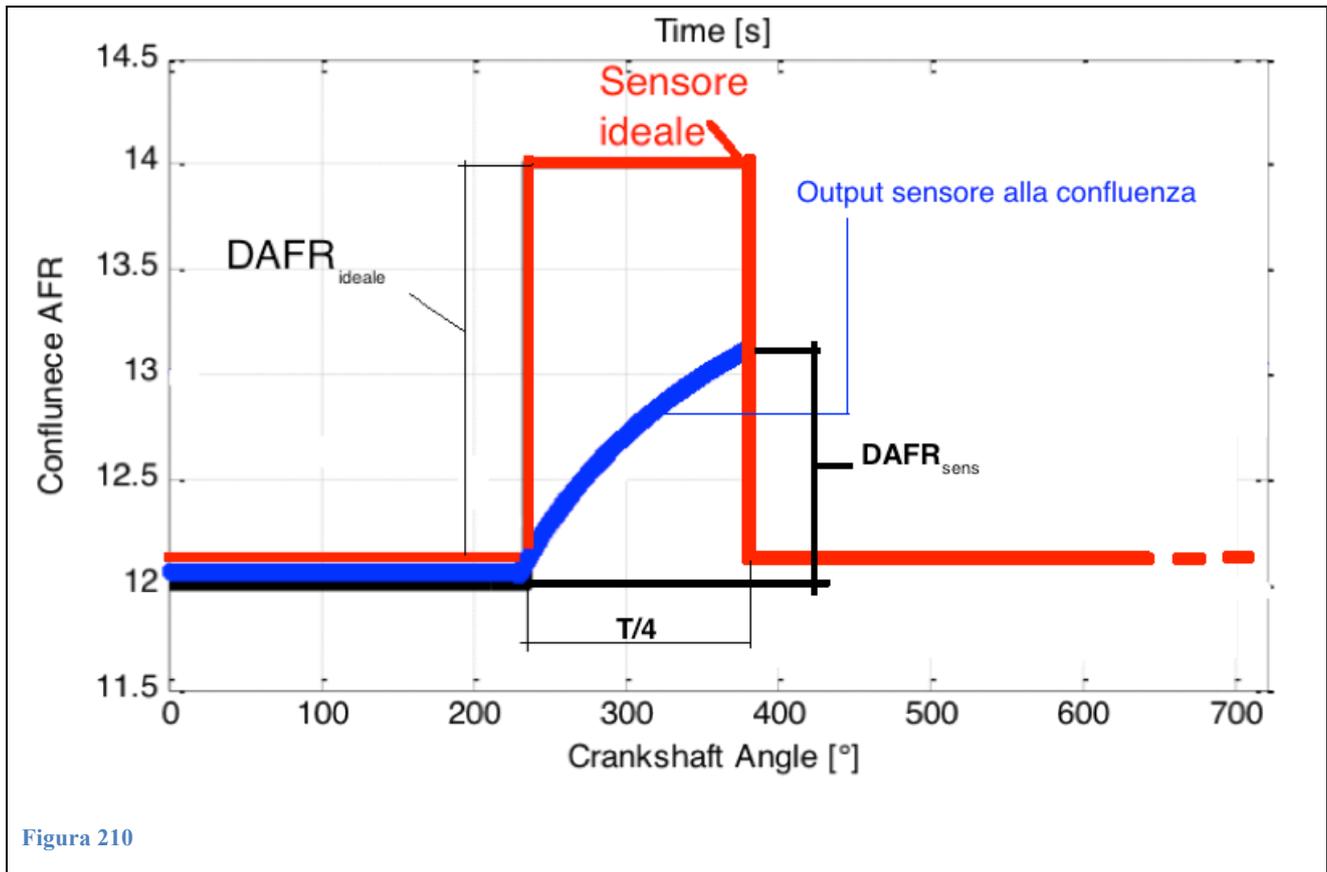


Figura 210

Partendo dall'equazione:

$$AFR_s = AFR_R \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Poiché il tempo t dopo il quale si misurano i DAFR è pari a $T/4$, dove $T=720^\circ$ (di manovella) è la durata di un ciclo si ha:

$$\Delta AFR_s = \Delta AFR_R \left(1 - e^{-\frac{T}{4\tau}} \right)$$

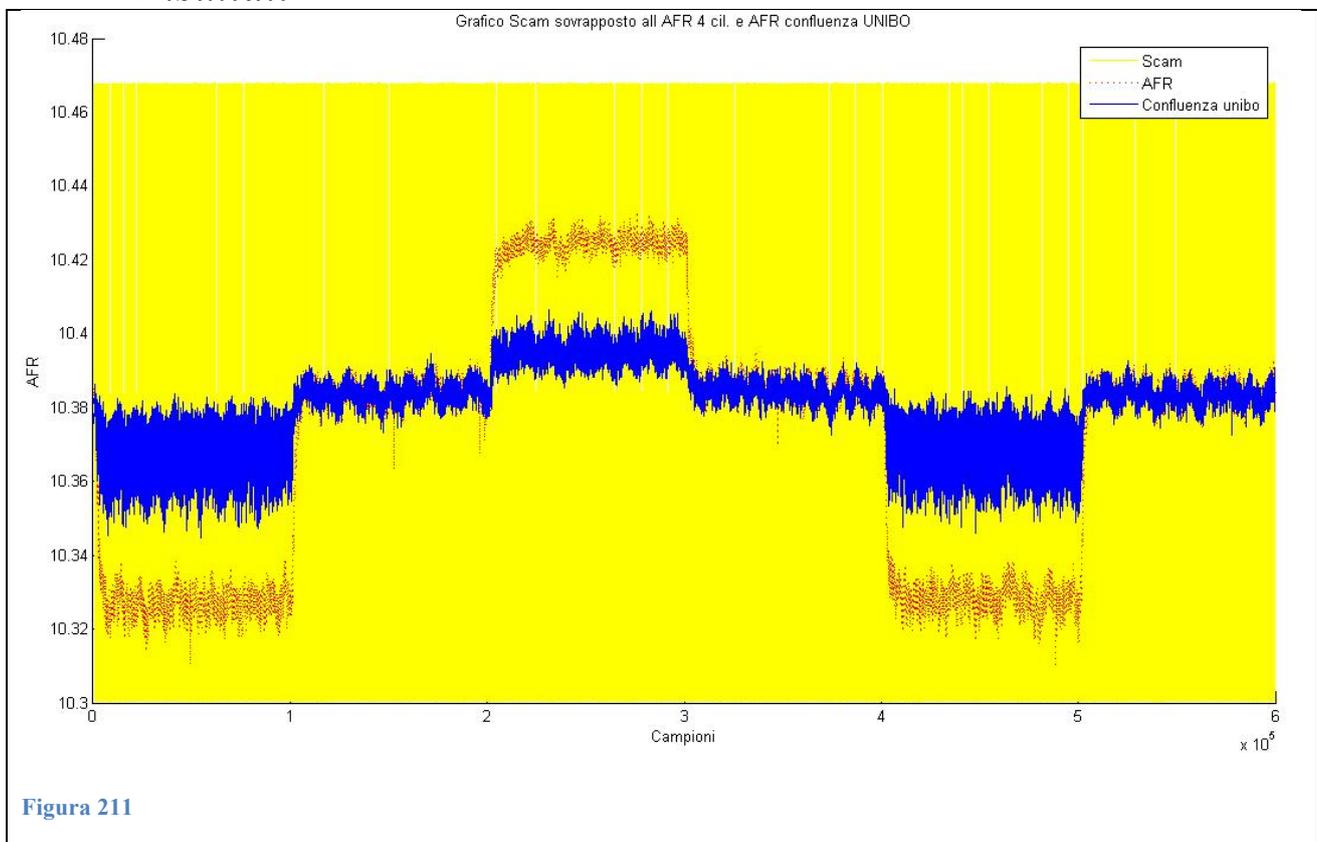
da cui l'attenuazione “a” vale:

$$a = \frac{\Delta AFR_s}{\Delta AFR_R} = \left(1 - e^{-\frac{60}{2 \cdot rpm \cdot \tau}} \right)$$

ed infine esplicitando la nostra incognita τ si ottiene:

$$e^{-\frac{60}{2 \cdot rpm \cdot \tau}} = 1 - a \Rightarrow -\frac{60}{2 \cdot rpm \cdot \tau} = \log(1 - a) \Rightarrow \tau = -\frac{60}{2 \cdot rpm \cdot \log(1 - a)}$$

Risultati



In figura si mostrano le curve sovrapposte del segnale Scam, del sensore alla confluenza e di quello sul runner del quarto cilindro.

I valori di $DAFR_{idale}$ si sono ricavati dalla differenza fra la media del titolo nei primi tre cilindri con quello del quarto.

Per i valori di $DAFR_{reali}$ si è “zoomato” il grafico in fig. 212 nell’intorno dei cicli precedenti ai transitori del quarto cilindro:

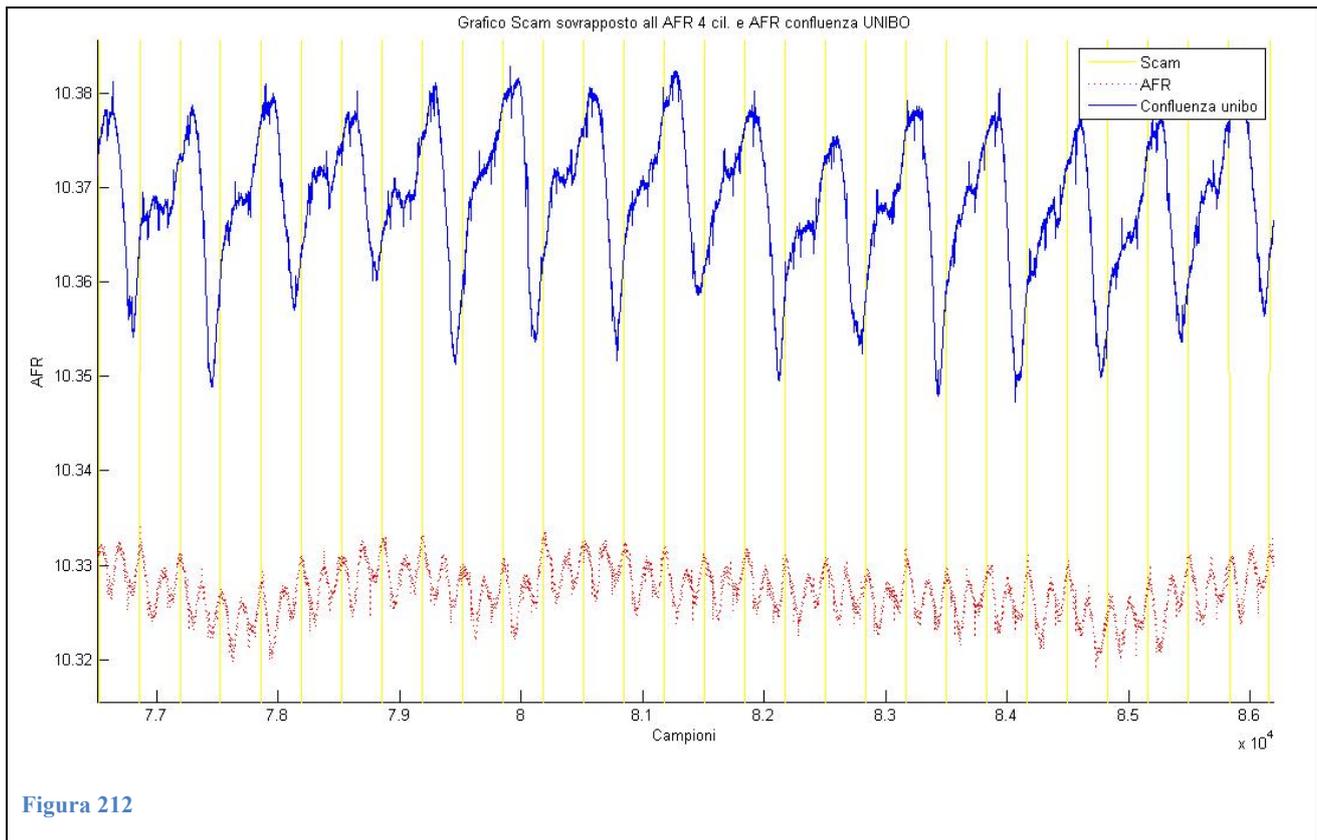


Figura 212

Questo perché si presume che in tale porzione di grafico il titolo all'interno del quarto cilindro sia pressoché costante di ciclo in ciclo.

Fatto ciò si possono individuare delle rampe di AFR che tendono al valore del quarto cilindro, si può notare che la durata di queste rampe è all'incirca un quarto di ciclo. Si sono così presi i valori dei campioni agli estremi di tale scostamento e facendone la differenza si è ricavato il valore di $DAFR_{reale}$.

Inserendo tali valori nelle formule riportate sopra si ottengono i seguenti risultati:

Costante di tempo del sensore alla confluenza soggetto a scostamenti magri da parte del quarto cilindro = 0.023

Costante di tempo del sensore alla confluenza soggetto a scostamenti grassi da parte del quarto cilindro = 0.057

Osservazioni:

Come si può vedere in fig.212 quando il titolo della miscela nel quarto cilindro è portato al valore d'AFR "basso", alla confluenza si ha un andamento nettamente più disturbato rispetto al caso "alto".

Al fine di capire quale può essere la causa di quanto appena descritto, si sono calcolate le ampiezze dei gradini:

$$AFR_{medio} - AFR_{basso} = 10,384 - 10,328 = 0,056$$

$$AFR_{alto} - AFR_{basso} = 10,425 - 10,384 = 0,041$$

Come si può notare l'ampiezza del gradino basso è maggiore, questa è una possibile causa di quanto osservato alla confluenza. Il sensore soggetto a pacchetti di gas con concentrazioni d'ossigeno diverse, produce un output tanto più disturbato, quanto più sono diverse le concentrazioni d'AFR dei pacchetti di gas che lo lambiscono.

Un altro aspetto da prendere in considerazione è legato alla costante di tempo del sensore. L'analisi di questo parametro ha mostrato che il suo valore durante gli scostamenti magri è inferiore rispetto al caso in cui il titolo del quarto cilindro sia maggiore di quello misurato negli altri tre, ciò fa sì che il comportamento del sensore si avvicini maggiormente a quello di un sensore ideale e l'ampiezza delle oscillazioni risulta essere maggiore.

1. COMUNICAZIONE CAN CON UN SENSORE NO_x

2. Introduzione

Il seguente lavoro di tesi è stato incentrato sulla messa in funzione di un sensore UniNOx (Universal NOx) in grado di rilevare le concentrazioni di O₂ e NO_x, per una successiva applicazione sullo scarico di un motore al banco. Gli scopi principali del sensore saranno:

- Verificare come i parametri di controllo di un motore influiscono sulle emissioni d'ossidi d'azoto.
- Il confronto del tempo di risposta del sensore con altri sensori.
- La correlazione fra gli ossidi d'azoto e le detonazioni del motore, descritte in precedenza al capitolo si è discusso di come gli NOx favoriscano l'auto-accensione della miscela, resta però da capire come le detonazioni influiscano sulla formazione di NOx.

Il sensore assieme al controller cui è collegato, è privo di qualunque software al quale l'utente possa interfacciarsi, questo rende più difficoltosa la messa in funzione del sensore, poiché è stato necessario creare un'interfaccia su ambiente Labview utilizzando il protocollo di comunicazione CAN fornito nel datasheet del componente.

2 Comunicazione CAN

Il Controller Area Network, noto anche come CAN-bus, è uno standard seriale per bus di campo (principalmente in ambiente automotive), di tipo multicast (distribuzione simultanea di informazioni verso un gruppo di destinatari), introdotto negli anni ottanta dalla Robert Bosch GmbH, per collegare diverse unità di controllo elettronico (ECU).

Nei sistemi elettronici e nei computer in particolare, il bus è un canale che permette a periferiche e componenti di un sistema di "dialogare" tra loro. Diversamente dalle connessioni punto-punto, un solo bus può collegare tra loro più dispositivi.

Le connessioni elettriche del bus possono essere realizzate direttamente su circuito stampato oppure tramite un apposito cavo.

Il CAN è stato espressamente progettato per funzionare senza problemi anche in ambienti fortemente disturbati dalla presenza di onde elettromagnetiche e può utilizzare come mezzo trasmissivo una linea a differenza di potenziale bilanciata. L'immunità ai disturbi EMC può essere ulteriormente aumentata utilizzando cavi di tipo twisted pair (doppino intrecciato).

Sebbene inizialmente applicata in ambito automotive, come bus per autoveicoli, attualmente è usata in molte applicazioni industriali di tipo embedded (sistema immerso ovvero tutti i sistemi elettronici di elaborazione a microprocessore, non riprogrammabili) in cui è richiesto un alto livello di immunità ai disturbi. Il bit rate può raggiungere fino a 1 Mbit/s per reti lunghe meno di 40 m. Velocità inferiori consentono di raggiungere distanze maggiori (ad es. 125 kbit/s per 500 m). Il protocollo di comunicazione del CAN è standardizzato come ISO 11898-1 (2003). Questo standard descrive principalmente lo strato (layer) di scambio dati (data link layer), composto dallo strato sottostante (sublayer) "logico" (Logical Link Control, LLC) e dallo strato sottostante del Media Access Control, (MAC) e da alcuni aspetti dello strato "fisico" (physical layer) descritto dal modello ISO/OSI (ISO/OSI Reference Model). I protocolli di tutti gli altri layer sono lasciati alla libera scelta del progettista della rete.

Il CAN trasmette dati secondo un modello basato su bit "dominanti" e "recessivi", in cui i bit dominanti sono gli 0 logici ed i bit recessivi sono gli 1 logici. Se un nodo trasmette un bit dominante ed un altro un bit recessivo, allora il bit dominante "vince" fra i due (realizzando una combinazione AND logico).

Tabella delle verità dei bit dominanti/recessivi per rappresentare lo stato dei bus quando due nodi trasmettono.

\	Dominante	Recessivo
Dominante	Dominante	Dominante
Recessivo	Dominante	Recessivo

Con questa tecnica, quando viene trasmesso un bit recessivo, e contemporaneamente un altro dispositivo trasmette un bit dominante, si ha una collisione, e solo il bit dominante è visibile in rete (tutte le altre collisioni sono invisibili). In pratica avviene che un bit dominante è "asserito" dalla generazione di una tensione fra i conduttori, mentre un bit recessivo è semplicemente ignorato. Si è così sicuri che ogni volta che s'impone una differenza di potenziale, tutta la rete la rileva, e quindi "sa" che si tratta di un bit dominante.

2.1 Frames

Tutti i frame (detti anche "messaggi") iniziano con un bit di "start-of-frame" (SOF). I frame del CAN possono essere di quattro tipi:

- Data frame: frame contenente i dati che il nodo trasmette.
- Remote frame: frame che richiede la trasmissione di un determinato identificatore.
- Error frame: frame trasmesso da un qualsiasi nodo che ha rilevato un errore.
- Overload frame: frame che introduce un ritardo fra data frame e/o remote frame.

2.1.1 Data frame

Sono i frame che eseguono l'effettiva trasmissione dei dati. I messaggi possono avere due formati:

- Base frame format: con 11 bit di identificazione.
- Extended frame format: con 29 bit di identificazione.

Lo standard CAN deve obbligatoriamente riconoscere il formato base frame e può opzionalmente riconoscere il formato extended frame format (che, tuttavia, deve essere tollerato).

Il CAN base permette $2^{11} = 2048$ tipi di messaggi diversi, ma per ragioni storiche se ne usano solo 2031. Nella versione extended si possono avere fino a $2^{29} = 536\,870\,912$ tipi di messaggi.

Formato del Base frame

Il formato del base frame ha la seguente struttura:

Nome del campo	Lunghezza (n. di bit)	Funzione
Start-of-frame	1	Indica l'avvio della sequenza di trasmissione
Identificatore	11	Identificatore (unico) dei dati
Richiesta remota di trasmissione (RTR)	1	Deve essere un bit dominante
Bit aggiuntivo di identificazione (IDE)	1	Deve essere un bit dominante
Bit riservato (r0)	1	Riservato
Codice di lunghezza dati (DLC)	4	Numero di byte per codificare ciascun dato (0-8 byte)

Campo dati	0-8 byte	Dati da trasmettere (la lunghezza è specificata dal campo DLC)
CRC	15	Controllo di parità a ridondanza
delimitatore CRC	1	Deve essere un bit recessivo
Slot ACK	1	Il trasmettitore invia un bit recessivo e ogni ricevitore può confermare la ricezione con un bit dominante
Delimitatore ACK	1	Deve essere un bit recessivo
End-of-frame (EOF)	7	Devono essere bit recessivi

Un vincolo imposto al campo dell'identificatore è che i primi 7 bit non possono essere tutti recessivi.

Formato dell'Extended frame

Il formato dell'Extended Frame ha la seguente struttura:

Nome del campo	Lunghezza (n. di bit)	Funzione
Start-of-frame	1	Indica l'avvio della sequenza di trasmissione
Identificatore A	11	Prima parte dell'identificatore (unico) dei dati
Richiesta remota sostitutiva (SRR)	1	Deve essere un bit recessivo
Bit aggiuntivo di identificazione (IDE)	1	Deve essere un bit recessivo
Identificatore B	18	Seconda parte dell'identificatore (unico) dei dati
Richiesta remota di trasmissione (RTR)	1	Deve essere un bit dominante
Bit riservati (r1 & r0)	2	Riservati
Codice di lunghezza dati (DLC)	4	Numero di byte del dato (0-8 byte)
Campo dati	0-8 byte	Dati da trasmettere (lunghezza specificata dal campo DLC)
CRC	15	Controllo di parità a ridondanza

Delimitatore CRC	1	Deve essere un bit recessivo
Slot ACK	1	Il trasmettitore invia un bit recessivo e ogni ricevitore può confermare la ricezione con un bit dominante
Delimitatore ACK	1	Deve essere un bit recessivo
End-of-frame (EOF)	7	Deve essere un bit recessivo

I due identificatori (A e B) combinati, formano un unico identificatore di 29 bit.

Remote Frame

Il Remote Frame è identico al Data Frame, eccetto che:

- il bit RTR è posto allo stato di bit recessivo,
- il campo lunghezza dati contiene il numero di frame richiesti dal data frame.

Error Frame

L'Error Frame è composto da due campi:

- il primo è formato dalla combinazione dei flag di errore attivati da uno dei nodi collegati alla rete;
- il secondo è il cosiddetto "delimitatore di errore" (Error Delimiter)

Esistono due tipi di Error Flag:

- Active Error Flag: trasmessi da un nodo che ha rilevato un errore di rete, e che si trova nello stato di "error active";
- Passive Error Flag: trasmessi da un nodo che ha rilevato la presenza sulla rete di un Active Error Flag, e che si trova nello stato di "error passive".

Overload frame

L'Overload frame contiene due campi: Overload Flag e Overload Delimiter. Esistono due condizioni di overload che possono determinare la trasmissione di un overload flag:

1. Stato del ricevitore, che richiede un ritardo di trasmissione dal successivo data frame o remote frame,
2. Viene rilevato un bit dominante durante un intervallo nella trasmissione.

Un overload frame dovuto al caso 1 è consentito solo per essere avviato al momento del primo bit di un intervallo previsto, mentre un overload frame dovuto al caso 2 inizia un bit dopo aver rilevato il bit dominante. L'Overload Flag è costituito da sei bit dominanti (tutti pari a 0). La forma complessiva è come quella di un active error flag, che azzerà i campi intervalli. Conseguentemente, anche gli altri nodi della rete rilevano una condizione di overload e trasmettono un overload flag. L'overload Delimiter è costituito da 8 bit recessivi (tutti pari a 1) e ha la stessa forma di un "delimitatore di errore" (Error Delimiter).

Bit stuffing

Consiste nell'inserire un bit di valore opposto dopo cinque bit consecutivi dello stesso valore. Questa pratica è chiamata bit stuffing (letteralmente riempimento di bit), ed è resa possibile dall'applicazione dell'algoritmo di codifica denominato NRZ (Non Return to Zero). I frame sottoposti a questa operazione vengono poi "decodificati" dal ricevitore, che rimuove i bit precedentemente inseriti. Di conseguenza, quando vengono ricevuti sei bit uguali consecutivi dello stesso valore (11111 oppure 00000), essi vengono considerati un errore. Il bit stuffing implica che i frame dati trasmessi possono essere più grandi di quelli che ci si potrebbe aspettare dall'applicazione delle tabelle soprariportate.

3 Ambiente di sviluppo

Lo sviluppo del progetto si è svolto nei laboratori hangar della seconda facoltà d'ingegneria presso l'aeroporto di Forlì. Oltre al PC si sono utilizzati i CompactRio in dotazione al laboratorio assieme ai software LabView 2011 SP1 e al pacchetto CANdb++ del programma CANalyzer.

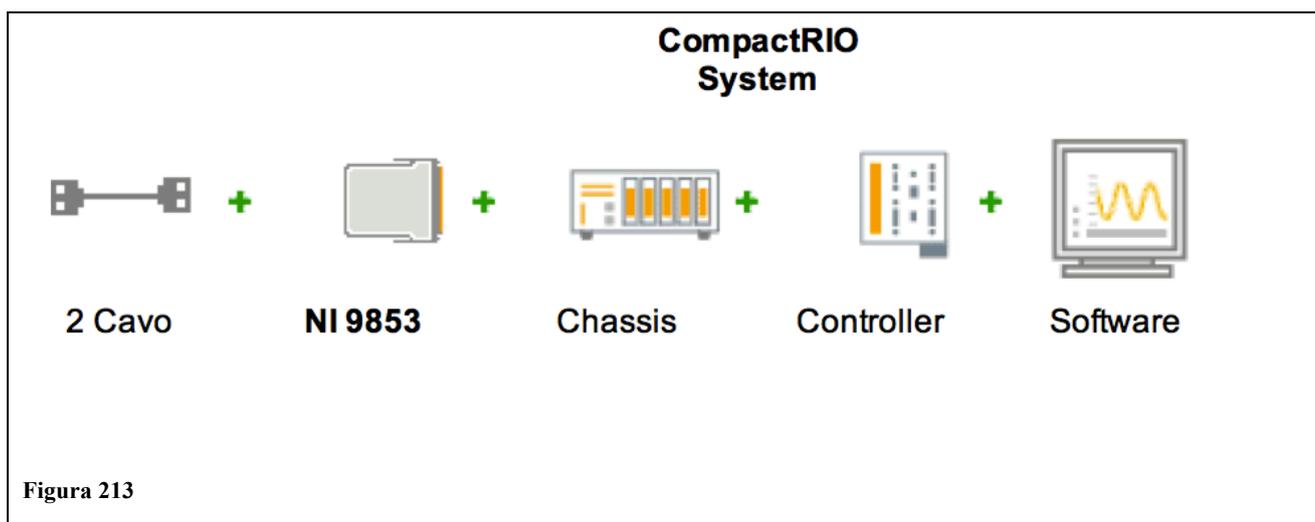
4 Hardware

4.1 NI CompactRIO

NI CompactRIO è un sistema embedded riconfigurabile per il controllo e l'acquisizione dati. Il sistema CompactRIO include moduli I/O, uno chassis FPGA (field-programmable gate array) riconfigurabile e un controller embedded. Inoltre, CompactRIO è programmato con gli strumenti di programmazione grafica di NI LabVIEW e può essere utilizzato in un'ampia gamma di applicazioni di monitoraggio e controllo embedded.

4.1.1 Architettura CompactRIO

Il sistema CompactRIO è formato da un controller embedded per la comunicazione e l'elaborazione, uno chassis nel quale è alloggiato il chip FPGA programmabile dall'utente, i moduli di I/O estraibili a caldo ed NI LabVIEW.



4.1.2 Controller/Chassis

Il sistema CompactRIO include un controller embedded e uno chassis riconfigurabile. Il controller embedded offre esecuzione embedded stand-alone per applicazioni deterministiche LabVIEW Real-Time o Windows Embedded Standard 7. Gli chassis embedded sono i dispositivi principali del sistema CompactRIO in quanto integrano il core FPGA I/O riconfigurabile.

Controller



Figura 214

Chassis



Figura 215

Dove per FPGA In elettronica digitale, (**Field Programmable Gate Array**), si intende un circuito integrato digitale la cui funzionalità è programmabile via software.

FPGA contenente 20.000 porte logiche

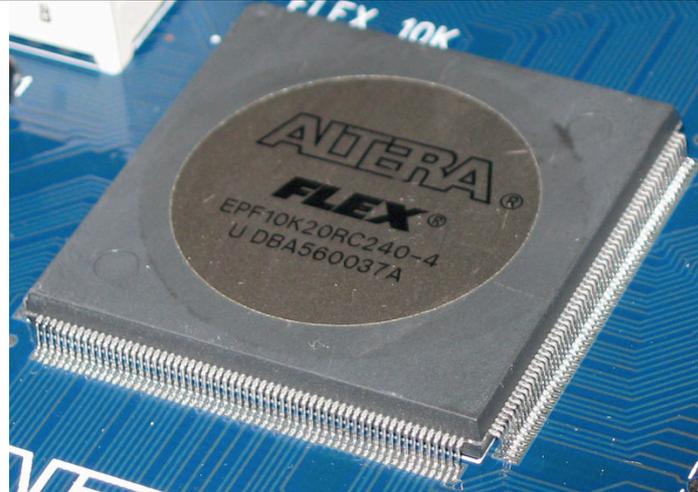


Figura 216

Sono elementi che presentano caratteristiche intermedie rispetto ai dispositivi ASIC (Application Specific Integrated Circuit) da un lato e a quelli con architettura PAL (Programmable Array Logic) dall'altro.

L'uso di componenti FPGA comporta alcuni vantaggi rispetto agli ASIC: si tratta infatti di dispositivi standard la cui funzionalità da implementare non viene impostata dal produttore che quindi può produrre su larga scala a basso prezzo. La loro genericità li rende adatti a un gran numero di applicazioni come consumer, comunicazioni, automotive eccetera. Essi sono programmati direttamente dall'utente finale, consentendo la diminuzione dei tempi di progettazione, di verifica mediante simulazioni e di prova sul campo dell'applicazione. Il grande vantaggio rispetto agli ASIC è che permettono di apportare eventuali modifiche o correggere errori semplicemente riprogrammando il dispositivo in qualsiasi momento. Per questo motivo sono utilizzati ampiamente nelle fasi di prototipizzazione, in quanto eventuali errori possono essere risolti semplicemente riconfigurando il dispositivo. L'ambiente di progettazione è anche più user-friendly e di relativamente facile acquisizione.

Di contro, per applicazioni su grandi numeri sono antieconomici perché il prezzo unitario del dispositivo è superiore a quello degli ASIC (che di converso hanno elevati costi di progettazione).

4.1.3 Moduli

NI CompactRIO offre accesso hardware diretto al circuito input/output di ogni modulo I/O utilizzando le funzioni I/O essenziali di LabVIEW FPGA. Ogni modulo I/O offre condizionamento del segnale integrato e connettori con terminale a vite, BNC o D-Sub. Sono disponibili oltre 50 moduli C Series per diverse misure incluse termocoppia, tensione, RTD (resistance temperature detector), corrente, sforzo, resistenza, sforzo, digitali (TTL e altro), accelerometri e microfoni. Il numero di canali sui singoli moduli varia da 3 a 32 per rispondere ad una vasta gamma di requisiti di sistema.

Modulo 9853

Ci si sofferma su questo specifico modulo poiché è quello impiegato nella comunicazione CAN. Il modulo presenta le seguenti caratteristiche:

- Modulo CAN ad alta velocità a 2 porte; di cui solo una dotata di alimentazione interna.
- Connettore Standard DE9M (DB9) maschio per ogni porta
- Philips SJA1000 CAN controller e Philips TJA1041 CAN transceiver
- Sincronizzazione hardware con ogni modulo I/O CompactRIO
- Conformità ISO 11898 per arbitration ID di tipo Standard (11-bit) ed Extended (29-bit)
- Capacità di trasmissione/ricezione del 100% dei carichi bus a 1 Mb/s



Figura 217

5 Software

5.1 Labview

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) è un ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione grafica della “National Instruments”. Tale linguaggio viene chiamato “Graphic Language”. Questo software è soprattutto utilizzato per applicazioni orientate prevalentemente all’acquisizione dati, alla gestione degli strumenti di misura e all’analisi ed elaborazione dei segnali.

Una delle grandi novità introdotte da questo programma grafico è che consente di visualizzare il flusso di dati (**dataflow**) in elaborazione anche se rimangono le principali caratteristiche degli altri linguaggi di programmazione. Inoltre è in grado di svolgere parallelamente più funzioni in un unico file. I files della programmazione G (**Graphic Language**) sono detti **VI** (Virtual **I**nstrument) e i sottoprogrammi **SubVI**: essi sono visualizzabili e compatibili solo con LabView, ma c’è la possibilità di salvarli sotto formato binario e di testo (.txt).

5.1.1 Pannello frontale “Front panel”

Il Pannello Frontale è l’interfaccia grafica del VI tra il programma e l’utente. Esso si costruisce attraverso dei **controlli** e degli **indicatori** che costituiscono i terminali d’ingresso e uscita, rispettivamente. I controlli, che simulano dispositivi d’ingresso degli strumenti e forniscono dati allo schema a blocchi del VI, sono potenziometri, pulsanti, quadranti e altri dispositivi d’ingresso. Gli indicatori, che simulano i dispositivi di uscita degli strumenti e visualizzano i dati che lo schema a blocchi acquisisce o genera, sono grafici, LED e altri visualizzatori aggiunti al pannello di controllo tramite la “controls palette”.

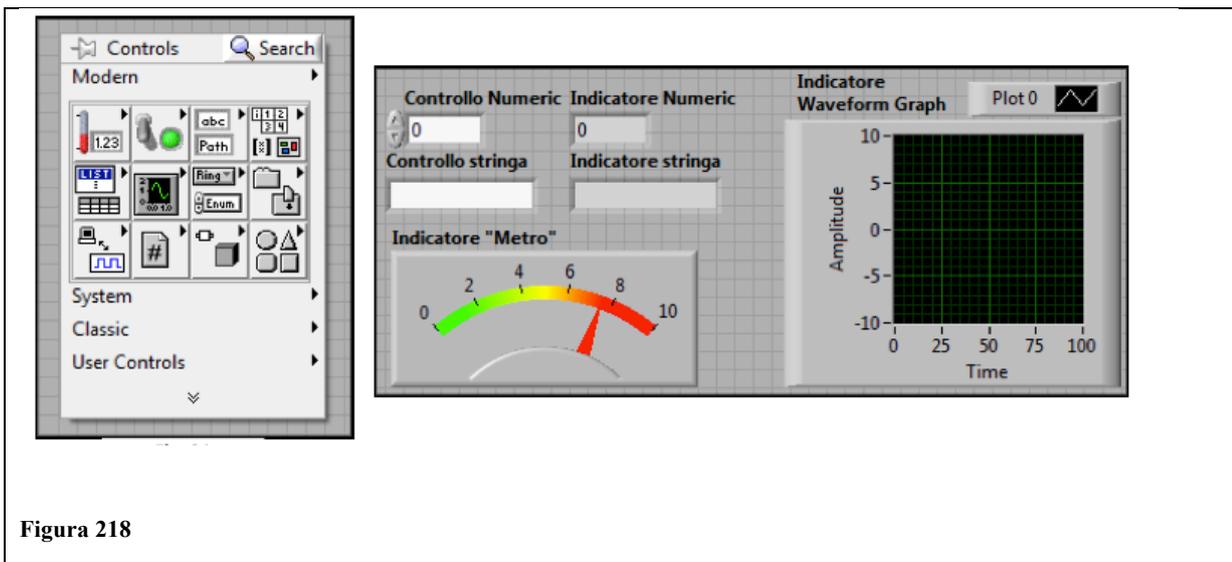
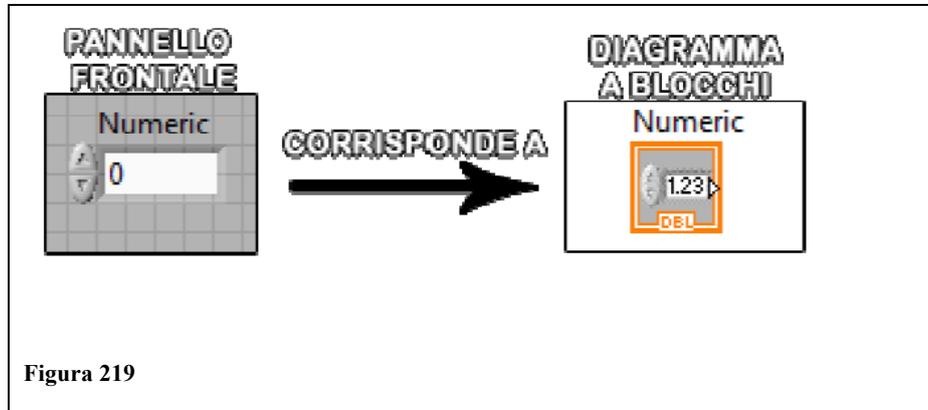


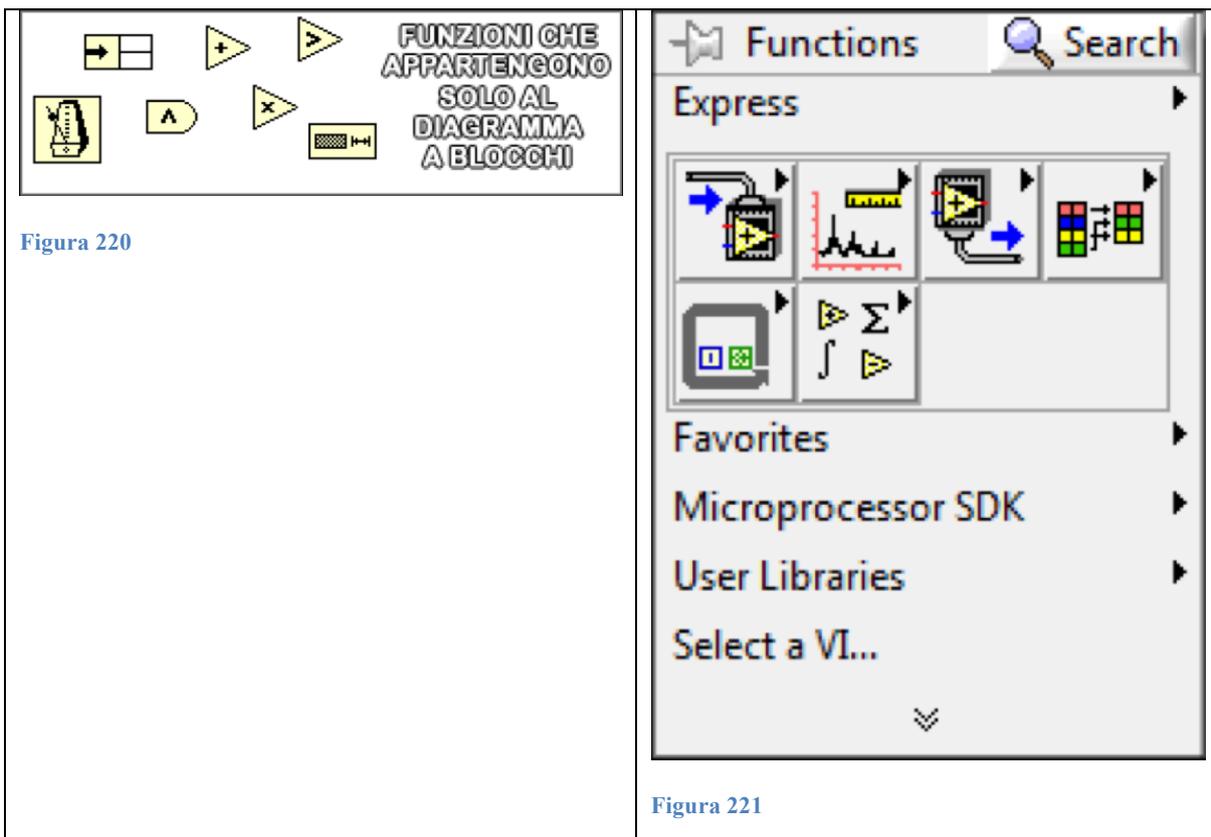
Figura 218

5.1.2 Diagramma a blocchi, “block diagram”

Il diagramma a blocchi è uno schema di flusso di dati, costituito dai controlli/indicatori che sono stati inseriti nel Pannello Frontale: essi appaiono nel diagramma sotto forma di icone.



Queste icone sono i terminali utilizzati per inserire/mostrare i dati e sono collegati fra loro attraverso le funzioni che si trovano nel menu del diagramma a Blocchi “Functions **Palette**”, attraverso dei fili “wire”.



L'intero schema così formato ricorda un circuito elettrico, caratteristica che rende molto più intuitiva la programmazione.

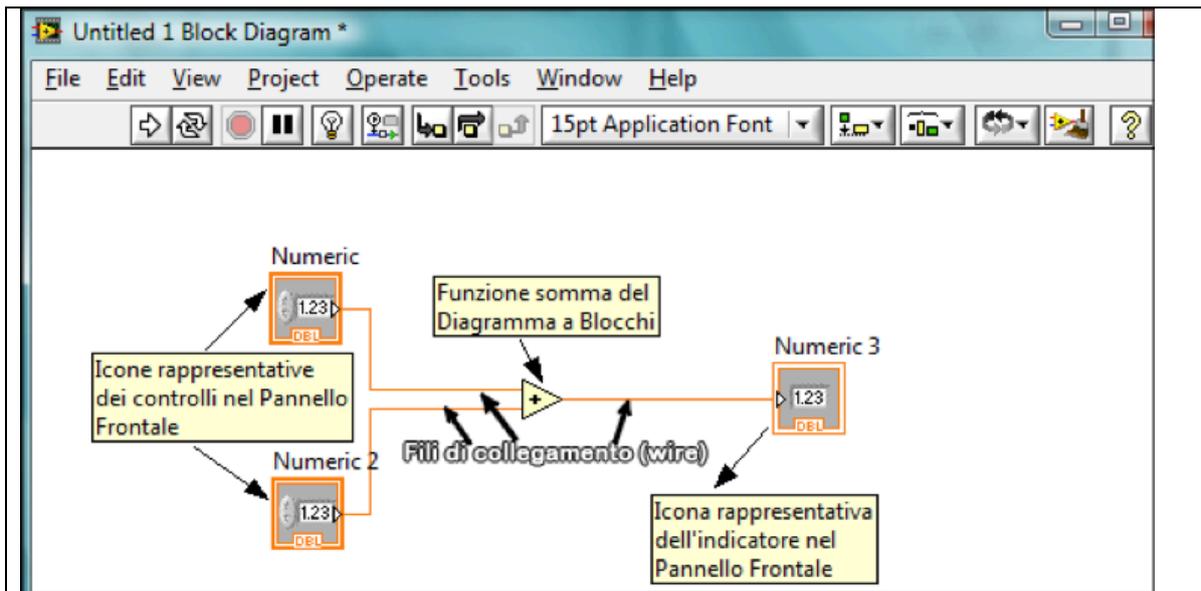


Figura 222

5.2 CANalyzer

Il programma offerto dalla compagnia Vector dal 1992 è primo software al mondo per la comunicazione CAN, nello studio del sensore ha permesso di creare un file denominato “message”, formato da un insieme di altri file “signal”. Ogni “signal” è stato creato dalle informazioni contenute nel datasheet ed identifica una precisa informazione all’interno del “pacchetto” di 64 byte (quantità di NO_x, stato del sensore, ecc...) come visibile in figura:

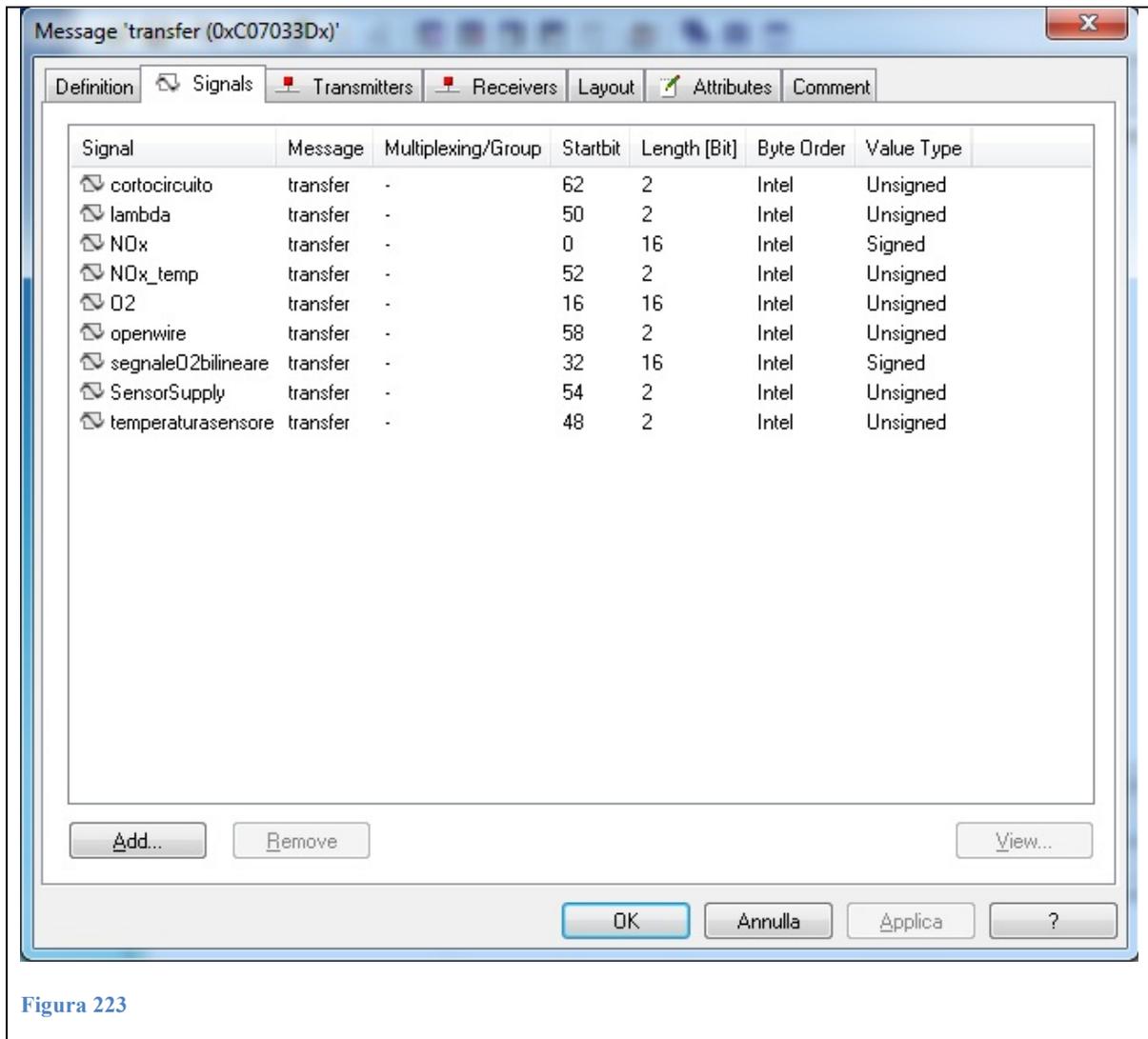
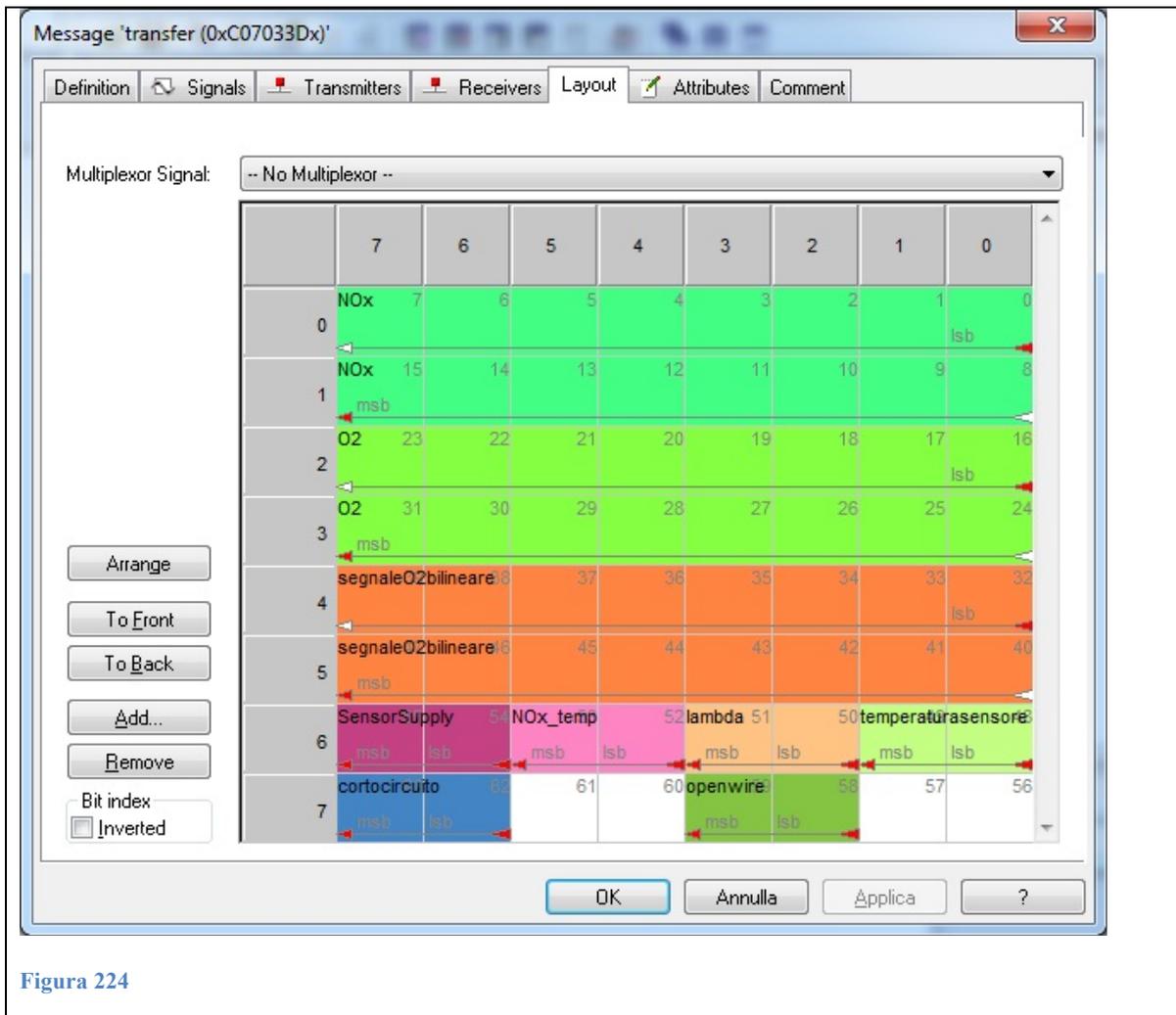
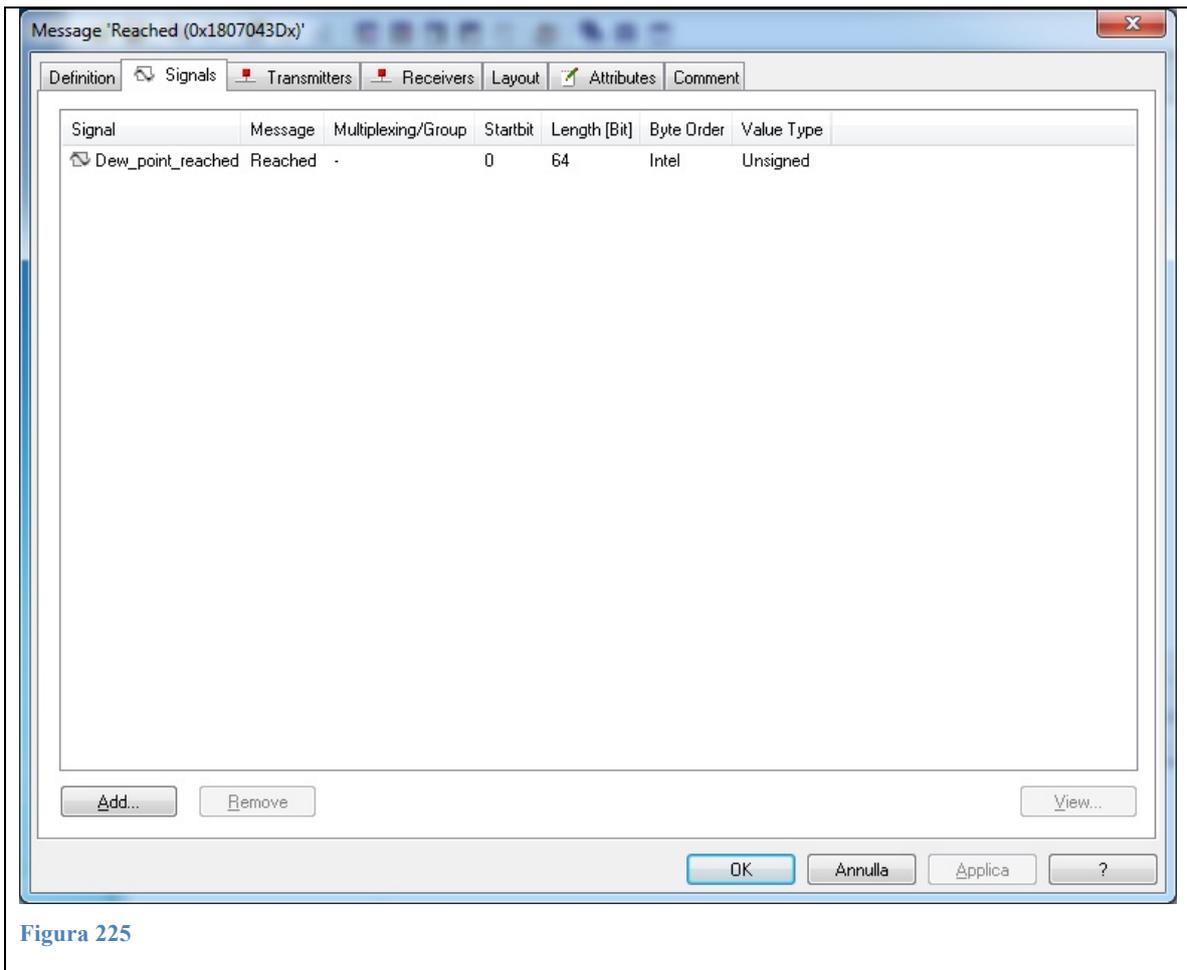


Figura 223



Senza di esso i pacchetti in output e in input al controller sarebbero privi di significato. Poiché la comunicazione col sensore è bidirezionale (come vedremo più dettagliatamente nella descrizione del sensore)

Oltre ai dati inviati dal sensore, si deve creare quindi un secondo “message”, contenente le informazioni necessarie a trasmettere i comandi d'accensione del riscaldamento.



I due file verranno poi richiamati dal VI in real time di Labview consentendo all'utente finale di vedere, direttamente visualizzati sullo schermo del pc, i valori delle misurazioni che gli interessano.

6 Descrizione del sensore

Il sensore multifunzione UniNOx preso in esame è in grado di misurare sia la concentrazione di NOx sia il rapporto A/F presente nei gas di scarico.



Figura 226

Mentre il sensore vero e proprio è prodotto e assemblato dall'NGK nello stabilimento di Nagoya in Giappone, il controller, l'assemblaggio finale e la calibrazione sono fatti dalla Continental a Regensburg in Germania.

6.1 Caratteristiche del sensore:

- Non è necessario hardware aggiuntivo nell'ECU del motore
- Il software di controllo è guidato da un Micro-controller già presente nel sensore
- Trasmissione bidirezionale dei dati digitali via CAN bus.

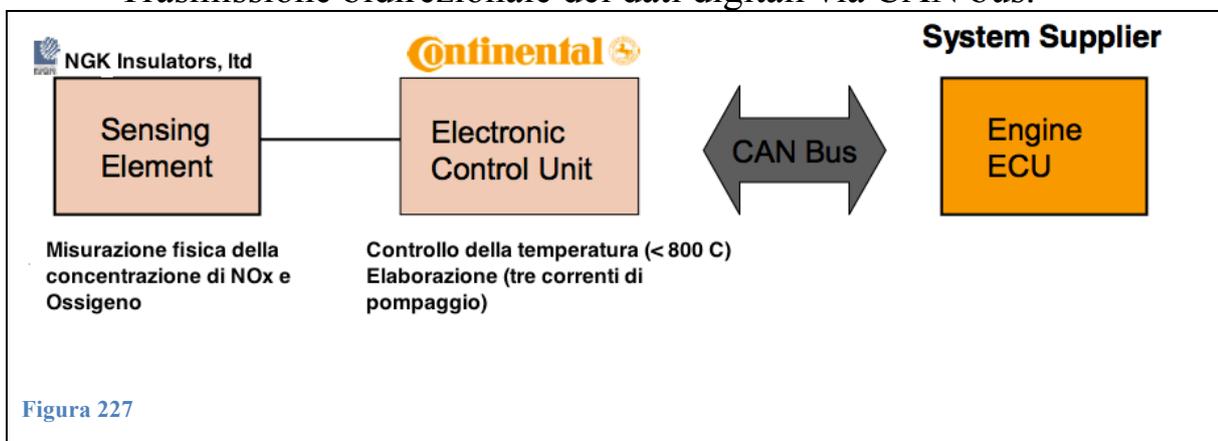
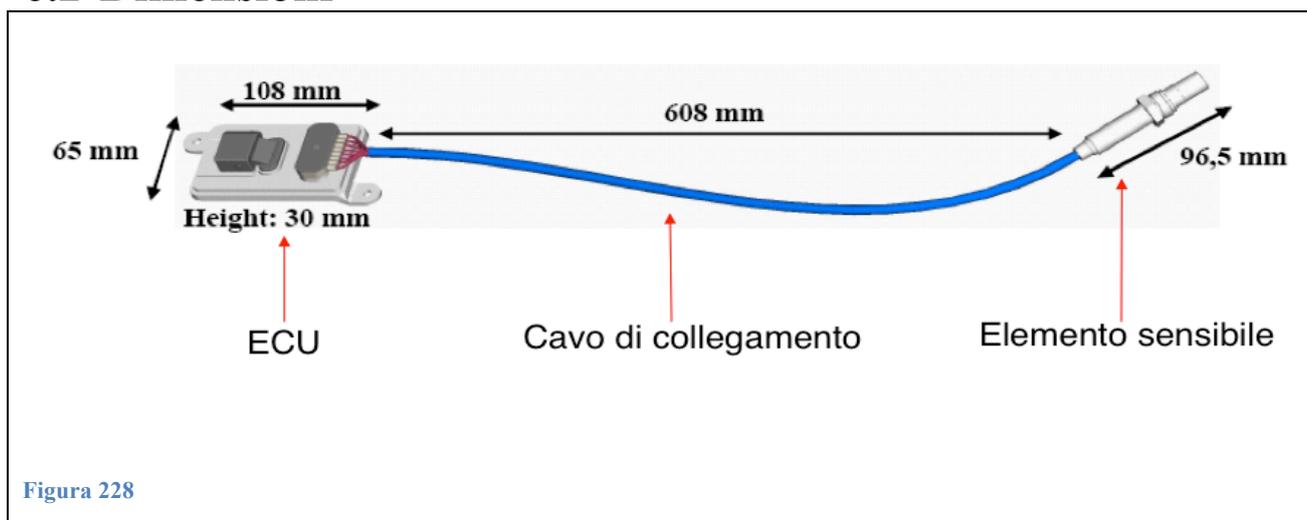


Figura 227

6.2 Dimensioni



6.3 Funzioni

Il sensore UniNO aiuta a controllare diversi tipi di specie chimiche provenienti dallo scarico di motori Benzina e Diesel.

Gas di scarico su cui è possibile eseguire le misurazioni:

- Catalizzatore di NOx (“NOx trap”)
- SCR
- EGR

6.4 Applicazioni

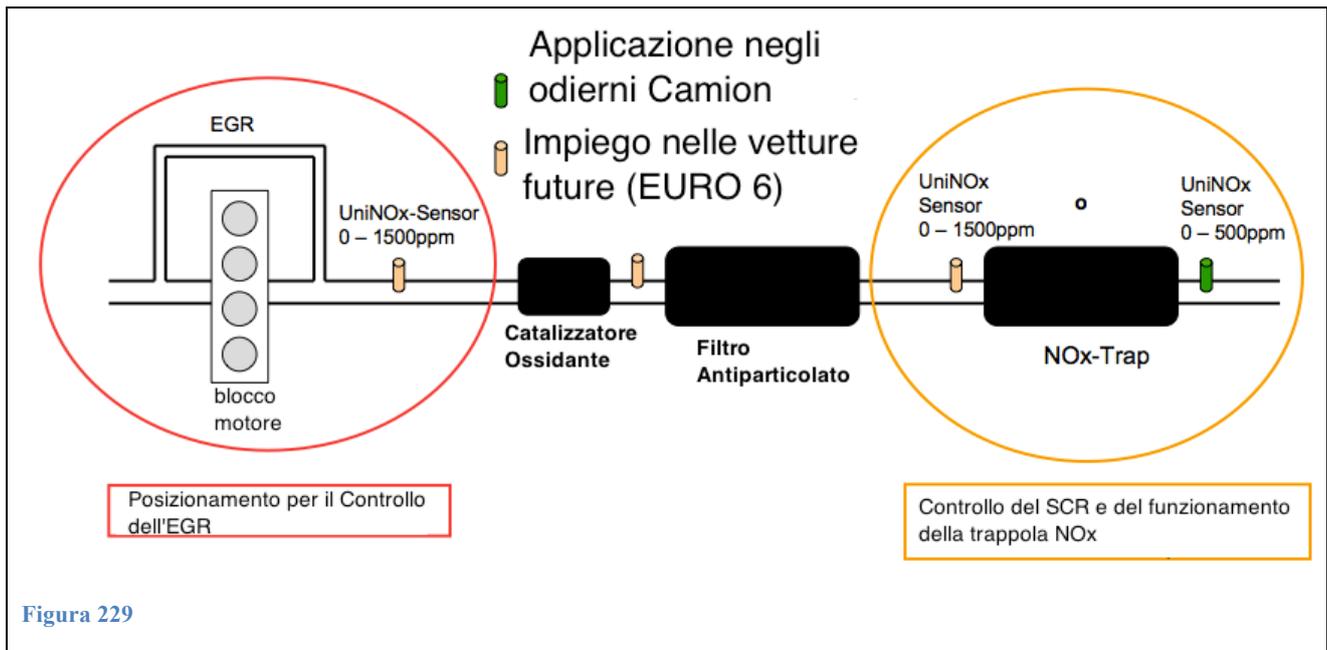
Motori Diesel

Camion (alimentazione a 24V):

- Controllo del SCR
- Controllo della quantità di NOx “catturati” dal catalizzatore (NOx trap)
- Controllo dell’EGR

Autovetture e Camion Leggeri (furgoni ad alimentazione 12V):

- Il sensore NOx si ritiene necessario solo per macchine diesel con un peso totale > 1.6 tonnellate.
- Altrimenti le autovetture sono in grado di rispettare le normative senza l’impiego di trattamenti speciali per i gas di scarico.



Motori Benzina

1) Motori stechiometrici ($\lambda=1$):

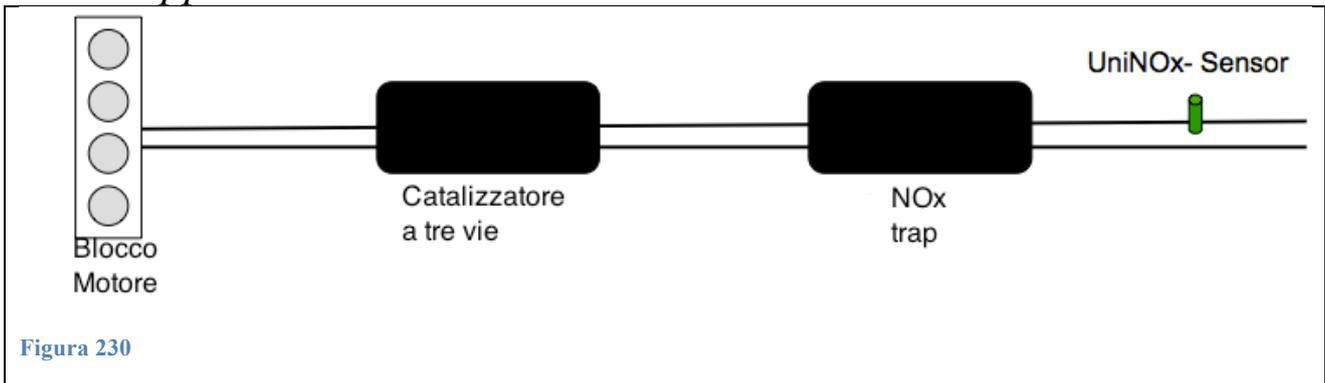
- a) Il sensore aiuta a controllare il funzionamento del catalizzatore, e si adegua ai bisogni dei progettatori che devono rispettare le normative EURO.

2) Motori funzionanti in condizioni magre ($\lambda>1$):

- a) Le principali tecnologie per il funzionamento magro dei motori benzina a iniezione diretta sono GDI (Gasoline Direct Injection), FSI (Fuel Stratified Injection) e HPDI (High Pressure Direct Injection)

Questo genere di motori ha il vantaggio d'incrementare la potenza del motore riducendo il consumo di combustibile. Tuttavia le elevate temperature di combustione facilitano la formazione di NOx, e con l'entrata in vigore della normativa EURO IV questo tipo di motori è stato dotato di un catalizzatore per la riduzione di questi inquinanti, il quale può beneficiare dell'aiuto di un eventuale sensore NOx che ne verifichi il funzionamento.

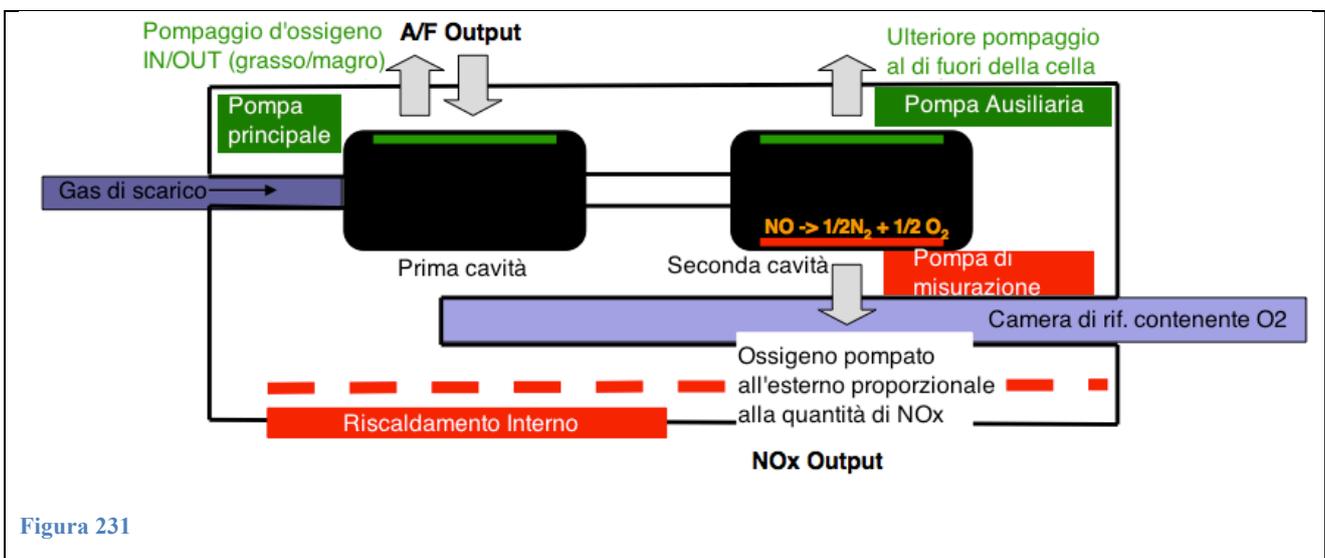
Applicazione su motori a iniezione diretta



- 1) Durante il normale (c.ca 2 min) funzionamento magro ($\lambda > 1$):
 - a) La maggior parte degli NOx formatisi devono essere intrappolati nell'apposito catalizzatore, e il sensore può garantire che non fuoriescano.
 - b) Quando il sensore NOx avverte un incremento delle emissioni di NOx, il catalizzatore è sufficientemente pieno e può avvenire la rigenerazione.
- 2) Rigenerazione (c.ca 2 sec), funzionamento grasso ($\lambda < 1$):
 - a) Le reazioni chimiche all'interno dell'NOx trap riducono gli ossidi d'azoto
 - b) Quando la rigenerazione del catalizzatore è giunta al termine, il sensore NOx invia il comando di stop, ritornando così al funzionamento standard (magro).

6.5 Principio di misurazione

Si presenta una descrizione del principio di funzionamento del sensore veramente semplificata, per una descrizione più dettagliata si rimanda alla parte descrittiva dei sensori NOx.



- 1) Concentrazione d'ossigeno O_2 è regolata all'interno della prima cavità, senza decomporre gli NO_x , dopo di che si diffonde nella seconda cavità.
- 2) La concentrazione di O_2 è tendente a zero ppm, si decompongono gli NO_x liberando così O_2 .
- 3) L' O_2 liberato viene misurato ed è proporzionale alla concentrazione di NO_x .

6.6 Specifiche tecniche:

Principio di misurazione: È un sensore multifunzione il cui principio di funzionamento si basa sulla molecola di ZrO_2 , è dotato di un riscaldatore interno e tre pompe di ossigeno.

Triplo segnale in uscita: NO_x , O_2 lineare e binario.

Range di misurazione: NO_x : 0-500 ppm o 0-1500 ppm
 lin λ : da 0,75 fino all'aria atmosferica
 bin λ : $0,2 (\lambda=1,1) < Volt < 0,75 (\lambda=0,9)$

Tempo necessario alla lettura degli NO_x : <100 sec

Voltaggio d'alimentazione: 24V

Cappuccio protettivo del sensore: Specifico per automobili e mezzi pesanti(camion)

Temperatura di funzionamento dei gas: 100-800°C

Vita approssimativa: 2000h≈100000 miglia

6.7 Cablaggio

Il cavo di connessione del controller al CRIO, non presente nella confezione, è stato creato consultando le informazioni presenti nel datasheet del sensore e del modulo NI 9853. Per quanto concerne la connessione al controller, i cavi sono stati collegati al connettore come segue:

- Pin 1: V+
- Pin 2: GND
- Pin 3: CAN Low
- Pin 4: CAN High

- Pin 5: // (no connection)

In figura è mostrata la vista frontale del controller con i relativi pin numerati:

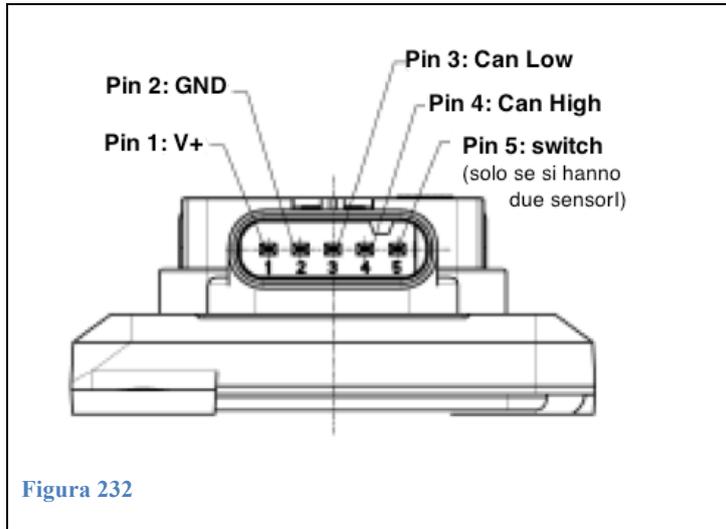


Figura 232

Il cavo si divide poi due parti:

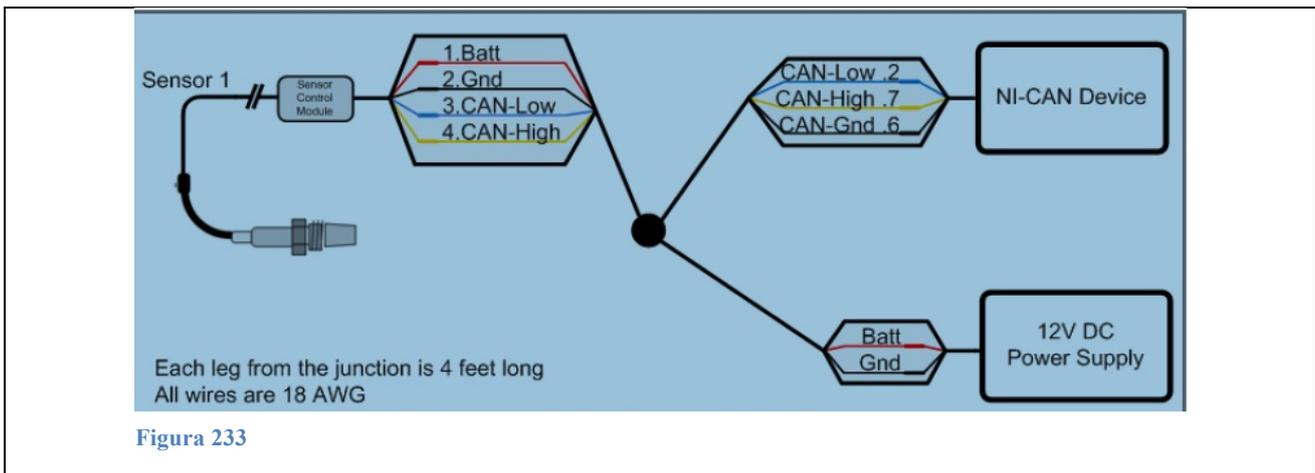


Figura 233

Da un lato si hanno i due cavi necessari ad alimentare la sonda (GND e V+) sono collegati ai morsetti di un alimentatore Kert da 24V.

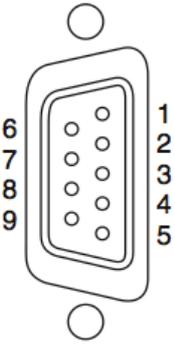
Dall'altro invece i cavi CAN H, CAN L e la GND sono saldati a un connettore DB9 (femmina), in grado di connettersi alla porta CAN0, autoalimentata, del modulo NI 9853 per la comunicazione CAN:



Figura 234

Tabella 13

Pin della CAN0 (CAN1 ad alimentazione esterna)

Connector	Pin	Signal
	1	No Connection (NC)
	2	CAN_L
	3	COM
	4	NC
	5	SHLD
	6	COM
	7	CAN_H
	8	NC
	9	NC (V+)

Il cavo deve possedere alcune caratteristiche, specificate nel datasheet del modulo 9853, per essere idoneo alla comunicazione CAN:

Tabella 14

Characteristic	Value
Impedenza	95 Ω minimum, 120 Ω nominal, 140 Ω maximum
Resistenza in funzione della lunghezza.	70 m Ω /m nominal
Ritardo/lunghezza	5 ns/m nominal

Va inoltre aggiunta una resistenza R_t fra i cavi CAN H e CAN L in prossimità del connettore:

Tabella 15

	Valore	Condizioni
Resistenza posta a fine cavo	100 Ω min, 120 Ω nominal, 130 Ω max	massima potenza dissipata: 220mW

6.8 Posizionamento

L'installazione di questo sensore allo scarico avviene avvitandolo su di un manicotto che si adatta allo scarico di due motori presenti al banco. Sul manicotto sono saldate tre boccole opportunamente maschiate per ospitare:

- Il sensore NO_x dotato di una ghiera filettata M20.
- Un sensore UEGO con filettatura M18, per avere un mezzo di paragone dei risultati del multisensore NO_x.
- Una termocoppia con filettatura 1/8 Gas per rilevare l'effettiva temperatura dei gas di scarico in cui i sensori si trovano ad operare.

Una corretta disposizione dei tre sensori deve far sì che il flusso deviato da un sensore (poiché costituisce un'asperità), non comporti deviazioni del flusso intercettato dagli altri due sensori. Per tale motivo le tre boccole sono sfalsate assialmente di 50 mm e radialmente di 90°, per maggior chiarezza si riportano le immagini del manicotto disegnate col noto programma di disegno e progettazione tridimensionale SolidWorks:

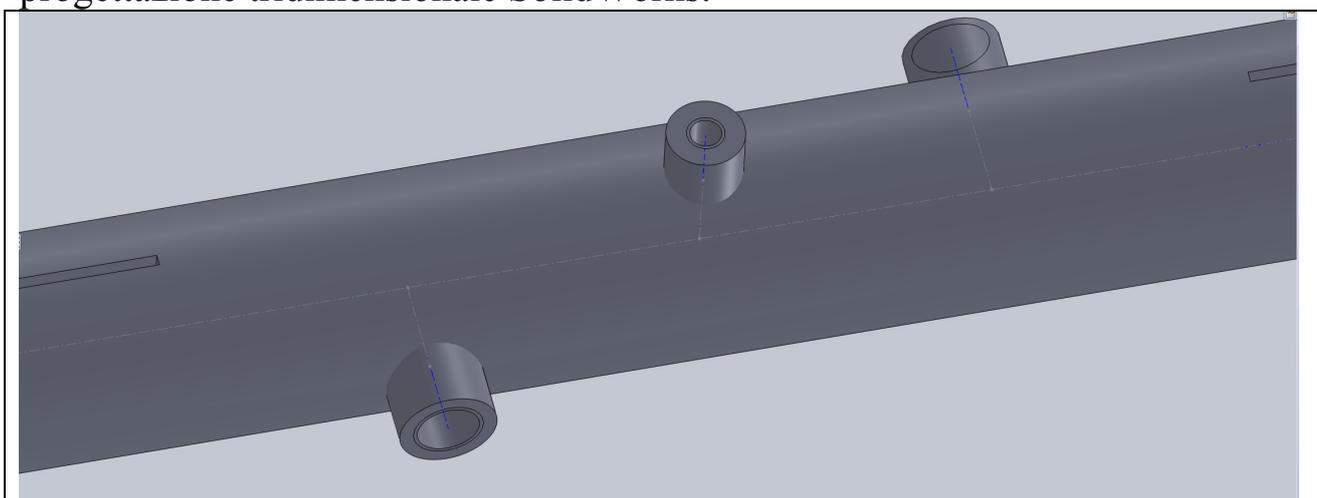


Figura 235

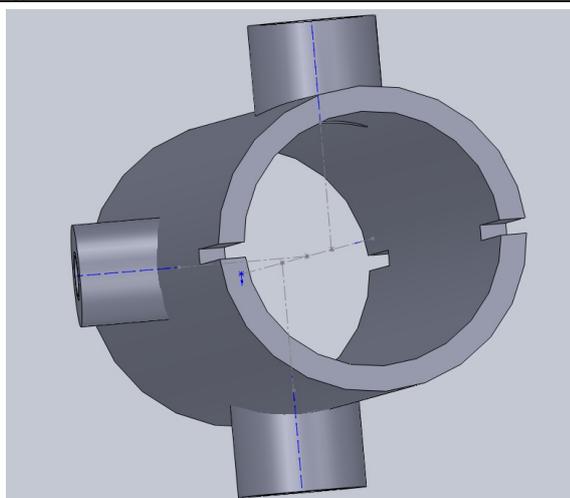


Figura 236

Rapp. del sensore NO_x che sarà avvitato sulla boccola maschiata M20x1,5



Figura 237

Figura 238

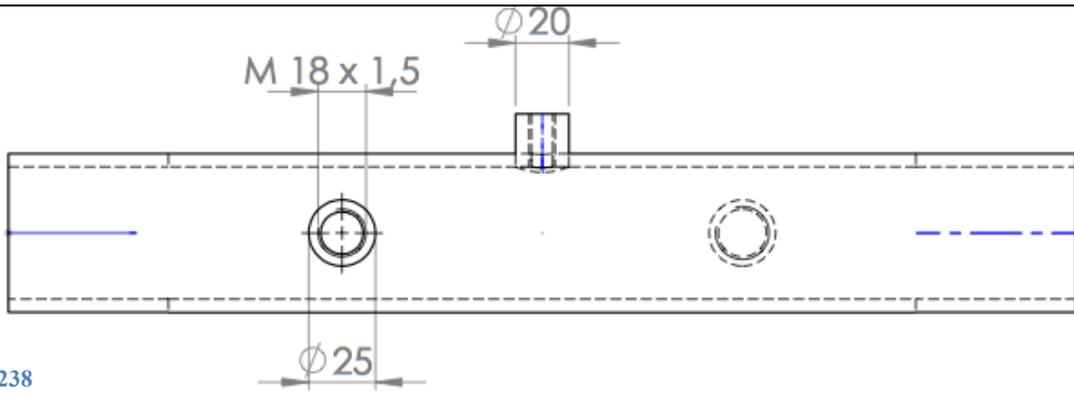


Figura 239

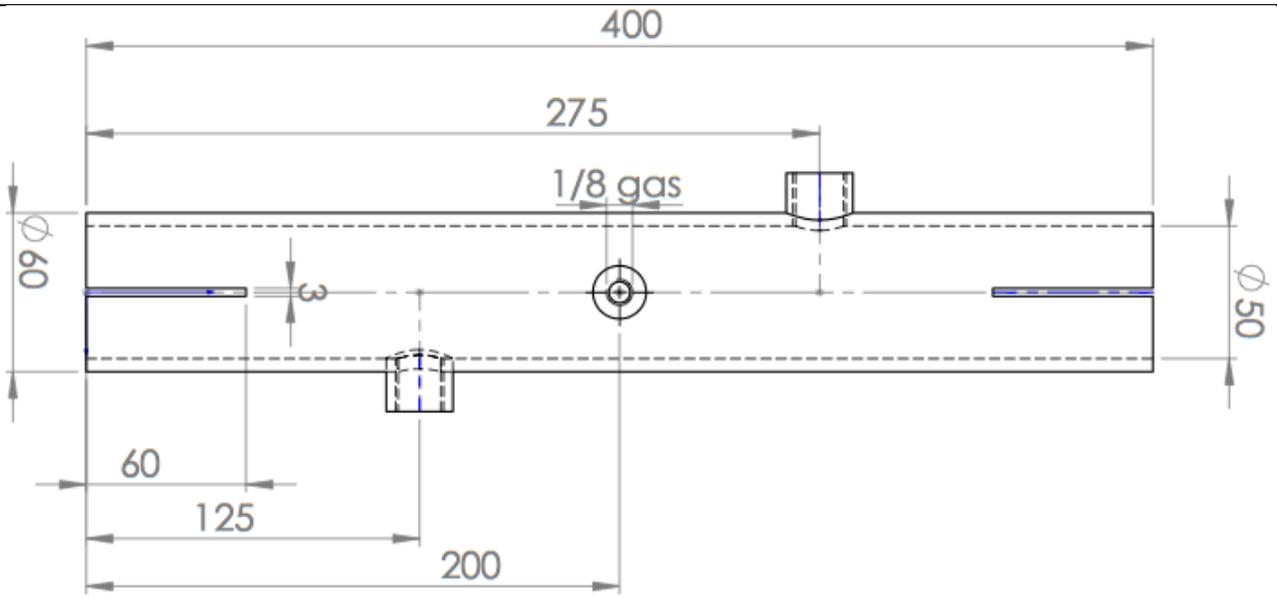
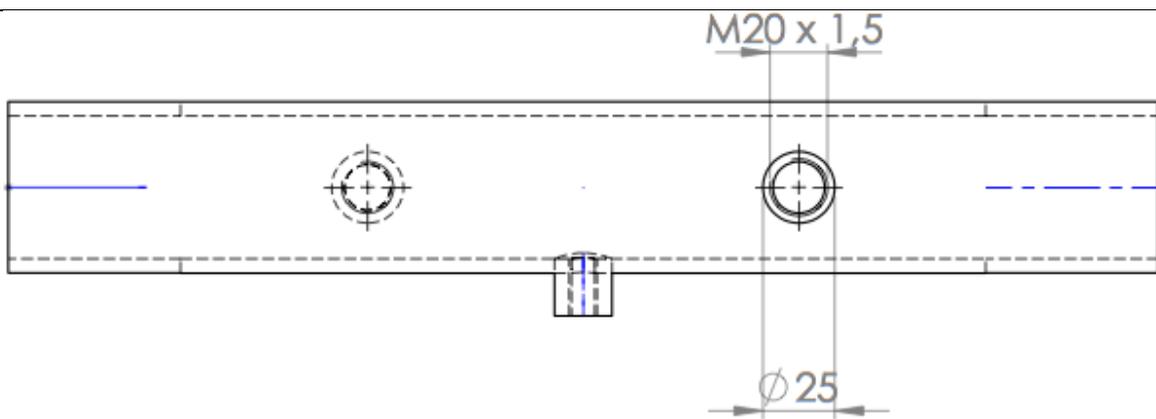


Figura 240



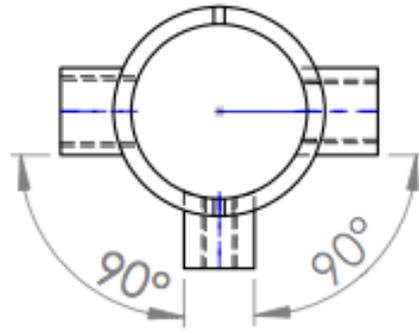


Figura 241

7 Progettazione in Labview

Prima di procedere alla creazione del VI al quale l'utente può interfacciarsi per la comunicazione CAN occorre:

1. Connettere il controller al cavo di alimentazione e comunicazione CAN.
2. Connettere il cavo alla porta CAN0 del modulo 9853 alloggiato nello slot 1 del CRIO.
3. Connettere il CRIO al PC tramite cavo di rete.
4. Collegare il CRIO e il sensore all'alimentatore da 24V.
5. Accendere l'alimentatore.

Aperto Labview si crea un nuovo progetto:

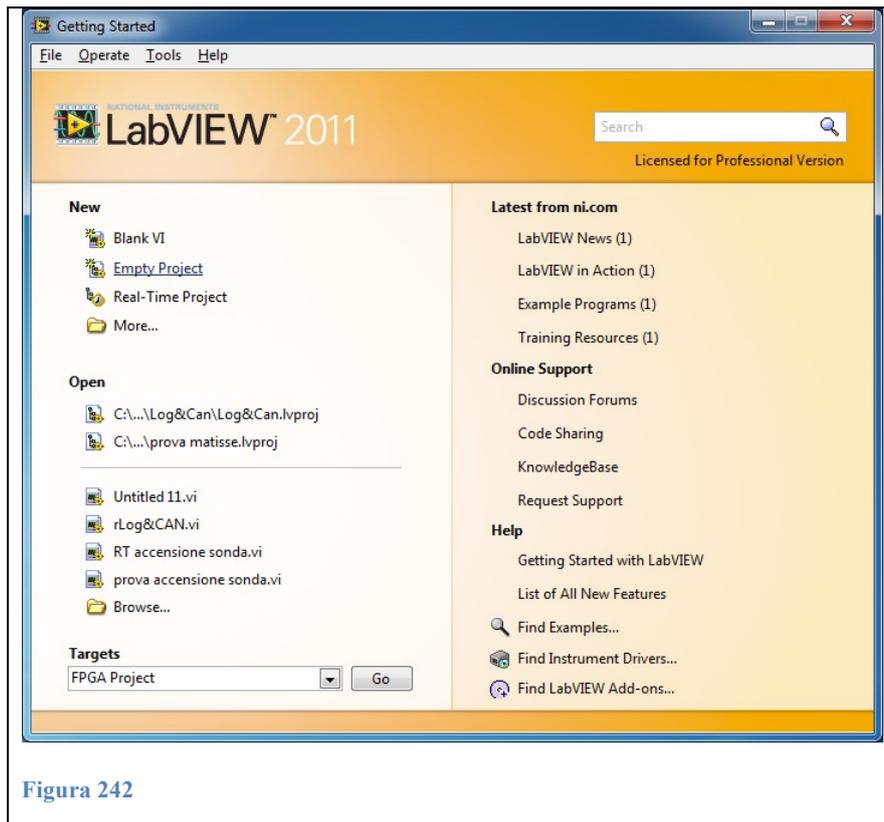


Figura 242

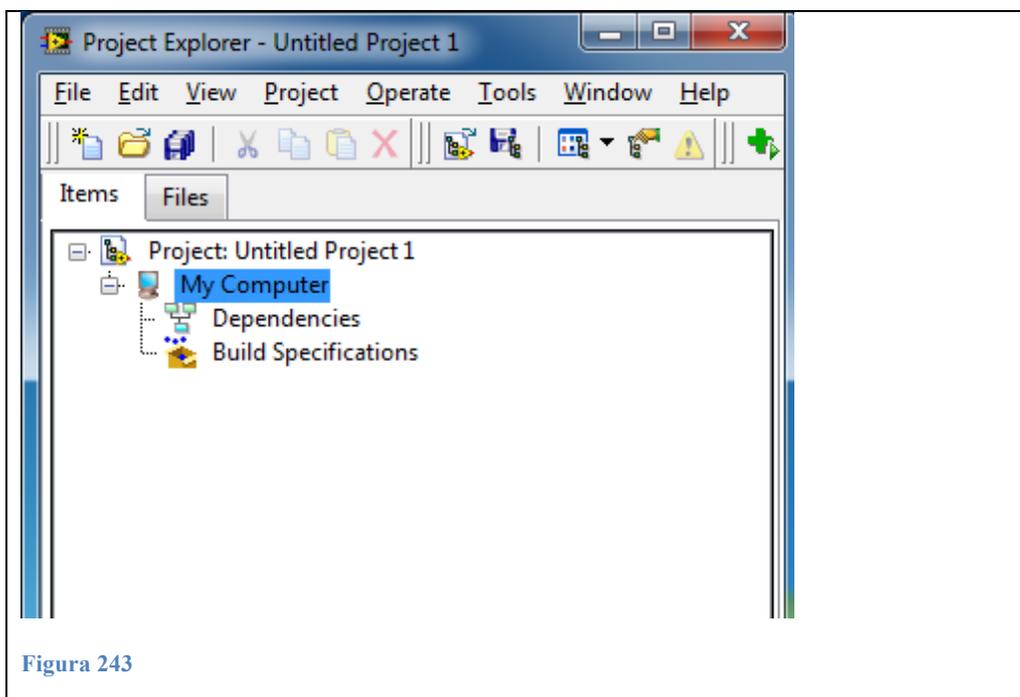


Figura 243

Nel nuovo progetto vanno poi aggiunti:

- Il CRIO utilizzato e il relativo indirizzo IP (Pracing Horse 01)
- Lo Chassis del CRIO e relativa scheda FPGA
- I/Il moduli/o 9853 su cui si sono effettuati i test

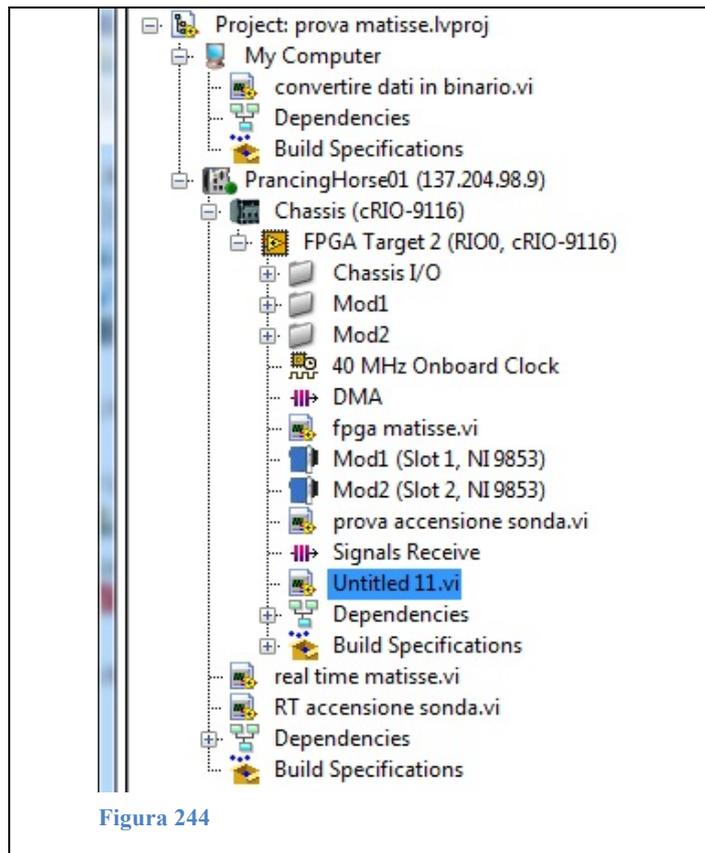


Figura 244

Una volta fatto ciò le porte CAN1 si possono eliminare dal progetto poiché non utilizzate, per le porte CAN0 invece, occorre modificare il valore di default di alcuni parametri (frequenza e timeout) come in figura:

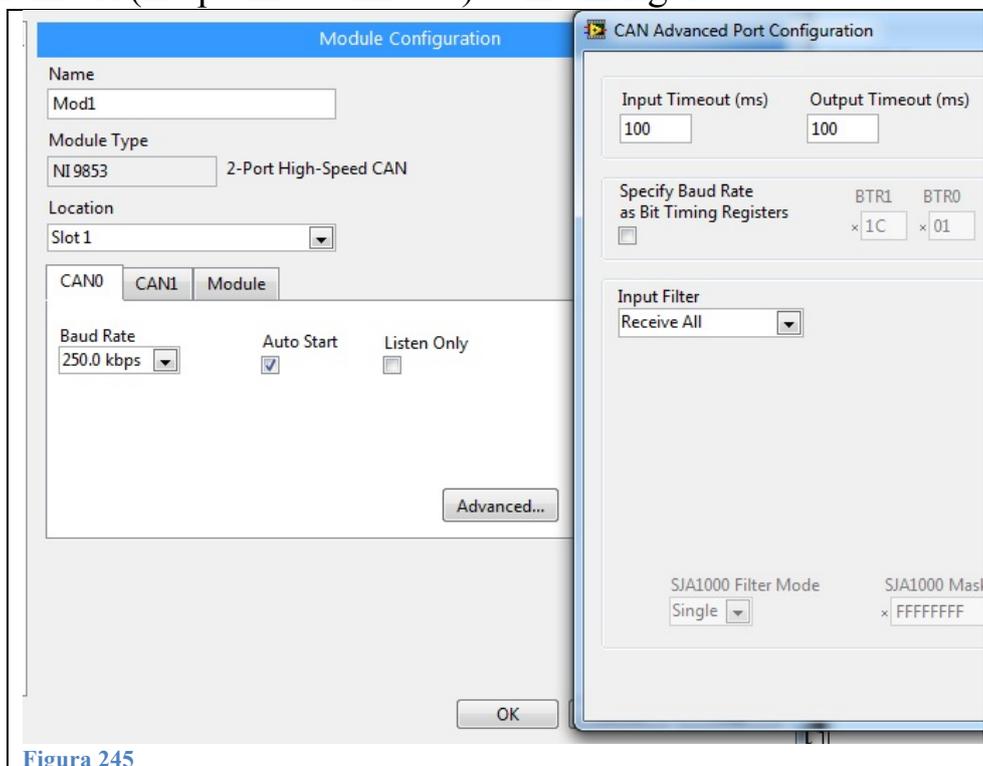


Figura 245

Una volta fatto ciò non resta altro che scrivere i VI per la comunicazione CAN in real-time e in FPGA.

7.1 Realizzazione del VI in FPGA

Si è partiti dalla progettazione del VI in FPGA poiché è attraverso tale scheda che avviene l'acquisizione dei dati a elevata frequenza di campionamento.

Pannello di controllo

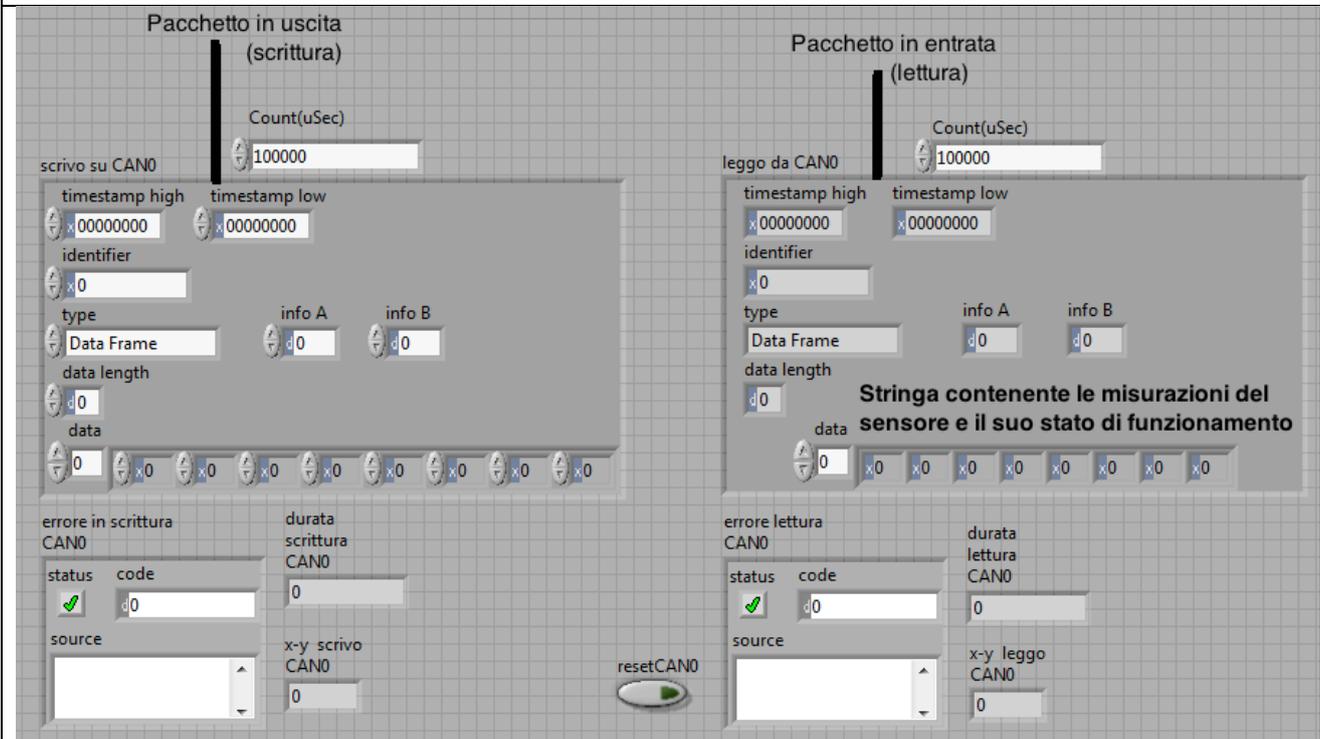


Figura 246

abc cluster contenente dati di diverso tipo (timestamp, identifier ecc...) ricevuti/inviati dalla/alla porta CAN0, al suo interno vi sono tutte le informazioni di un pacchetto CAN, le informazioni riguardanti le misurazioni effettuate dal sensore sono contenute all'interno del vettore data, composto da 8 numeri esadecimali che vanno da 00 a FF per un totale di 256 byte ogni casella.

Tali informazioni sono però prive di significato e devono essere convertite in informazioni utili, utilizzando il protocollo di trasferimento e ricezione implementato nel message di CANalyzer (vedi capitolo [CANalyzer](#)):

Protocollo CAN dei dati acquisiti dal sensore

Transmitted Data

- Identifier (extended) 0C07033D hex
- Transfer rate 250 kBaud
- Repetition 10 msec
- Data format Intel

The data of the NO_x sensor are transmitted via CAN Bus in one message, which consists of 8 bytes.

NO_x-message

- byte 0 NO_x; L-byte
- byte 1 NO_x; H-byte
- byte 2 O₂; L-byte
- byte 3 O₂; H-byte
- byte 4 binary; L-byte
- byte 5 binary; H-byte
- byte 6 Statusbyte
- byte 7 Errorbyte

Data range:

- NO_x concentration -100 – 1650 ppm (signed)
- λ_{lin} 0 – 1540 (unsigned)

signal of the linear A/F-ratio function is transmitted as $1000/\lambda$
(value 1000: $\lambda=1$, value < 1000: λ =lean)

- λ_{bin} -50 – 1800 mV (signed)

signal of the binary output function is transmitted as Nernstian Voltage with an offset of 200 mV

(value 0: $U_{Nemst}=-200mV$, value 200: $U_{Nemst}=0mV$, value 1400: $U_{Nemst}=1200mV$)

Status Byte	0 ... 255	Bit 7..0: D7 / D6 / D5 / D4 / D3 / D2 / D1 / D0 D7 / D6: Sensor Supply D5 / D4: NOx-signal D3 / D2: λ -signal D1 / D0: sensor temperature 0 / 0 == not valid / not at temperature 0 / 1 == valid / at temperature 1 / 0 == Error (not used) 1 / 1 == not available
Error Byte	0 ... 255	Bit 7..0: 1 / 1 / D5 / D4 / 1 / 1 / D1 / D0 D5 / D4: Short circuit check D1 / D0: Open wire check 0 / 0 == Short/open wire not detected 0 / 1 == Short/open wire detected 1 / 0 == Error (not used) 1 / 1 == not available

Protocollo CAN dei dati inviati al sensore

- Identifier 1807043D hex
- Transfer rate 250 kBaud
- Repetition • 100 msec
- Length 8 Byte
- Receiver ECU of NOx sensor
- Data format Intel

- Dew point reached hex 8x (mode 1 x: 0)
- Dew point not reached hex 0x (mode 1 x: 0)

The dew point byte (hex 80) must only be sent, if the exhaust gas contains no liquid water or other fluids.

Diagramma a blocchi

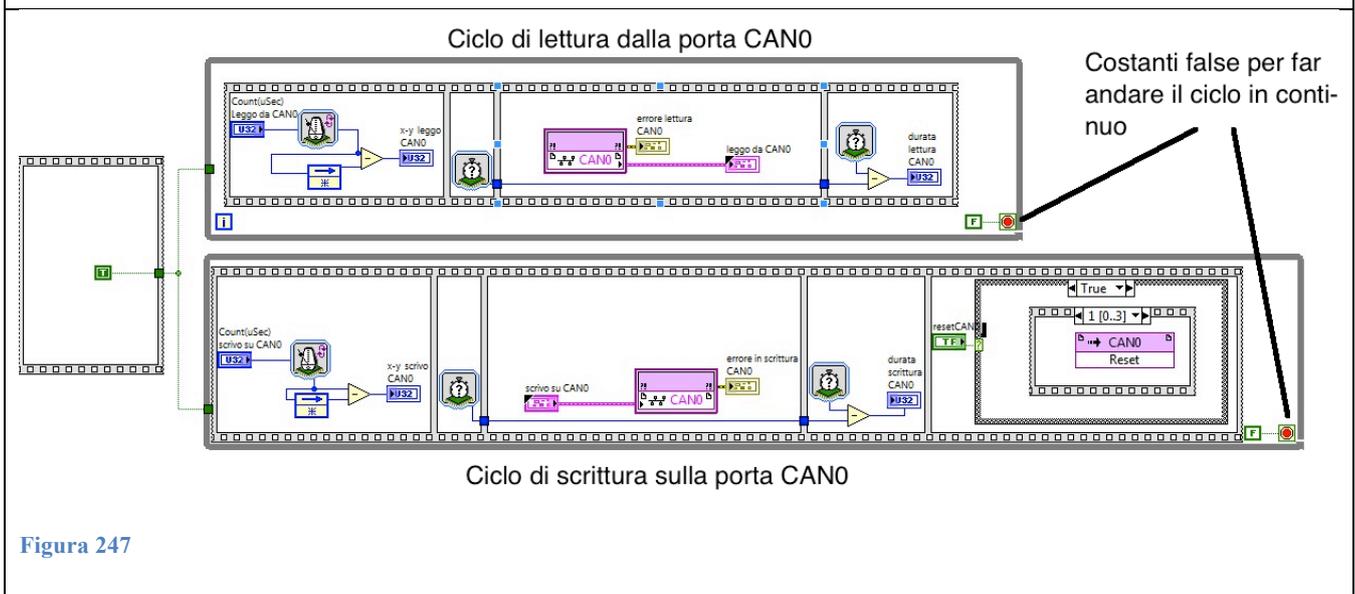


Figura 247

Il diagramma a blocchi è composto da due cicli che, una volta cliccato sul “run” di esecuzione, girano in continuo grazie alle due costanti false evidenziate in figura.

Il ciclo in alto legge i pacchetti che il sensore invia alla porta CAN, viceversa il ciclo sotto serve per inviare i pacchetti dal PC al sensore.

Problematiche riscontrate:

Di seguito si riportano alcune problematiche incontrate durante i vari tentativi di mettere in funzione il sensore.

Prima di utilizzare i VI sopra presentati, si è utilizzato un pacchetto di VI reso disponibile dalla “Drivven” al sito: <http://www.drivven.com/Downloads.htm>. I VI contenuti al suo interno sono in grado di interfacciarsi direttamente ad alcuni sensori NOx. Purtroppo però il numero identificativo del nostro controller non corrispondeva con quello specificato dalla Drivven nel manuale di utilizzo software.

Di conseguenza si è creato il VI sopra presentato, che una volta messo in funzione il sensore ha mostrato che l’output letto dal PC è privo di significato.

Come prima ipotesi si è pensato che questo fosse dovuto alla mancata accensione del sensore e quindi si è provato ad accenderlo seguendo le linee guida riportate nel protocollo CAN di scrittura, ma senza avere riscontri positivi.

Si è quindi giunti alle seguenti conclusioni:

1. Il sensore o il controller sono danneggiati.
2. Gli identifier forniti non sono quelli corretti.

La seconda ipotesi è la più probabile poiché a video sono comunque visualizzati gli output del sensore, e sebbene essi assumano valori privi di significato (valutazione fatta dopo averli convertiti da valori esadecimali a unità fisiche [ppm] di O₂ e NO_x), si nota un'elevata frequenza con la quale questi valori sono aggiornati.

Appendice A

```
%script per il trattamento dei dati acquisiti

clear all

clc

cd C:\Users\Matteo\Desktop\Dati_acquisiti\dati_matlab%vai alla seguente
directory

i=menu('Inserisci le ultime due cifre del file da
caricare','25','26','27','28','29','30','31','32','33','34','35','36','37','38',
'41','42','43','44','59','60','61','62','63','64','65','66','67','68','69','70',
'71','72','73','74','76','77');

%carica il file selezionato, il numero 62 è quello su cui ci si è concentrati

%per il calcolo delle costanti di tempo

    if i==1

        load U_H00025

        fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

    end

    if i==2

        load U_H00026

        fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

        pause

    end

    if i==3

        load U_H00027

        fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

    end

    if i==4

        load U_H00028

        fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

    end

    if i==5

        load U_H00029

        fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
```

```
end

if i==6

load U_H00030

fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

end

if i==7

load U_H00031

fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

end

if i==8

load U_H00032

fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

end

if i==9

load U_H00033

fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

end

if i==10

load U_H00034

fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

end

if i==11

load U_H00035

fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

end

if i==12

load U_H00036

fprintf ('caricato file U_H000%d',i)

end

if i==13

load U_H00037
```

```
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==14
load U_H00038
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==15
load U_H00041
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==16
load U_H00042
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==17
load U_H00043
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==18
load U_H00044
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==19
load U_H00059
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==20
load U_H00060
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==21
```

```
load U_H00061
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==22
load U_H00062
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==23
load U_H00063
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==24
load U_H00064
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==25
load U_H00065
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==26
load U_H00066
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==27
load U_H00067
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
if i==28
load U_H00068
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end
```

```
if i==29
load U_H00069
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end

if i==30
load U_H00070
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end

if i==31
load U_H00071
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end

if i==32
load U_H00072
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end

if i==33
load U_H00073
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end

if i==34
load U_H00074
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end

if i==35
load U_H00076
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
end

if i==36
load U_H00077
fprintf ('caricato file U_H000%d',i)
```

```

end

freq_camp=10000;%Hz

n_campioni=size(A,1);%n righe della matrice A

t_acquisizione=n_campioni/10000;%durtata dell'acquisizione

colonne=size (A,2);%restituisce il numero di colonne della matrice A

%plot della caratteristica del controller UNIBO e Ducati

load dati_sonda.mat%carica il file con la mappa di AFR del controller UNIBO

plot(Fogliol(2,:),Fogliol(1,),'b')%nella seconda riga ho i Volt e nella prima
l'AFR

load dati_sonda_conD.mat

hold on

plot(Fogliol(2,:),Fogliol(1,),'r')

xlabel('Volt'),ylabel('AFR corrispondente')

title ('Caratteristiche contoller')

legend('UNIBO','Ducati')

disp('Premi un tasto per proseguire')

pause

hold off

clf

clc

load dati_sonda.mat%ricarico la caratt UNIBO

for i=1:colonne

    if i==1,

        plot(A(:,i),'b');

        title('Tempo fra due campionamenti')

        xlabel('N.campioni')

        ylabel('Volt')

    end

    if i==2,

        plot(A(:,i),'r');

```

```

title('Scam, durata ciclo')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Volt')
pause
plot(A(1:1200,i),'r');
title('Zoom Scam')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Volt')
end
if i==3
plot(A(:,i),'b');
title('Smot')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Volt')
end
if i==4
plot(A(:,i),'b');
title('Pressione cilindro')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Volt')
pause
plot((A(:,i)*10)+1.6)
title('Grafico pressione in bar')
xlabel('Campioni')
ylabel('Bar')
pause
plot((A(1:1200,i)*10)+1.6)
title('Zoom grafico pressione in bar')
xlabel('Campioni')
ylabel('Bar')
end

```

```

if i==5
    plot(A(:,i), 'b');
    title('UEGO conf. unibo')
    xlabel('N.campioni')
    ylabel('Volt')
    pause
    plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,i), 'linear'))
    title('UEGO conf. unibo')
    xlabel('Campioni')
    ylabel('AFR')

end

if i==6
    plot(A(:,i), 'b');
    title('UEGO cil 1')
    xlabel('N.campioni')
    ylabel('Volt')
    pause
    plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,i), 'linear'))
    title('UEGO cil 1')
    xlabel('Campioni')
    ylabel('AFR')

end

if i==7
    plot(A(:,i), 'b');
    title('UEGO cil 2')
    xlabel('N.campioni')
    ylabel('Volt')
    pause
    plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,i), 'linear'))
    title('UEGO cil 2')

```

```

xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')
end
if i==8
plot(A(:,i),'b');
title('UEGO cil 3')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Volt')
pause
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,i),'linear'))
title('UEGO cil 3')
xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')
end
if i==9
plot(A(:,i),'b');
title('UEGO cil 4')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Volt')
pause
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,i)))
title('UEGO cil 4')
xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')
end
if i==10
plot(A(:,i),'b');
title('Comando iniezione cilindro 1')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Volt')
end
end

```

```

if i==11
    plot(A(:,i), 'b');
    title('UEGO cil 4')
    xlabel('N.campioni')
    ylabel('Volt')
end
if i==12
    plot(A(:,i), 'b');
    title('UEGO conf con controller ducati')
    xlabel('N.campioni')
    ylabel('Volt')
    pause
    load dati_sonda_conD.mat
    disp ('Caricata la caratteristica controller ducati')
    plot(interpl(Fogliol(1,:),A(:,i), 'linear'))
    title('UEGO conf con controller ducati')
    xlabel('Campioni')
    ylabel('Afr')
end
disp('Premi un tasto per passare al grafico successivo')
pause
end
load dati_sonda.mat
%pressione e scam
clf
clc
hold on
plot(((A(:,2)/30)+10.3), 'y')
plot(((A(:,i)*10)+1.6), 'r')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Bar')

```

```

legend('Scam','Pressione cil.')
hold off
clf
clc
%ricarico la caratteristica controller
%grafico AFR quarto cilindro + Scam
disp('Grafico Scam sovrapposto alla misurazione lambda del 4 cilindro')
hold on
plot((A(:,2)/30)+10.3,'y')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,9)),'r')
title('Grafico Scam sovrapposto alla misurazione lambda del 4 cilindro')
xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')
legend ('Scam','AFR')
hold off
disp('Premi un tasto per passare al grafico successivo')
pause
clf
clc
%zoom del grafico sopra primo gradino
disp('Zoom primo gradino')
hold on
plot((A(80000:120000,2)/30)+10.3,'y');%primo gradino plottato
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(80000:120000,9)),'r');
title('Zoom primo gradino')
xlabel('N.campioni')
ylabel('Afr')
legend ('Scam','AFR')
hold off
disp('premi un tasto per passare al grafico successivo')
pause

```

```

clf
clc

%zoom del grafico sopra secondo gradino

disp('Zoom secondo gradino')

hold on

plot((A(180000:215000,2)/30)+10.3,'y');
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(180000:215000,9)),'r');

title('Zoom secondo gradino')

xlabel('Campioni')

ylabel('AFR')

legend ('Scam','AFR')

disp('premi un tasto per passare al grafico successivo')

pause

hold off

clf

clc

%zoom del grafico sopra terzo gradino

disp('Zoom terzo gradino')

hold on

plot((A(280000:320000,2)/30)+10.3,'y');
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(280000:320000,9)),'r');

title('Zoom terzo gradino')

xlabel('Campioni')

ylabel('AFR')

legend ('Scam','AFR')

disp('premi un tasto per passare al grafico successivo')

pause

hold off

clf

clc

%zoom del grafico sopra quarto gradino

```

```

disp('Zoom quarto gradino')
hold on
plot(((A(380000:420000,2)/30)+10.3), 'y');
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(380000:420000,9)), 'r');
title('Zoom quarto gradino')
xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')
legend ('Scam', 'AFR')
disp('Premi un tasto per passare al grafico successivo')
pause
hold off
clf
clc

%zoom del grafico sopra quinto gradino
disp('Zoom quinto gradino')
hold on
plot((((A(480000:520000,2))/30)+10.3), 'y');
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(480000:520000,9)), 'r');
title('Zoom quinto gradino')
xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')
legend ('Scam', 'AFR')
disp('Premi un tasto per passare al grafico successivo')
pause
hold off
clf
clc

%transitorio e confluenza
disp('Grafico AFR transitorio sovrapposto a confluenza unibo')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,9)), 'r')
title('Grafico AFR transitorio sovrapposto a confluenza unibo')

```

```

hold on
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,5)), 'y')
xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')
legend ('AFR cil.4 trans.', 'AFR confl')
pause
hold off
clc
clf
%AFR quattro cilindri
hold on
disp('AFR dei 4 cilindri sovrapposte')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,6)), 'r')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,7)), 'y')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,8)), 'b')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,9)), 'g')
title ('AFR dei 4 cilindri sovrapposte')
legend('AFR cil.1', 'AFR cil.2', 'AFR cil.3', 'AFR cil.4')
hold off
disp('Premi un tasto per continuare')
pause
clc
clf
%AFR quattro cilindri + confluenza UNIBO
hold on
disp('AFR dei 4 cilindri sovrapposte e confluenza')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,6)), 'r:')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,7)), 'y:')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,8)), 'b:')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,9)), 'g:')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,5)), 'c:')

```

```

title ('AFR dei 4 cilindri sovrapposte')
legend('AFR cil.1', 'AFR cil.2', 'AFR cil.3', 'AFR cil.4','AFR confl. UNIBO')
hold off
disp('Premi un tasto per continuare')
pause
clf
clc

%comandi iniezione sovrapposti alla curva di pressione
hold on
plot(A(1:1200,10),'b'); %cil 1
plot((A(1:1200,11)-0.75),'k'); %cil 4
plot(((A(1:1200,4)*10)+1.6),'r'); %pressione
xlabel('N.campioni')
ylabel('Bar')

title('Sovrapposizione curva di pressione del 4 cil con i comandi d iniezione 1
e 4')
legend('Com.Iniezione Cil.1','Com.Iniezione Cil.4','Curva di pressione cil.4')
hold off
disp('Premi un tasto per continuare')
pause
clf
clc

%PARTE DI SCRIPT PER IL CALCOLO DELLA COSTANTE DI TEMPO
aux1=mean(A(20000:100000,9));%in volt
m_p_g_afr=interp1(Fogliol(1,:),aux1);%media primo gradino in afr
aux2=mean(A(120000:190000,9));%in vol
m_s_g_afr=interp1(Fogliol(1,:),aux2);%media secondo step in afr

p_b_0=find(A(:,2)<1,1,'first');%primo segnale basso

```

```

if p_b_0~=1%mi assicuro che il primo mezzo ciclo sia a segnale alto così da
trascurarlo

p_a_1=(find(A(p_b_0:n_campioni,2)>4,1,'first')+p_b_0);%primo valore "alto" dopo
il primo gradino

%l'ho fatto per escudere il primo mezzo ciclo

p_b_1=(find(A(p_a_1:n_campioni,2)<1,1,'first')+p_a_1);%primo segnale basso del
secondo ciclo

camp_ciclo=(p_b_1-p_b_0);%numero di campioni per ciclo

else disp('Attenzione carica UH_00062.MAT')

end

rpm=(1/(((camp_ciclo)/freq_camp)/(60)/2));%calcolo rpm dal numero di campioni
per ciclo

DAFRideale1=(m_s_g_afr-m_p_g_afr);%delta afr di un sensore ideale

%ora provo a calcolare la variazione del sensore in un ciclo, anche se ho
%difficoltà a scegliere quale considerare

afr_sensore_primo_ciclo1=interp1(Fogliol(1,:),A(101775,9));%afr a fine primo
ciclo

%l'ho scelto guardando l'andamento nel grafico, è il primo che mostra uno
%scostamento rilevante, nel grafico in cui vi è un solo gradino corrisponde
%al campione 61775.

DAFRsens1=(afr_sensore_primo_ciclo1-m_p_g_afr);%differenza fra il valore della
riga sopra

%e la media del gradino

cost_tau1=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens1/DAFRideale1))));%costante di tempo così
calcolata

%calcolo tau secondo gradino

aux3=mean(A(220000:290000,9));%media terzo step in volt

m_t_g_afr=interp1(Fogliol(1,:),aux3);%media terzo step in afr

DAFRideale2=(m_t_g_afr-m_s_g_afr);%secondo DAFR ideale

afr_sensore_primo_ciclo2=interp1(Fogliol(1,:),A(201759,9));

%a mio avviso il primo scostamento si ha al camptione 201759

DAFRsens2=(afr_sensore_primo_ciclo2-m_s_g_afr);

```

```

cost_tau2=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens2/DAFRideale2))));

%calcolo tau terzo gradino
aux4=mean(A(320000:390000,9));%media quarto step in volt
m_q_g_afr=interp1(Fogliol(1,:),aux4);%media quarto step in afr
DAFRideale3=(m_t_g_afr-m_q_g_afr);%terzo DAFR ideale
afr_sensore_primo_ciclo3=interp1(Fogliol(1,:),A(301476,9));
%a mio avviso il primo scostamento si ha al camptione 301476
DAFRsens3=(m_t_g_afr-afr_sensore_primo_ciclo3);
cost_tau3=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens3/DAFRideale3))));

%calcolo tau quarto gradino
aux5=mean(A(420000:490000,9));%media quarto step in volt
m_quinto_g_afr=interp1(Fogliol(1,:),aux5);%media quinto step in afr
DAFRideale4=(m_q_g_afr-m_quinto_g_afr);%quarto DAFR ideale
afr_sensore_primo_ciclo4=interp1(Fogliol(1,:),A(401704,9));
%a mio avviso il primo scostamento si ha al camptione 401704
DAFRsens4=(m_q_g_afr-afr_sensore_primo_ciclo4);
cost_tau4=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens4/DAFRideale4))));

%calcolo tau quinto gradino
aux6=mean(A(520000:590000,9));%media sesto step in volt
m_sesto_g_afr=interp1(Fogliol(1,:),aux6);%media sesto step in afr
DAFRideale5=(m_sesto_g_afr-m_quinto_g_afr);%quinto DAFR ideale
afr_sensore_primo_ciclo5=interp1(Fogliol(1,:),A(501975,9));
%a mio avviso il primo scostamento si ha al camptione 502012
DAFRsens5=(afr_sensore_primo_ciclo5-m_quinto_g_afr);
cost_tau5=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens5/DAFRideale5))));

%medie tau

```

```

tau_m_g_m=((cost_tau1+cost_tau2+cost_tau5)/3);
tau_m_m_g=((cost_tau3+cost_tau4)/2);
tau_m_tot=((cost_tau1+cost_tau2+cost_tau5+cost_tau2+cost_tau3)/5);
%stampo a video tuttti i valori ritenuti utili

%Grafico Scam+Lambda 4o cilindro + confluenza UNIBO

load dati_sonda.mat

disp('Grafico Scam sovrapposto all AFR 4 cil. e AFR confluenza UNIBO')

hold on

plot((A(:,2)/30)+10.3), 'y')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,9)), 'r:')
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,5)), 'b')

title('Grafico Scam sovrapposto all AFR 4 cil. e AFR confluenza UNIBO')
xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')

legend ('Scam', 'AFR', 'Confluenza unibo')

hold off

disp('Premi un tasto per passare al grafico successivo')

pause

clc

clf

%calcolo della costante di tempo sullo step basso

media_cil1=mean(interp1(Fogliol(1,:),A(:,6)));
media_cil2=mean(interp1(Fogliol(1,:),A(:,7)));
media_cil3=mean(interp1(Fogliol(1,:),A(:,8)));
media_cil123=(media_cil1+media_cil2+media_cil3)/3);
DAFRidconf1=(media_cil123-m_p_g_afr);
auxconf1b=interp1(Fogliol(1,:),A(89267,5));
auxconf2b=interp1(Fogliol(1,:),A(89419,5));
DAFRsensconf1=auxconf1b-auxconf2b;
tau_conf1=(-60/(2*rpm*log(1-(DAFRsensconf1/DAFRidconf1))));

```

```

%calcolo della costante di tempo sullo step alto

DAFRidconf2=(m_t_g_afr-media_cil123);
auxconf1a=interp1(Fogliol(1,:),A(292667,5));
auxconf2a=interp1(Fogliol(1,:),A(292814,5));
DAFRsensconf2=auxconf2a-auxconf1a;
tau_conf2=(-60/(2*rpm*log(1-(DAFRsensconf2/DAFRidconf2))));
disp('Premi un tasto per passare al grafico successivo')
pause
clc
clf

%Confluenza DUCATI
load dati_sonda_conD.mat
%Grafico Scam+Lambda 4o cilindro + confluenza DUCATI
disp('Grafico Scam sovrapposto all AFR 4 cil. e AFR confluenza DUCATI')
hold on
plot((A(:,2)/30)+10.3,'y')
load dati_sonda.mat
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,9)),'r:')
load dati_sonda_conD.mat
plot(interp1(Fogliol(1,:),A(:,12)),'b')
title('Grafico Scam e AFR confluenza DUCATI')
xlabel('Campioni')
ylabel('AFR')
legend('Scam','AFR','Confluenza ducati')
hold off
disp('Premi un tasto per passare al grafico successivo')
pause
clc

```

```

clf

%Poichè la caratteristica del controller Ducati presenta troppo rumore
%non è possibile calcolare la costante di tempo con il metodo applicato
%per gli altri controller.

%calcolo rivisto della costante di tempo del sensore sul runner n. 4
%tenendo in considerazione i cicli del sensore.

%primo ciclo primo gradino

DAFRideale1r=((interp1(Fogliol(1,:),A(101810,9)))-m_p_g_afr);
afr_sensore_primo_ciclo1r=interp1(Fogliol(1,:),A(101775,9));
DAFRsens1r=(afr_sensore_primo_ciclo1r-m_p_g_afr);
cost_tau1r=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens1r/DAFRideale1r))));

%secondo ciclo primo gradino

DAFRideale2r=((interp1(Fogliol(1,:),A(102450,9)))-
(interp1(Fogliol(1,:),A(101810,9))));
afr_sensore_primo_ciclo2r=interp1(Fogliol(1,:),A(102104,9));
DAFRsens2r=(afr_sensore_primo_ciclo2r-(interp1(Fogliol(1,:),A(101810,9))));
cost_tau2r=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens2r/DAFRideale2r))));

%terzo ciclo primo gradino

DAFRideale3r=((interp1(Fogliol(1,:),A(103038,9)))-
(interp1(Fogliol(1,:),A(102450,9))));
afr_sensore_primo_ciclo3r=interp1(Fogliol(1,:),A(102770,9));
DAFRsens3r=(afr_sensore_primo_ciclo3r-(interp1(Fogliol(1,:),A(102450,9))));
cost_tau3r=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens3r/DAFRideale3r))));

%primo ciclo secondo gradino

```

```

DAFRideale12r=((interp1(Fogliol(1,:),A(202167,9)))-m_s_g_afr);
afr_sensore_primo_ciclo12r=interp1(Fogliol(1,:),A(201776,9));
DAFRsens12r=(afr_sensore_primo_ciclo12r-m_s_g_afr);
cost_tau12r=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens12r/DAFRideale12r))));

%secondo ciclo secondo gradino

DAFRideale22r=((interp1(Fogliol(1,:),A(202772,9)))-
(interp1(Fogliol(1,:),A(202167,9))));
afr_sensore_primo_ciclo22r=interp1(Fogliol(1,:),A(202434,9));
DAFRsens22r=(afr_sensore_primo_ciclo22r-(interp1(Fogliol(1,:),A(202167,9))));
cost_tau22r=(-60/(rpm*log(1-(DAFRsens22r/DAFRideale22r))));

%terzo ciclo secondo gradino

%il comportamento irregolare avrebbe generato una costante di tempo
%negativa

fprintf('Frequenza di campionamento= %d HZ\r', freq_camp);
fprintf('Numero di campioni= %d\r', n_campioni);
fprintf('Durata campionamento= %d sec\r', t_acquisizione);
fprintf('Numero di campioni per ciclo= %d\r', camp_ciclo);
fprintf('RPM motore= %d\r', rpm);
fprintf('Valore medio primo step (AFR)= %f\r', m_p_g_afr);
fprintf('Valore medio secondo step (AFR)= %f\r', m_s_g_afr);
fprintf('Valore medio terzo step (AFR)= %f\r', m_t_g_afr);
fprintf('Valore medio quarto step (AFR)= %f\r', m_q_g_afr);
fprintf('Valore medio quinto step (AFR)= %f\r', m_quinto_g_afr);
fprintf('Valore medio sesto step (AFR)= %f\r', m_sesto_g_afr);
fprintf('DAFR ideale al primo gradino=%f\r',DAFRideale1);
fprintf('DAFR ideale secondo gradino=%f\r',DAFRideale2);

```

```

fprintf('DAFR ideale terzo gradino=%f\r',DAFRideale3);
fprintf('DAFR ideale quarto gradino=%f\r',DAFRideale4);
fprintf('DAFR ideale quinto gradino=%f\r',DAFRideale5);
fprintf('DAFR del sensore al primo ciclo del primo gradino=%f\r', DAFRsens1);
fprintf('DAFR del sensore al primo ciclo secondo gradino=%f\r', DAFRsens2);
fprintf('DAFR del sensore al primo ciclo terzo gradino=%f\r', DAFRsens3);
fprintf('DAFR del sensore al primo ciclo quarto gradino=%f\r', DAFRsens4);
fprintf('DAFR del sensore al primo ciclo quinto gradino=%f\r', DAFRsens5);
fprintf('Costante di tempo al primo gradino=%f\r',cost_tau1);
fprintf('Costante di tempo al secondo gradino=%f\r',cost_tau2);
fprintf('Costante di tempo al terzo gradino=%f\r',cost_tau3);
fprintf('Costante di tempo al quarto gradino=%f\r',cost_tau4);
fprintf('Costante di tempo al quinto gradino=%f\r',cost_tau5);
fprintf('Costante di tempo media per passare da grasso a magro=%f\r',tau_m_g_m);
fprintf('Costante di tempo media per passare da magro a grasso=%f\r',tau_m_m_g);
fprintf('Costante di tempo media=%f\r',tau_m_tot);

fprintf('Costante di tempo magra del sensore UNIBO alla confluenza=%f\r',
tau_conf1)

fprintf('Costante di tempo grassa del sensore UNIBO alla confluenza=%f\r',
tau_conf2)

fprintf('DAFRideale del sensore sul runner 4 in un ciclo del sensore=%f\r',
DAFRideale1r)

fprintf('DAFRreale del sensore sul runner 4 in un ciclo del sensore=%f\r',
DAFRsens1r)

fprintf('Costante di tempo del sensore UNIBO alla confluenza=%f\r', cost_tau1r)

fprintf('DAFRideale del sensore sul runner 4 al secondo ciclo del primo gradino
del titolo=%f\r', DAFRideale2r)

fprintf('DAFRreale del sensore sul runner 4 al secondo ciclo del primo gradino
del titolo=%f\r', DAFRsens2r)

fprintf('Costante di tempo del sensore UNIBO alla confluenza=%f\r', cost_tau2r)

fprintf('DAFRideale del sensore sul runner 4 al terzo ciclo del primo gradino
del titolo=%f\r', DAFRideale3r)

fprintf('DAFRreale del sensore sul runner 4 al terzo ciclo del primo gradino del
titolo=%f\r', DAFRsens3r)

fprintf('Costante di tempo del sensore UNIBO alla confluenza=%f\r', cost_tau3r)

```

```
fprintf('DAFRideale del sensore sul runner 4 al primo ciclo del secondo gradino  
del titolo=%f\r', DAFRideale12r)  
  
fprintf('DAFRreale del sensore sul runner 4 al primo ciclo del secondo gradino  
del titolo=%f\r', DAFRsens12r)  
  
fprintf('Costante di tempo del sensore UNIBO alla confluenza=%f\r', cost_tau12r)  
  
fprintf('DAFRideale del sensore sul runner 4 al secondo ciclo del secondo  
gradino del titolo=%f\r', DAFRideale22r)  
  
fprintf('DAFRreale del sensore sul runner 4 al secondo ciclo del secondo gradino  
del titolo=%f\r', DAFRsens22r)  
  
fprintf('Costante di tempo del sensore UNIBO alla confluenza=%f\r', cost_tau22r)
```