

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI  
BOLOGNA**

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

***CORSO DI LAUREA***  
**IN INGEGNERIA MECCANICA**  
**Classe LM-33 - INGEGNERIA MECCANICA**

Sede di Forlì

**TESI DI LAUREA in**  
**CONTROLLO DEI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA LM**  
  
**CONTROLLO MULTIPARAMETRO DELLA COMBUSTIONE**

Candidato  
Fabbri Federico

Relatore  
Professor Corti Enrico

Anno Accademico 2011/2012

Sessione III



# Sommario

<b>1. Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>2. Extremum seeking</b>	<b>7</b>
2.1. Algoritmo classico: SISO (Single Input Single Output)	8
2.2. DISO (Dual Input Single Output)	10
<b>3. Esperienza di Donghoon Lee</b>	<b>13</b>
3.1. Schema controllore con Extremum Seeking	14
3.2. Implementazione sul modello di combustione	16
3.3. Implementazione sul motore	19
3.4. Carico costante	19
3.5. Carico sinusoidale	22
<b>4. Influenza dei parametri sulla combustione</b>	<b>27</b>
4.1. La combustione	27
4.2. Anticipo di accensione	27
4.3. Dispersione ciclica	28
4.4. Curva ad ombrello	34
4.5. Detonazione	34
4.6. MAPO	36
4.7. Temperatura dei gas di scarico	38
<b>5. GENERAZIONE DELLE MAPPE</b>	<b>41</b>
5.1. Mappa di MFB50	42
5.2. Mappa temperatura gas di scarico	45
5.3. Mappe per la generazione del MAPO	47
<b>6. MOTORE VIRTUALE</b>	<b>51</b>
6.1. Generazione Pressione Media Indicata (PMI)	51
6.2. Generazione temperatura dei gas di scarico	53
6.3. Generazione di MAPO	53
<b>7. CONTROLLORE 1.0</b>	<b>55</b>
7.1. Generalità sul controllo ottimo	55
7.2. Progetto controllore	56
7.3. Controllore	56
7.4. Funzione di merito	58

7.5.	<i>Controllo sull'anticipo</i> .....	59
7.6.	<i>Controllo su AFR</i> .....	61
7.7.	<i>Controllo sul MAPO</i> .....	61
<b>8.</b>	<b>Simulazioni controllore 1.0</b> .....	<b>63</b>
8.1.	<i>Scelta dei parametri del controllore</i> .....	63
8.2.	<i>Prova 1: delta anticipo iniziale e AFR iniziale bassi</i> .....	65
8.3.	<i>Prova 2: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale basso</i> .....	70
8.4.	<i>Prova 3: delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto</i> .....	75
8.5.	<i>Prova 4: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto</i> .....	79
8.6.	<i>Considerazioni finali</i> .....	86
<b>9.</b>	<b>CONTROLLORE 1.1</b> .....	<b>87</b>
<b>10.</b>	<b>Simulazioni controllore 1.1</b> .....	<b>89</b>
10.1.	<i>Prova 1: delta anticipo iniziale e AFR iniziale bassi</i> .....	89
10.2.	<i>Prova 2: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale basso</i> .....	92
10.3.	<i>Prova 3: delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto</i> .....	96
10.4.	<i>Prova 4: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto</i> .....	99
10.5.	<i>Considerazioni finali</i> .....	103
<b>11.</b>	<b>Sala prove</b> .....	<b>105</b>
11.1.	<i>Motore</i> .....	105
11.1.1.	<i>Caratteristiche tecniche</i> .....	105
11.1.2.	<i>Lista Sensori</i> .....	106
11.2.	<i>Freno a correnti parassite</i> .....	106
11.3.	<i>Impianto di raffreddamento</i> .....	107
11.4.	<i>Impianto di alimentazione benzina</i> .....	108
11.5.	<i>Impianto di spirazione dei gas di scarico</i> .....	108
11.6.	<i>Ventilatore centrifugo</i> .....	109
11.6.	<i>Controllo banco</i> .....	109
11.6.1.	<i>Schema concettuale</i> .....	109
11.6.2.	<i>Compact-RIO</i> .....	110
11.6.3.	<i>PXI-8186</i> .....	111
11.6.4.	<i>OBI-1</i> .....	113
<b>12.</b>	<b>Campagna acquisizione dati</b> .....	<b>115</b>
12.1.	<i>Punti motore</i> .....	115
12.2.	<i>Generazione delle mappe</i> .....	117
12.3.	<i>Mappa MFB50 medio e sua deviazione standard</i> .....	117

12.4.	<i>Mappa PMI</i> .....	120
12.5.	<i>Mappa temperatura gas di scarico</i> .....	121
12.6.	<i>Mappe per la generazione di MAPO</i> .....	122
<b>13.</b>	<b>Simulazioni controllore 1.0 dati GSXR</b> .....	<b>125</b>
13.1.	<i>Prova 1: delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto</i> .....	125
13.2.	<i>Prova 2: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto</i> .....	128
13.3.	<i>Considerazioni finali</i> .....	132
<b>14.</b>	<b>Simulazioni controllore 1.1 dati GSXR</b> .....	<b>133</b>
14.1.	<i>Prova 1: delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto</i> .....	133
14.2.	<i>Prova 2: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto</i> .....	137
14.3.	<i>Considerazioni finali</i> .....	141
<b>15.</b>	<b>Conclusioni</b> .....	<b>143</b>
<b>A.</b>	<b>Appendice 1: trasformata finita di Fourier</b> .....	<b>145</b>
<b>B.</b>	<b>Appendice 2: script Matlab</b> .....	<b>147</b>
a)	<i>Controllore 1.0 dati 1200 FIRE</i> .....	147
b)	<i>Controllore 1.1 dati 1200 FIRE</i> .....	151
c)	<i>Controllore 1.0 dati GSXR</i> .....	155
d)	<i>Controllore 1.1 dati GSXR</i> .....	159
	<b>Bibliografia</b> .....	<b>163</b>



# 1.Introduzione

Oggi giorno i sistemi di controllo motore non sono solamente complessi, ma spesso il processo di calibrazione deve trattare molti obiettivi che spesso sono in conflitto tra di loro. Questa operazione implica eseguire molte iterazioni e comparare gli effetti che i vari scenari hanno sulle prestazioni del sistema.

Perciò uno strumento specificatamente sviluppato per razionalizzare questi tempi aumenta l'efficienza del processo di calibrazione e la produttività. Ciò permette al produttore di diminuire il time to market e aumentare la qualità del sistema siccome più tempo e risorse possono essere allocate per test aggiuntivi.

Il sistema di controllo è composto da molti componenti base, questi fanno tutti riferimento alla ECU (Electronic Control Unit). La ECU è il cervello elettronico: riceve i segnali di grandezze provenienti dal mondo fisico ed elabora le attuazioni da eseguire sul sistema per far fronte alle richieste del guidatore.

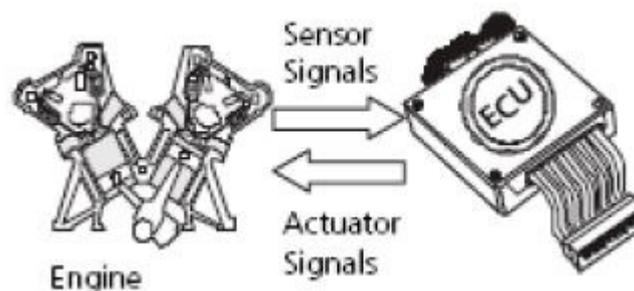


Figura 1-1 Sistema di controllo motore base [6]

L'insieme di questi tre componenti può dar luogo sia a sistemi di controllo in loop-chiuso che in loop-aperto, in funzione delle applicazioni e delle richieste. L'acquisizione dei segnali può essere effettuata per mezzo di sensori che sono dislocati in diversi punti del motore e forniscono al calcolatore le informazioni necessarie.

In un sistema di regolazione in loop-chiuso il calcolatore effettua un confronto con dati memorizzati o con valori di riferimento calcolati mediante i segnali provenienti da altri sensori e quindi invia un segnale ad un attuatore, il quale reagisce al segnale elettrico proveniente dal calcolatore ed esegue l'azione richiesta al fine di correggere la differenza tra la quantità rilevata dal sensore e il valore di riferimento.

Un sistema di controllo in loop-chiuso è un sistema in retroazione dato che il segnale proveniente da un sensore è usato dal calcolatore per controllare tramite l'attuatore la variabile che è stata misurata. Al contrario, in un sistema di controllo in loop-aperto, l'azione dell'attuatore non è influenzata dalla misura effettuata sulla variabile controllata. Uno schema di controllo in loop-chiuso ha chiaramente le potenzialità per incrementare le prestazioni di un motore e per ridurre il lavoro necessario per la calibrazione, tuttavia richiede l'utilizzo di sensori che devono essere capaci di misurare direttamente gli effetti del controllo e fornire quindi un'informazione in base alla quale reimpostare le condizioni di massimo rendimento, o minime emissioni.

Nelle applicazioni motoristiche un buon sistema potrebbe prevedere l'utilizzo del controllo in loop-chiuso e di una mappa di riferimento (una sorta di supporto che raccoglie delle impostazioni ricavate da prove al banco che di volta in volta vengono lette dalla centralina) necessaria per aumentare la prontezza del sistema.

Un sistema alternativo potrebbe prevedere l'utilizzo del controllo in loop chiuso in tutte le condizioni operative comprese il funzionamento al minimo o a freddo, condizioni nelle quali si punta ad ottenere il riscaldamento rapido del motore o il mantenimento del regime di minimo con la massima efficienza. In quest'ultimo caso l'utilizzo di una mappa di riferimento servirebbe ad assicurare una buona gestione dei parametri anche in caso di rottura dei sensori.

## 2. Extremum seeking

Extremum seeking control (ESC), è un popolare strumento utilizzato nei controlli automatici; gli studi su questa tecnica iniziarono negli anni '40, ma solo dagli anni '90 quando le potenze di calcolo lo hanno permesso si è potuto applicarlo con successo nelle ottimizzazioni effettuate in tempo reale.

ES è un metodo di controllo adattativo non basato su modelli, e come tale è un'ottima alternativa ai controlli che ricorrono a reti neurali. E' proprio la peculiarità di non essere basato su modelli che ha risvegliato l'interesse nei suoi confronti negli ultimi vent'anni: le recenti applicazioni nella fluidodinamica, combustione, sistemi biomedicali tutti caratterizzati da modelli complessi e, a volte, inaffidabili.

ES è applicabile in sistemi non lineari e la non linearità ha minimi e massimi locali. Questa tecnica si può utilizzare sia per impostare i parametri di controllo per raggiungere l'ottimo dell'uscita, sia per impostare i parametri di una legge di feedback.

Extremum seeking control (ESC) è un metodo adattativo di controllo in closed loop. Mentre la maggior parte dei controlli adattativi possono solo essere utilizzati per la regolazione delle variabili di controllo per un determinato punto di funzionamento, ESC trova gli ingressi del controllore che massimizzano una funzione di merito.

Il metodo tradizionale per i controlli adattativi per sistemi lineari e non lineari è applicabile solo per la regolazione di punti di funzionamento noti. In molte applicazioni, la mappa input-output ha un massimo (minimo) assoluto e l'obiettivo è determinare il set point dei parametri di controllo per portare l'uscita al valore massimo (minimo).

Il metodo con perturbazione sinusoidale è il più popolare per l'extremum-seeking. Infatti è l'unico metodo che permette un adattamento veloce e permette di evitare metodi numerici da calibrare prima della ottimizzazione.

La stima del gradiente della funzione che vuole essere massimizzata sta alla base di questa tecnica.

## 2.1. Algoritmo classico: SISO (Single Input Single Output)

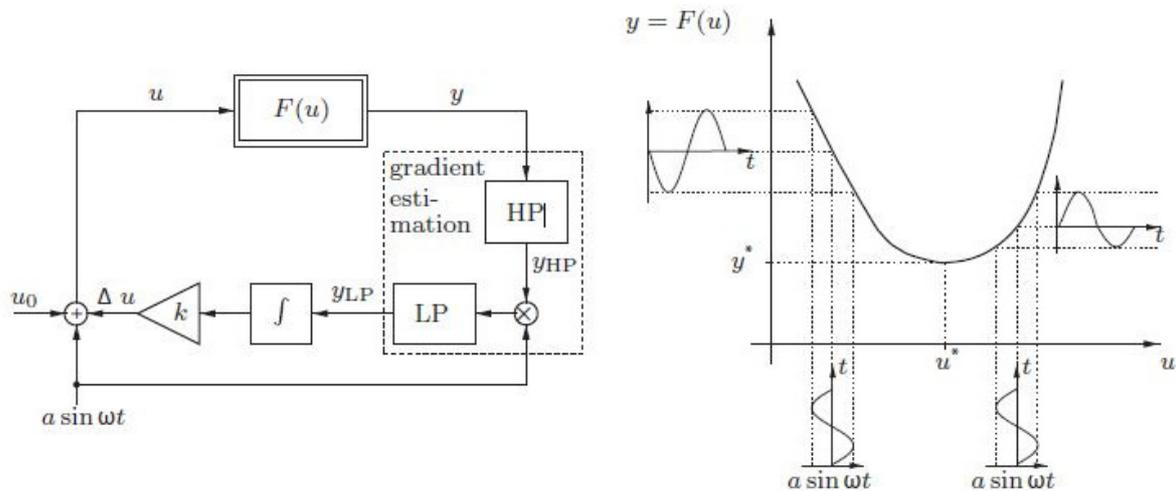


Figura 2-1 Diagramma a blocchi di un sistema SISO con feedback basato su extremum seeking [5]

L'obiettivo dell'algoritmo è trovare la variabile di controllo  $u^*$  che genera il minimo valore stazionario di output  $y^*$  senza conoscere la relazione  $y = F(u)$ . Per fare questo ci si serve di un estimatore del gradiente  $F' = dF/du$ .

Per ottenere informazioni su di esso la variabile di input oscilla sinusoidalmente con una piccola ampiezza a frequenza nota  $a \sin(\omega t)$ , inoltre si suppone che il sistema sia statico, cioè la più grande costante di tempo degli apparati per il controllo è minore del periodo di oscillazione. Con queste ipotesi una perturbazione sinusoidale sull'input si ripercuote come una risposta approssimativamente sinusoidale inizialmente oscillante attorno  $y_0 = F(u_0)$ :

$$y(t) \approx y_0 + F' a \sin(\omega t)$$

L'output viene filtrato passa alto e si rimuove il valor medio ma non l'oscillazione della perturbazione

$$y_{HP}(t) \approx |G_{HP}| F' a \sin(\omega t + \phi_{HP})$$

L'informazione sul gradiente  $F'$  si ottiene moltiplicando questo segnale a valor medio nullo con la perturbazione eseguendo una demodulazione cioè il ripristino sul segnale della modulante delle caratteristiche d'origine che nel nostro caso è  $F'$ . A destra del minimo input e output sono in fase, e quindi il prodotto sarà positivo, indicando una pendenza positiva; viceversa a sinistra del minimo input e output sono controfase, il prodotto sarà negativo, indicando una poendenza negativa.

$$y_{demod}(t) = y_{HP}(t) a \sin(\omega t) \approx |G_{HP}| F' a^2/2 (\cos(\phi_{HP}) - \cos(2\omega t + \phi_{HP}))$$

Questo segnale contiene una componente costante e una tempo-variabile con frequenza doppia rispetto alla frequenza della perturbazione; il filtro passa basso elimina la componente a frequenza elevata

$$y_{LP}(t) = |G_{HP}| F' a^2/2 \cos(\phi_{HP})$$

Si ottiene che l'uscita del filtro è proporzionale al gradiente locale  $F'$  e il segno dipende dalla fase. Il segnale viene integrato e moltiplicato per una costante di guadagno: nella ricerca del minimo è usata una costante negativa. Il valore iniziale  $u_0$  deve essere scelto in modo che l'algoritmo parta da una zona sensibile della mappa. Se l'algoritmo parte da destra  $\Delta u$  cresce, viceversa decresce nel seguente modo

$$u(t) = \Delta u(t) + u_0 + a \sin(\omega t) \text{ muovendosi verso il minimo.}$$

In molte applicazioni delle parti del sistema da controllare sottostanno a leggi dinamiche, cioè si introducono dei ritardi; questo significa che si avrà uno sfasamento tra la perturbazione sinusoidale e l'output. Se però la perturbazione è lenta rispetto alla maggiore delle costanti di tempo del sistema questo ritardo è piccolo e si può trattare il problema come se fosse statico.

Le frequenze di taglio del filtro passa alto e passa basso devono essere più basse di  $\omega$ ; pertanto il controllo contiene una costante di tempo lenta, una media e una veloce che corrispondono rispettivamente alla dinamica del sistema, la perturbazione periodica e i filtri.

La velocità di convergenza dell'algoritmo dipende direttamente dalla frequenza del disturbo e perciò è limitata. Inoltre, siccome ES è basato sulla stima del gradiente il controllo può convergere in minimi/massimi locali; questo inconveniente può essere bypassato utilizzando ampiezza della perturbazione elevata che permette di "sondare" un campo più ampio della funzione incognita. D'altra parte però una grande ampiezza fa sì che la funzione oscilli troppo durante la ricerca del massimo/minimo, e ciò può non essere accettabile.

Per compensare la dinamica di alcune parti del sistema e velocizzare la convergenza dell'algoritmo si può utilizzare per la demodulazione un segnale sinusoidale sfasato. Il ritardo di fase rispetto alla perturbazione può essere scelto grande come lo sfasamento che il sistema induce alla frequenza del disturbo. Risultati simili possono essere ottenuti utilizzando il filtro passa alto del controllore per compensare lo sfasamento introdotto dai blocchi del sistema.

L'ottimizzazione del blocco che stima il gradiente della funzione migliora le performance di ESC.

## 2.2. DISO (Dual Input Single Output)

Il principio che sta alla base di ES per sistemi DISO è simile a quello per i sistemi SISO. Entrambi gli input sono sommati ad un disturbo, dopo di che un blocco stima i gradienti  $\frac{\partial F}{\partial u_1}$  e  $\frac{\partial F}{\partial u_2}$ . Ogni gradiente comanda un integratore che porta il  $u_1$  e  $u_2$  verso il valore ottimale.

Se è disponibile un solo output per la stima di due gradienti è necessaria una separazione del disturbo sugli input, la separazione può essere fatta sia sulla frequenza sia sulla fase. La separazione sulla frequenza ha lo svantaggio di rallentare la convergenza dell'algoritmo. La massima frequenza della perturbazione dipende dalla dinamica più lenta tra tutti i blocchi del sistema. Se un loop gira con la massima frequenza del disturbo e l'altro con una frazione di quest'ultima la velocità di convergenza dipenderà dalla frequenza minore.

Se si opta per la separazione di fase, i due segnali possono essere perturbati con la stessa frequenza, il primo con una senoide e il secondo con una cosenoide; sfortunatamente però non esistono sfasamenti che permettano una netta separazione a parte 90°. Per questo motivo solo due segnali possono essere separati con la fase.

La fase di calibrazione di un motore è un'operazione che richiede molte ore di simulazione e prove al banco. Inoltre se non è disponibile un modello del sistema, il ricorso al banco prove è l'unica strada percorribile. Quello che si vuole proporre in questo lavoro di tesi è un algoritmo di calibrazione e controllo real-time non basato su modelli.

La conoscenza delle mappe delle leve di controllo di un motore ad accensione comandata (anticipo di accensione, massa di combustibile iniettata) in funzione di altri parametri che sono tanto maggiori quanto più sofisticato vuole essere il controllo presuppone una profonda conoscenza del propulsore che è possibile ottenere o con l'uso di modelli matematici dello stesso o con lunghe prove al banco.

Un modello di ottimizzazione non basato su mappe come l'extremum seeking (ES) è un processo iterativo di ottimizzazione che è possibile eseguire in tempo reale su un sistema fisico in condizioni stazionarie. L'algoritmo, non conoscendo a priori il rapporto che intercorre tra le variabili di input e di output, si basa solo sulla misura di una funzione di merito per raggiungere l'ottimo. Partendo da valori iniziali dei parametri (anticipo di accensione e rapporto aria combustibile) ed attuando una perturbazione su di essi, verifica la risposta della funzione di merito e tale variazione, modificando infine il valore di tali parametri per ottimizzare le prestazioni del sistema.

Sfortunatamente il controllo ES necessita di molto tempo per convergere, per questo motivo è utilizzato per condizioni stazionarie. Condizioni stazionarie che usualmente è possibile riscontrare nell'utilizzo dei veicoli per trasporto passeggeri. Infatti nella guida di tutti i giorni il guidatore una volta impostata una velocità la mantiene solitamente per un tempo sufficientemente lungo per permettere al controllore di convergere.



### 3. Esperienza di Donghoon Lee

Questo autore propone un controllore On-Board che permette di impostare i parametri ottimali per anticipo di accensione e VVT (Variable Valve Timing) attraverso la tecnica dell'Extremum Seeking (SE); in particolare, il suo obiettivo è quello di diminuire il consumo specifico (NSFC Net Specific Fuel Consumption) e la produzione di NOx.

L'EGR interno (determinato con il VVT) riduce gli NOx in quanto nella miscela sono presenti una certa quantità di inerti che abbassano la temperatura di combustione; d'altra parte, una diluizione troppo elevata della carica fresca aumenta la dispersione ciclica (aumentando il consumo specifico).

Per ogni punto di funzionamento del motore esiste un set point ottimale di VVT che massimizza l'efficienza della combustione e per ogni set di VVT esiste un anticipo di accensione ottimale.

L'autore in primo luogo ha sviluppato un modello di combustione che simula il comportamento del motore, generando valori di 50% di massa bruciata (MFB50) e la pressione media effettiva netta (NMEP) per ogni anticipo e valore di VVT, sul quale ha implementato il controllo via ES.

Il modello della combustione ha permesso di ricavare delle mappe di consumo medio specifico netto (NSFC) e NMEP; queste mappe mostrano che esiste una combinazione di anticipo e VVT che minimizzano il primo parametro e massimizzano il secondo.

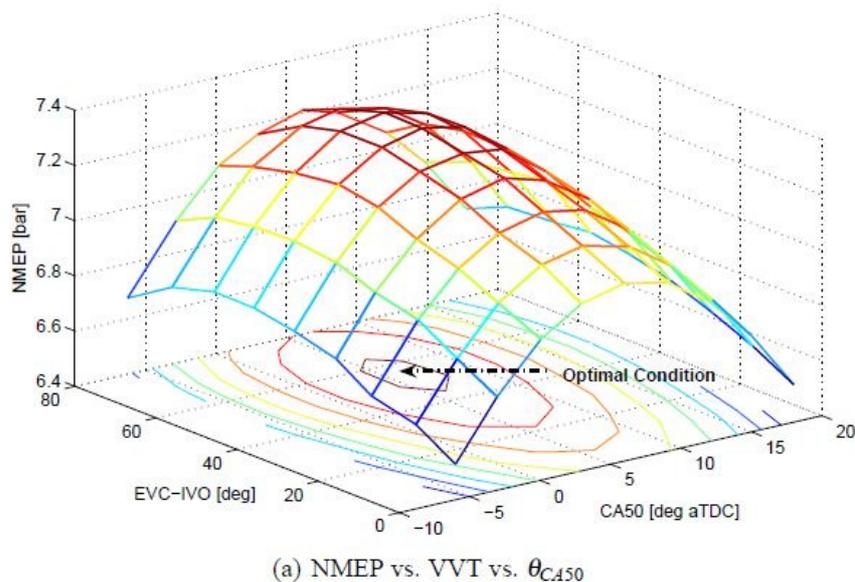


Figura 3-1 pressione media effettiva netta stimata al variare di VVT e fase combustione [4]

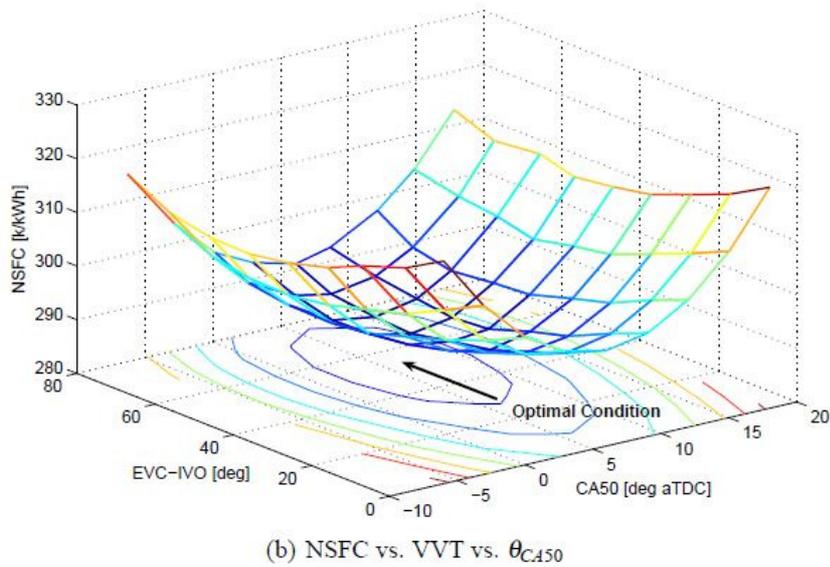


Figura 3-2 consumo specifico stimato al variare di VVT e fase combustione [4]

Il secondo passo è stato introdurre nel modello la natura stocastica della combustione partendo da dati misurati. Nel modello la variabilità di MFB50 ( $\sigma_{CA50}$ ) dipende solo dalla frazione di gas residui ( $x_{RG}$ ).

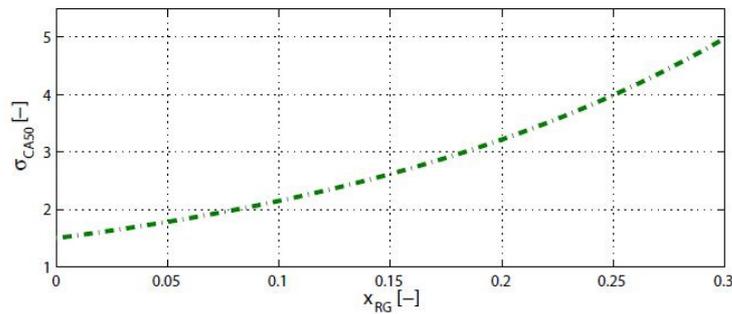


Figura 3-3 deviazione standard della fase di combustione in funzione della frazione di gas residui nel cilindro [4]

### 3.1. Schema controllore con Extremum Seeking

ES è un algoritmo per la ricerca dell'ottimo non basato su modelli, la sua logica prevede di perturbare le leve di controllo ed aggiustarle fin tanto che non si notano dei miglioramenti sulla funzione di output. Sfortunatamente questa tecnica richiede tempo per convergere ma l'obiezione che fa Lee è che durante l'uso quotidiano di una vettura il motore rimane per lungo tempo in condizioni stazionarie.

Il controllo proposto prevede una correzione continua delle mappe di anticipo e VVT implementate in centralina partendo dal segnale di pressione in camera.

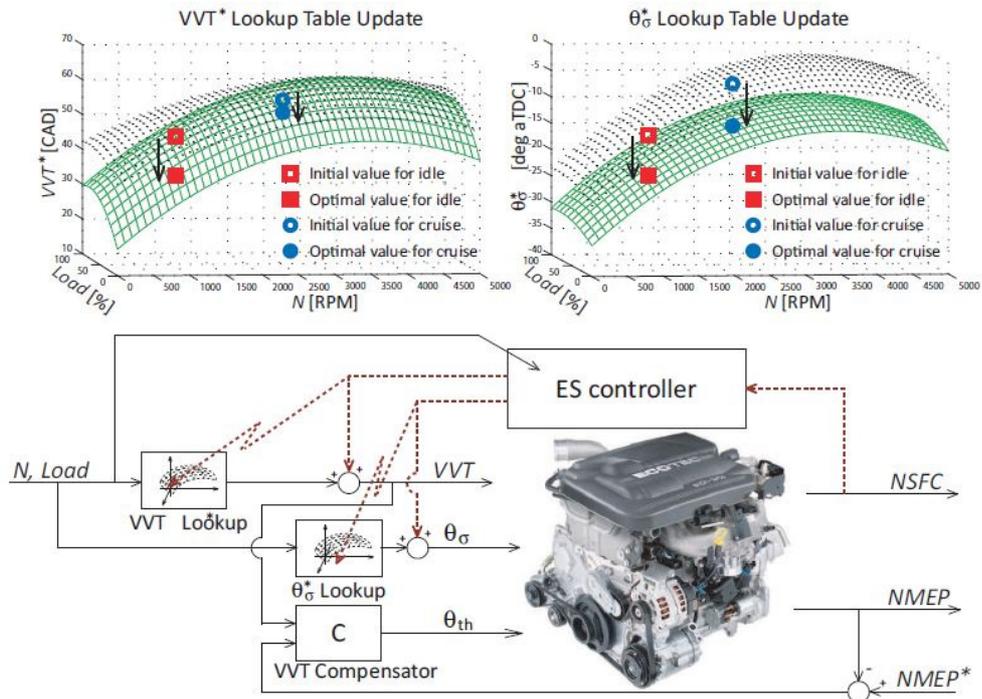


Figura 3-4 schema del calibratore on-board con mappe adattive [4]

Il controllore ES utilizza una eccitazione sinusoidale per selezionare i valori di anticipo e VVT che minimizzano la funzione di costo NSFC, e come si nota dalle figure precedenti, minimizzare il consumo comporta massimizzare la pressione media effettiva netta.

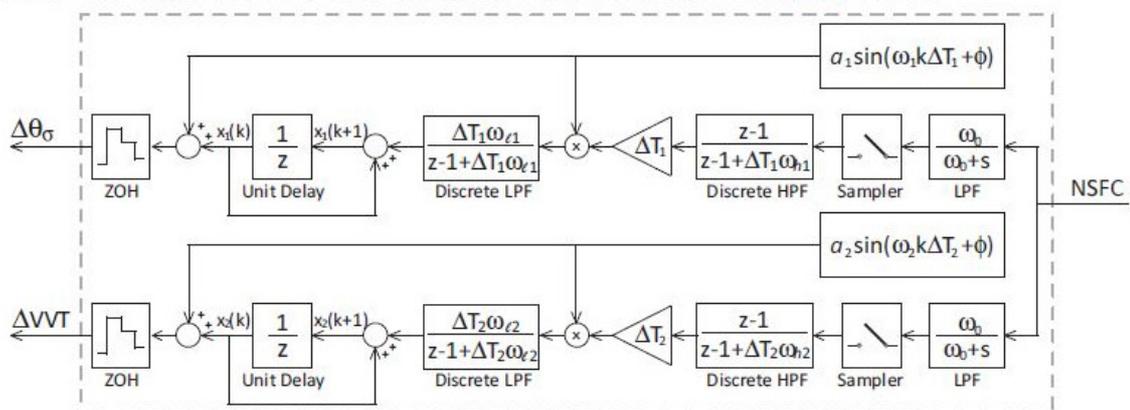


Figura 3-5 controllore di anticipo e VVT con tecnica extremum seeking [4]

NSFC viene filtrato passa basso con frequenza di taglio  $\omega_0 = 2\text{Hz}$  (equivalente a 0.5 secondi o 100/6 cicli motore a 2000rpm), campionato 30 volte a ciclo per il controllo sull'anticipo e 60 volte a ciclo per il controllo su VVT. Il filtro passa alto elimina la componente media di NSFC in modo da poter ricavare l'informazione sul gradiente all'anticipo e VVT attuali. Il segnale viene poi moltiplicato per la perturbazione sinusoidale e filtrato passa basso per estrarre la componente media.

Le frequenze delle perturbazioni devono essere più grandi della dinamica del sistema in modo da poter considerare il problema come statico. L'ampiezza della perturbazione da un lato influenza direttamente la velocità di convergenza dell'algoritmo, dall'altro ampiezze troppo elevate introducono variazioni di coppia indesiderate.

La frequenza di taglio del primo filtro passa basso ha il compito di isolare il valore nominale di NSFC, quindi deve eliminare il rumore di misura. Allo stesso tempo deve essere maggiore della frequenza di oscillazione della perturbazione.

Le frequenze dei seguenti filtri passa alto e passa basso sono legate con la frequenza della perturbazione: la frequenza di taglio del primo deve far passare la perturbazione, il secondo la deve attenuare.

I guadagni sono selezionati in base alla velocità del motore.

### **3.2. Implementazione sul modello di combustione**

Dapprima i controllori di anticipo e VVT sono stati testati separatamente sul modello di combustione alla velocità di 2000 rpm: nella prima prova l'anticipo viene ritardato di  $15^\circ$  e VVT attua un incrocio costante di  $48^\circ$ , nella seconda prova l'anticipo è costante a  $28^\circ$  e VVT parte da un incrocio valvole di  $0^\circ$ . Le simulazioni mostrano che l'anticipo converge in circa 20 secondi e VVT in circa 45 secondi: quest'ultimo è più lento perchè la frequenza di campionamento è minore. Il segnale filtrato di NSFC mostra che la sua variazione non è significativa una volta che le due grandezze convergono.

Il controllore ES viene eseguito contemporaneamente sulle due leve di controllo. Sono stati scelti due valori di VVT iniziale, uno senza incrocio e uno con un grande angolo di incrocio ( $70^\circ$ ); l'anticipo iniziale viene imposto a  $15^\circ$ . Anticipo e VVT impiegano rispettivamente circa 20 e 54 secondi per convergere al valore ottimale.

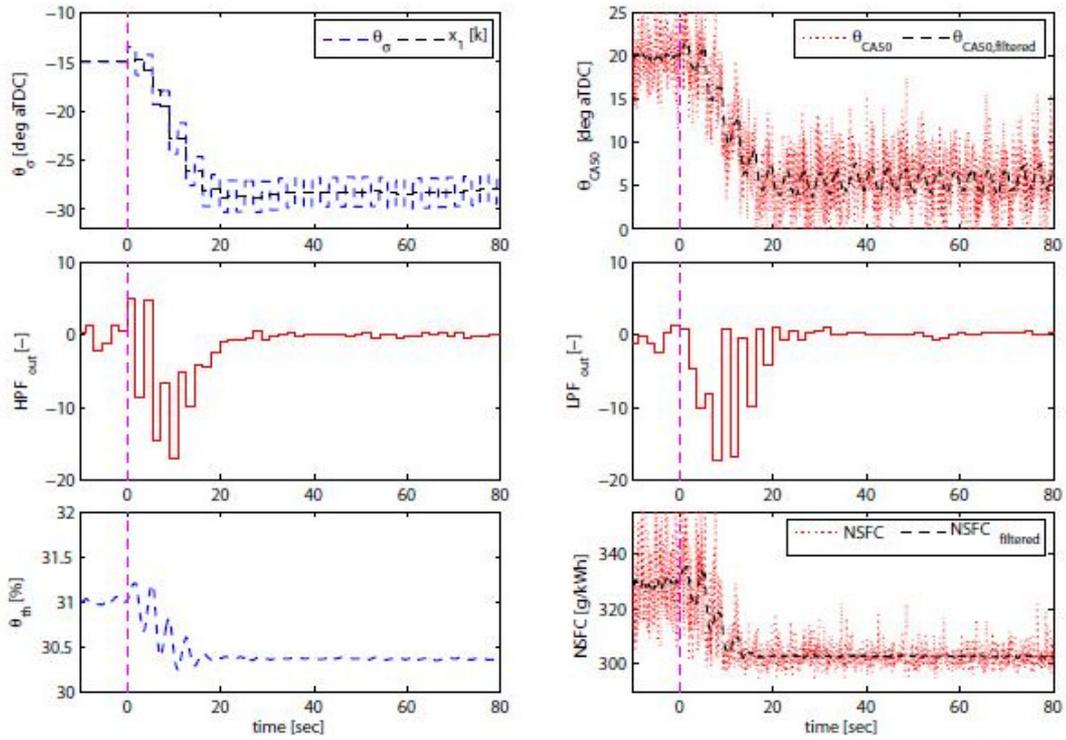


Figura 3-6 extremum seeking per l'anticipo con condizioni iniziali di  $-15^\circ$  aTDC e incrocio VVT fisso a  $48^\circ$  [4]

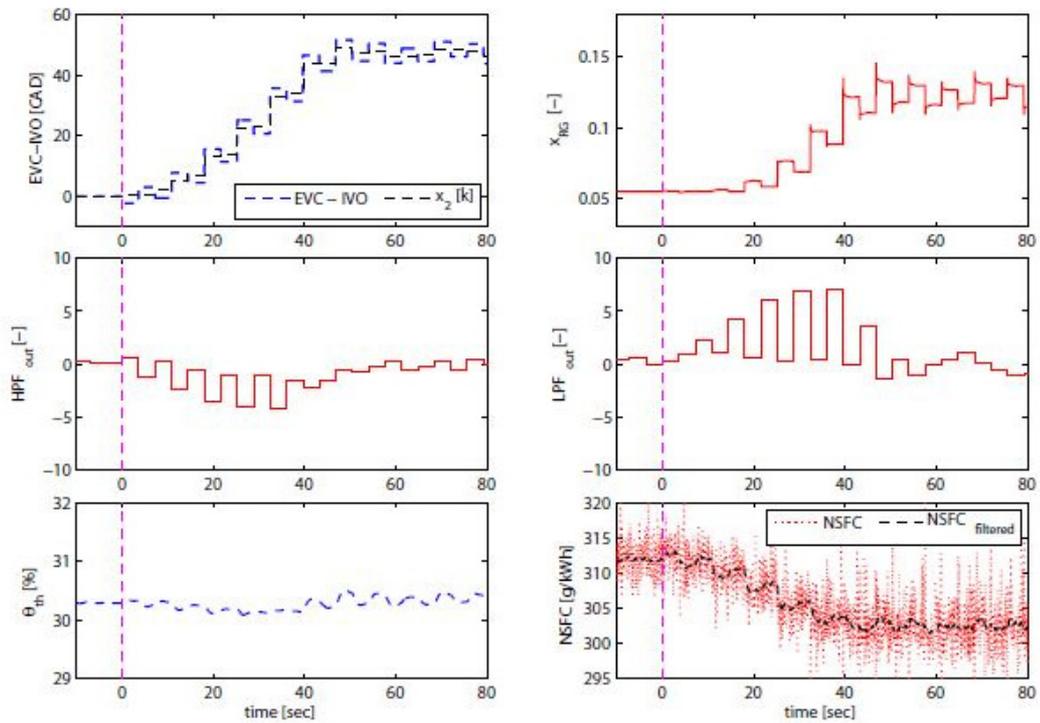


Figura 3-7 extremum seeking per VVT con incrocio iniziale di  $0^\circ$  e anticipo fisso a  $-28^\circ$  aTDC [4]

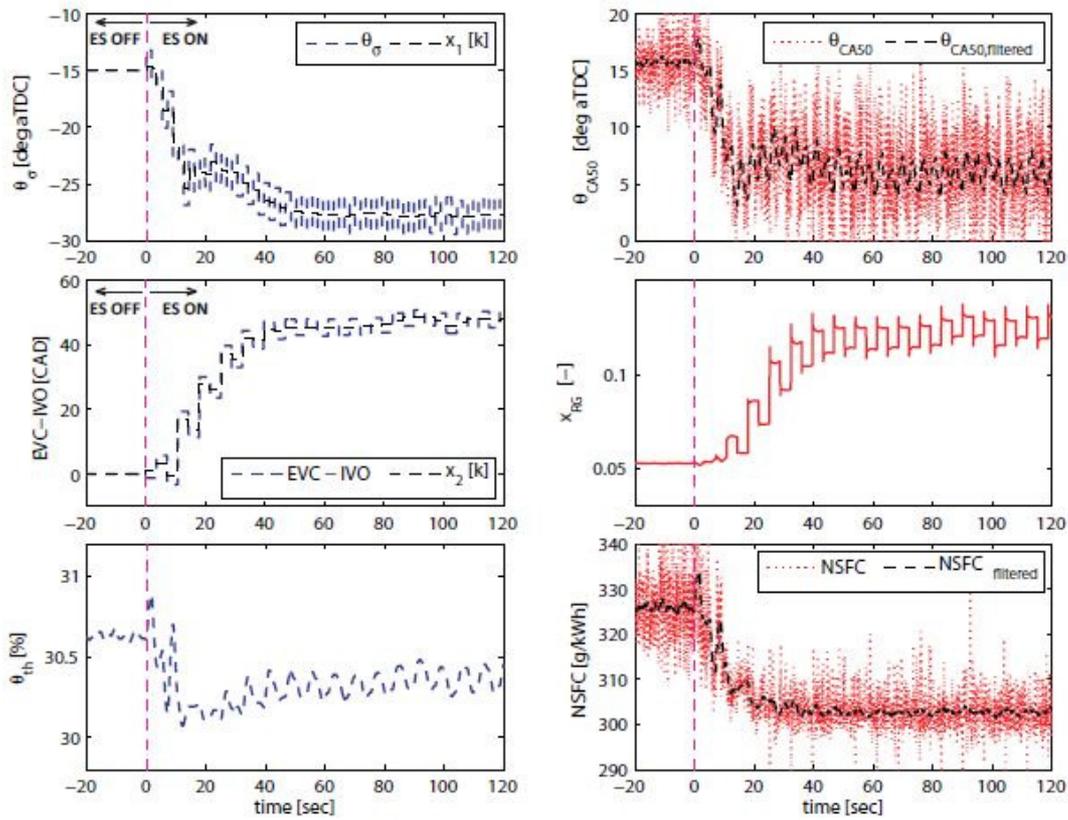


Figura 3-8 extremum seeking per anticipo e VVT con valori iniziali di  $-15^\circ$  aTDC e incrocio  $0^\circ$  [4]

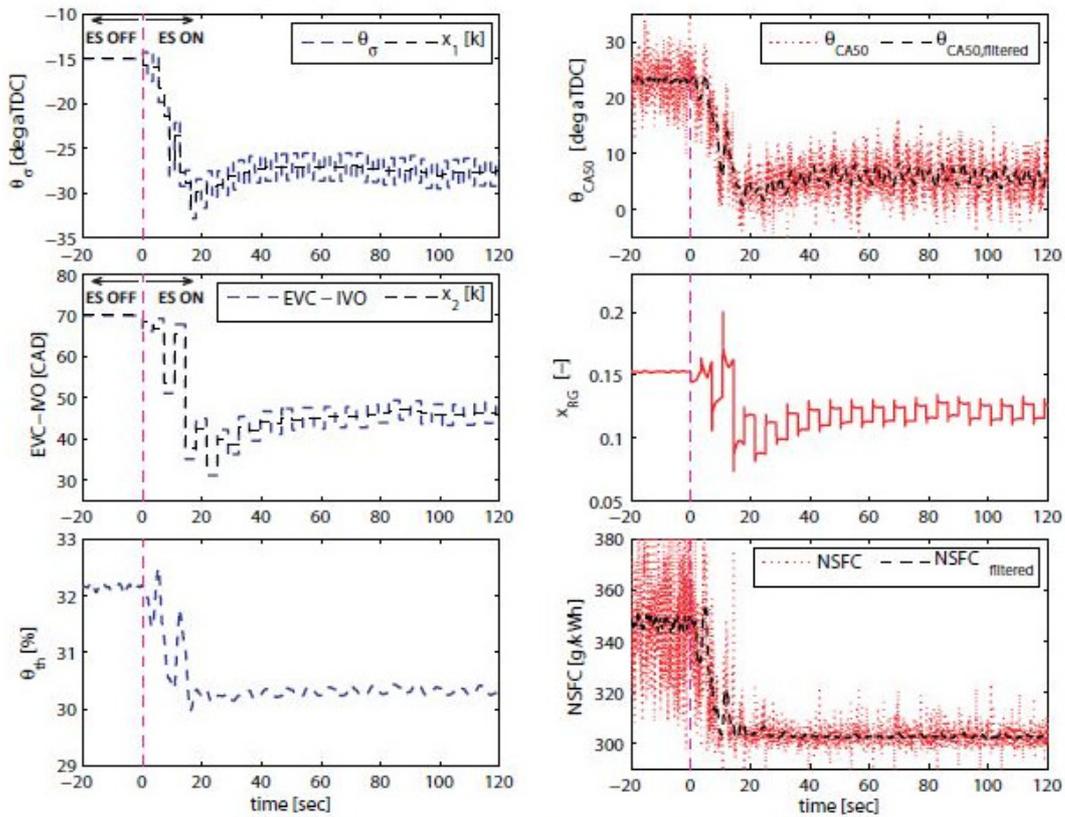


Figura 3-9 extremum seeking per anticipo e VVT con valori iniziali di  $-15^\circ$  aTDC e incrocio  $70^\circ$  [4]

### 3.3. Implementazione sul motore

Lo studio del motore usato per la sperimentazione ha mostrato che il consumo medio specifico in normali condizioni di utilizzo non beneficia di un incrocio significativo delle valvole; per questa ragione Lee ha deciso di implementare il controllore ES solo sull'anticipo di accensione.

### 3.4. Carico costante

Il controllore è stato testato per due differenti velocità e due differenti carichi. Per ogni velocità e carico, l'anticipo nominale viene perturbato con tre offset differenti rispetto al valore ottimo caricato nella ECU.

Engine speed $N$ [RPM]	Relative Load [%]	Spark timing offset $\Delta\theta_{\sigma,0}$ [CAD]	Fuel [-]
1500	50	+6, +9, +12	E70
2000	50	+12, +9, +6	E85
	70	+12, +9, +6	E70

Tabella 3-1 condizioni operative del motore per il controllo con extremum seeking [4]

Il controllore inizia a cercare l'anticipo ottimale solo quando il motore raggiunge certi valori di velocità e carico. Quando la variazione comandata dell'anticipo non varia per un numero predefinito di periodi dell'eccitazione, la perturbazione viene spenta e quindi l'anticipo viene mantenuto costante.

La prima prova è stata fatta a 2000rpm, carico 70% e delta anticipo iniziale rispetto a mappa ( $\Delta\theta_{\sigma 0}$ ) a  $12^\circ$ . Il carico relativo (RL [%]) viene perturbato al secondo 45, 75, 105 e 140 per uscire dall'algoritmo ES. Quando si ritorna in condizioni di carico in cui ES deve funzionare, il sistema, grazie ad una memoria in cui vengono scritti gli ultimi valori attuati, converge velocemente.

Per le cinque prove il consumo specifico (NSFC) converge a 196 g/kWh, gli anticipi ottimali sono rispettivamente  $-23.75^\circ$ ,  $-22.75^\circ$ ,  $-23.5^\circ$ ,  $-21.25^\circ$  e  $-22.75^\circ$  (media di  $-22.75^\circ$ ) che forniscono un MFB50 medio di  $6^\circ$ .

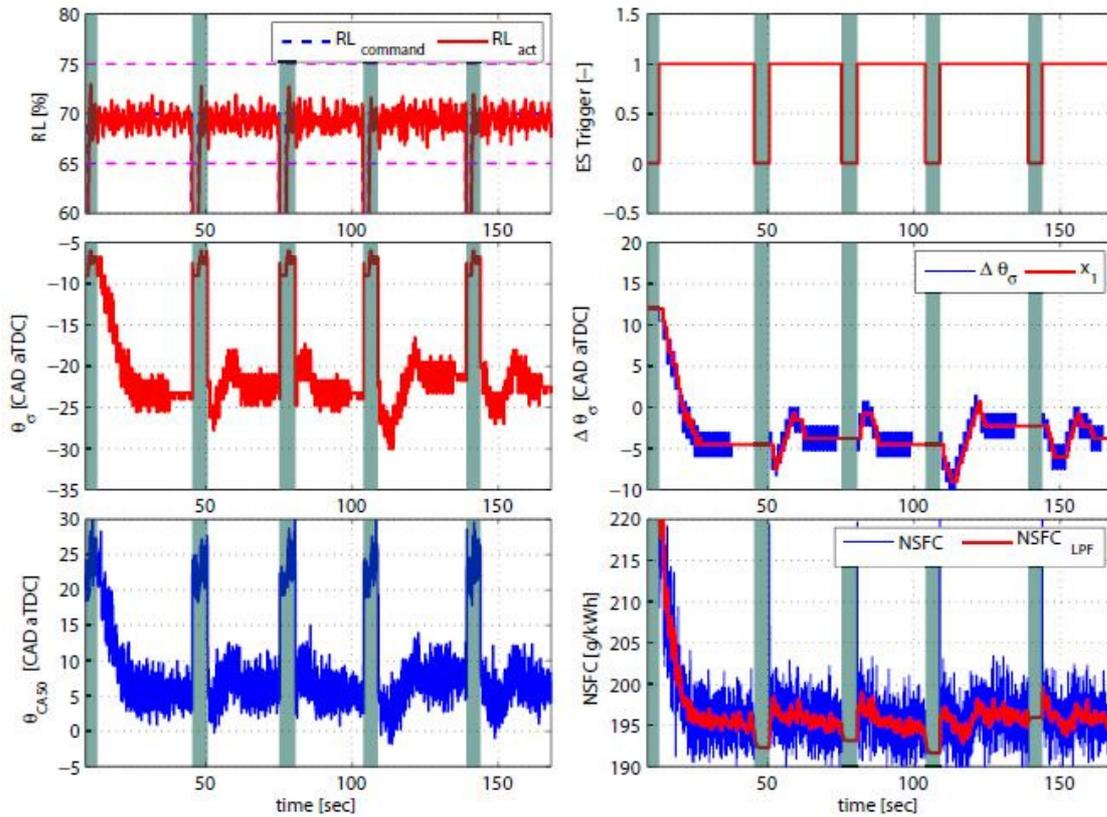


Figura 3-10 risultati a 2000rpm, carico 70% e delta anticipo iniziale 12° [4]

La seconda prova è stata fatta a 2000rpm, carico 70% e delta anticipo iniziale rispetto a mappa ( $\Delta\theta_{\sigma 0}$ ) a 9°. Per le cinque prove NSFC converge a 195 g/kWh, gli anticipi ottimali sono rispettivamente -23.75°, -22.75°, -21.25°, -25.0° e -25.0° (media di -23.5°) che forniscono un MFB50 medio di 5.5°.

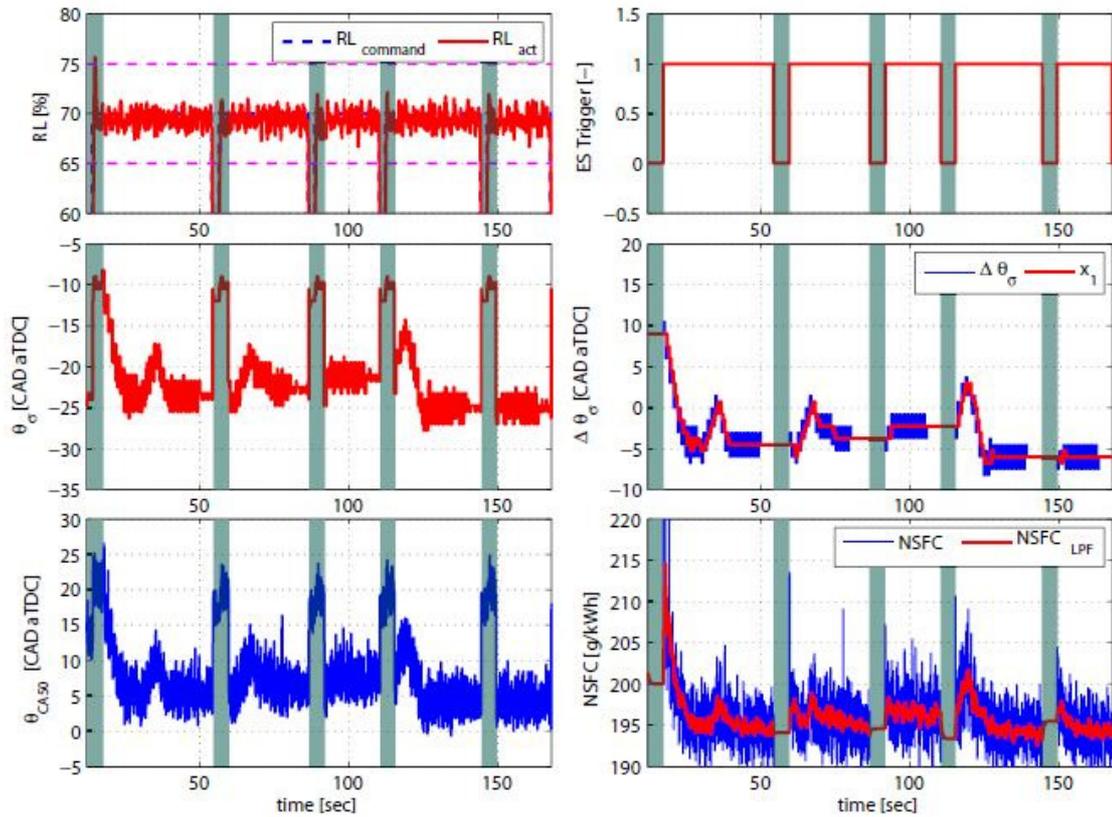


Figura 3-11 risultati a 2000rpm, carico 70% e delta anticipo iniziale 9° [4]

Infine la terza prova è stata fatta a 2000rpm, carico 70% e delta anticipo iniziale rispetto a mappa ( $\Delta \theta_{\sigma 0}$ ) a 6°. Per le cinque prove NSFC converge a 195 g/kWh, gli anticipi ottimali sono rispettivamente -25.0°, -22.0°, -21.25°, -27.25° e -23.5°.

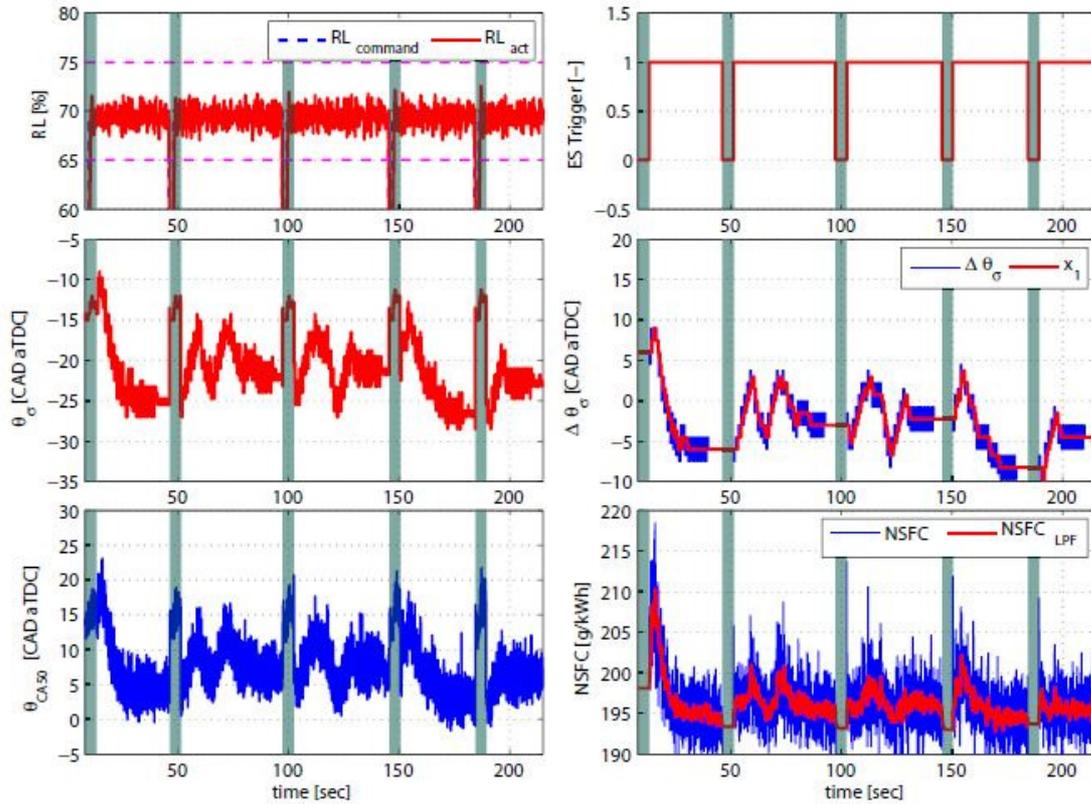


Figura 3-12 risultati a 2000rpm, carico 70% e delta anticipo iniziale 6° [4]

In generale, per tutte le prove, il controllore impiega circa 20 secondi per convergere al valore ottimale di anticipo.

### 3.5. Carico sinusoidale

Il controllore è stato testato anche in condizioni di carico variabile nel tempo. Questa variazione sinusoidale è stata implementata attraverso un attuatore sulla farfalla, la miscela viene mantenuta al valore stechiometrico.

La prima prova è stata fatta impostando un carico sinusoidale con valore medio  $RL = 50\%$  ampiezza  $3\%$ , frequenza  $0.01\text{ Hz}$  (periodo di 100 secondi) e velocità  $2000\text{ rpm}$ . L'anticipo iniziale è stato ritardato di  $12^\circ$  rispetto il valore di mappa. Si può ritenere che la variazione del consumo specifico non vari significativamente con la variazione del carico a differenza, viceversa questo è molto sensibile all'anticipo. Pertanto il controllore può essere applicato anche per piccole oscillazioni del carico nel range di funzionamento. Nelle 5 prove la correzione che viene eseguita è rispettivamente  $3.75^\circ$ ,  $-0.75^\circ$ ,  $-3.00^\circ$ ,  $-7.5^\circ$  e  $0.75^\circ$  ( $-1.35^\circ$  di media), i quali forniscono un MFB50 compreso tra  $2^\circ$  e  $10^\circ$ . Si ha un incremento dell'efficienza del  $9\%$ .

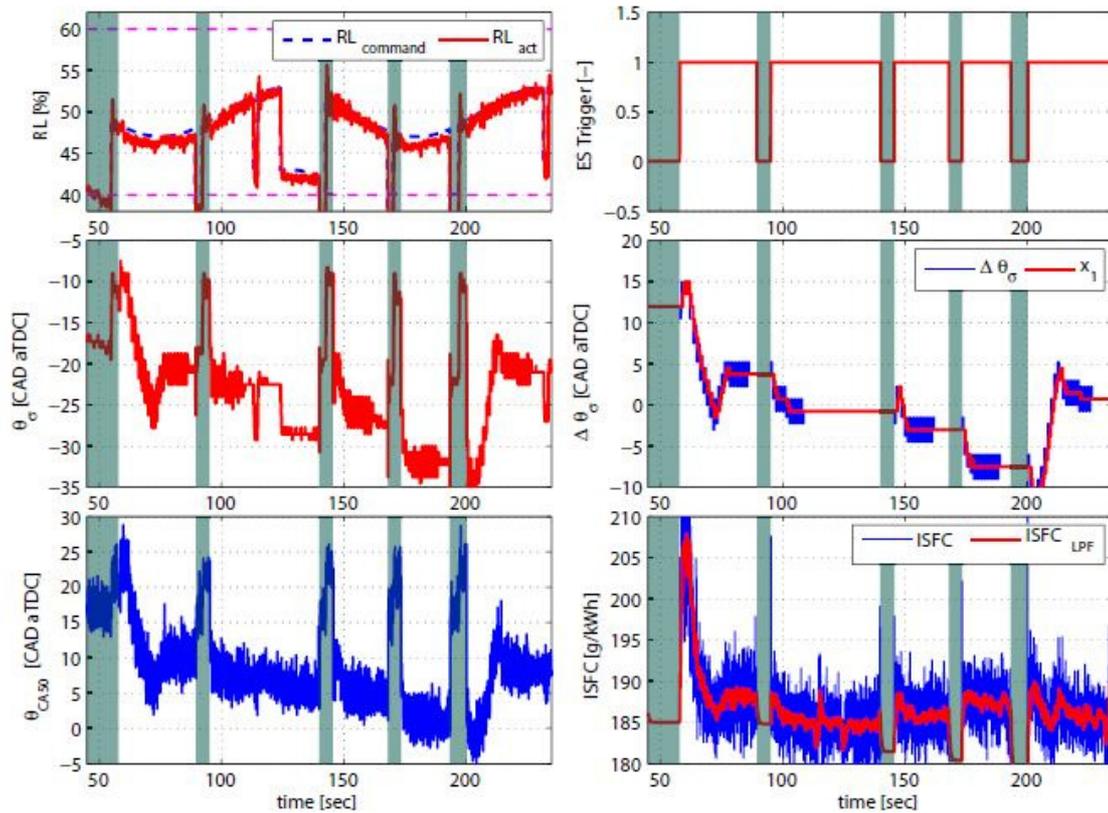


Figura 3-13 risultati a 2000rpm, carico 50%, delta anticipo iniziale 12°, ampiezza sinusoide carico 3%, frequenza 0.01 Hz [4]

Per la seconda prova sono stati mantenuti gli stessi valori per il carico ma è stata aumentata la frequenza fino a 0.05 Hz (periodo di 20 secondi). L'anticipo iniziale è stato ritardato di 12° rispetto al valore di mappa. Il controllore fa convergere MFB50 a 5° dopo circa 15 secondi e il consumo specifico cala di circa il 12%.

Nelle 5 prove la correzione che viene eseguita è rispettivamente -4.50°, -2.25°, -1.50°, 0.75° e -5.25° (-2.25° di media), i quali forniscono un MFB50 compreso tra 3° e 8°. L'efficienza varia da 185 a 186 g/kWh.

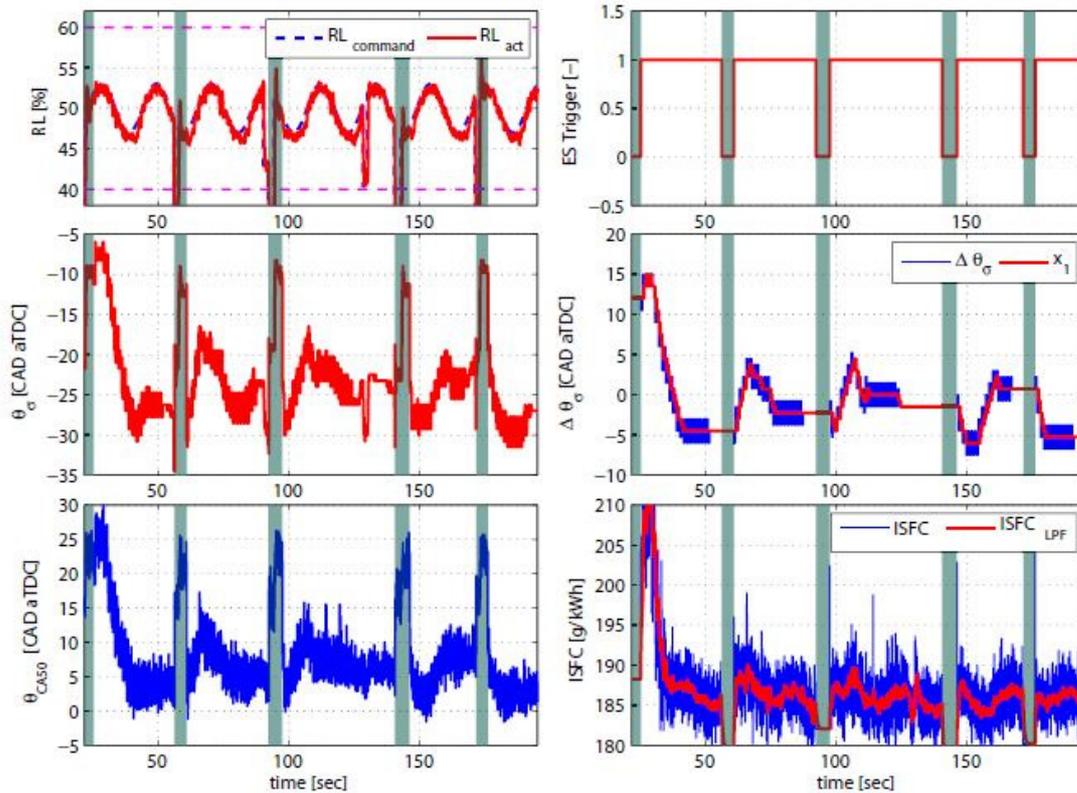


Figura 3-14 risultati a 2000rpm, carico 50%, delta anticipo iniziale 12°, ampiezza sinusoide carico 3%, frequenza 0.05 Hz [4]

Per la terza prova sono stati mantenuti gli stessi valori per il carico ma è stata aumentata la frequenza fino a 0.1 Hz (periodo di 10 secondi). L'anticipo iniziale è stato ritardato di 12° rispetto al valore di mappa.

Nelle 5 prove la correzione che viene eseguita è rispettivamente 0.75°, -3.00°, -4.50°, 4.50° e -0.75°, i quali forniscono un MFB50 compreso tra 5° e 12°. L'efficienza varia da 185 a 189 g/kWh.

Nella prima e nella quarta prova ES si ferma in maniera indesiderata al secondo 30 e al secondo 155, come evidenziato nel cerchio tratteggiato. Questo accade perché la correzione che viene fatta è minore di una soglia per un numero predefinito di oscillazioni dell'anticipo; è chiaro che è necessario definire dei criteri più sofisticati di convergenza. Nei restanti tre casi le correzioni sono comparabili con i test precedenti.

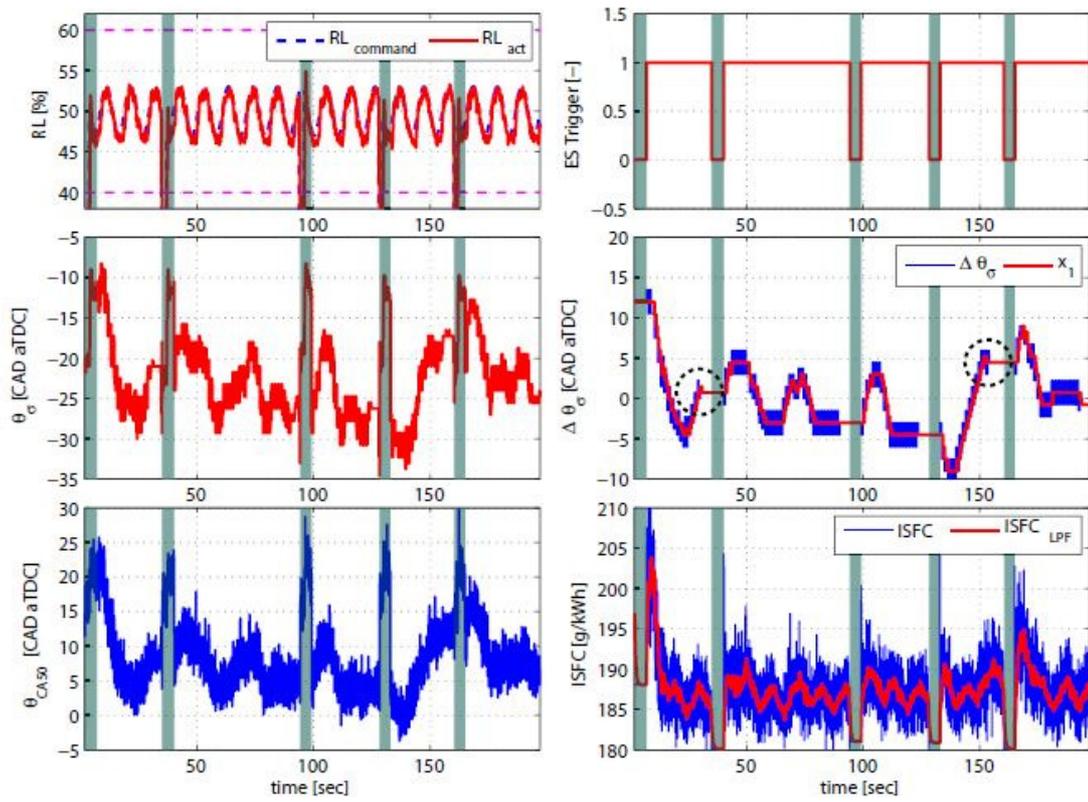


Figura 3-15 risultati a 2000rpm, carico 50%, delta anticipo iniziale 12°, ampiezza sinusoide carico 3%, frequenza 0.15 Hz [4]



## **4. Influenza dei parametri sulla combustione**

### **4.1. La combustione**

La combustione è un complesso processo di natura fisica e chimica, attraverso il quale il combustibile si ossida liberando calore. Poiché le reazioni di ossidazione avvengono in fase gassosa, la velocità di combustione è massima quando il combustibile è vaporizzato e le sue molecole sono uniformemente distribuite tra quelle di ossigeno (combustione in fase premiscelata).

Quando la miscela viene diluita con inerti (ad esempio EGR), la velocità di reazione diminuisce perché la concentrazione delle molecole combustibili è più bassa ed una parte del calore, rilasciato durante il processo di ossidazione, è spesa per riscaldare l'inerte. Un effetto simile si ottiene diluendo la miscela con un eccesso di ossidante, facendola diventare così più magra.

### **4.2. Anticipo di accensione**

Dall'andamento nel tempo della pressione nel cilindro dipende il valore del lavoro meccanico raccolto sull'albero motore. Poiché il processo di combustione non è istantaneo, occorre distribuirlo adeguatamente a cavallo di PMS (Punto Morto Superiore), per poter convertire in lavoro la massima quantità di energia termica. Questo risultato si ottiene anticipando opportunamente l'accensione della miscela rispetto alla posizione del PMS attivo. Se l'anticipo è grande, la combustione si svolge prima ed il massimo di pressione si avvicina al PMS, facendo così aumentare il lavoro di compressione che il pistone deve fare sul gas. Ritardando l'accensione, il picco di pressione si allontana dal PMS e si riduce in ampiezza, producendo una diminuzione del lavoro di espansione raccolto dal pistone.

L'anticipo d'accensione ottimale di un motore dipende però da molti differenti parametri:

- Velocità del motore
- Carico del motore
- Rapporto A/F
- Composizione del combustibile

Il calcolo che permette di ricavare l'anticipo d'accensione si basa sulle conoscenze motoristiche assieme a estese campagne di sperimentazione effettuate durante la progettazione e la calibrazione del motore. Tuttavia non è ragionevole misurare quanti più

parametri possibili essendo questa pratica costosa e dispersiva. Per questo motivo si è studiata la possibilità di ottenere informazioni sull'anticipo d'accensione ottimale per mezzo dell'analisi della pressione nel cilindro della quale si ricavano delle grandezze che descrivono la combustione.

In pratica l'anticipo deve risultare tanto più grande, quanto più lento è il processo di combustione in condizioni ottimali. Il picco di pressione cade circa a  $15^\circ \div 20^\circ$  dopo il PMS ed il 50% della carica bruciata circa  $8 \div 10^\circ$  dopo il PMS.

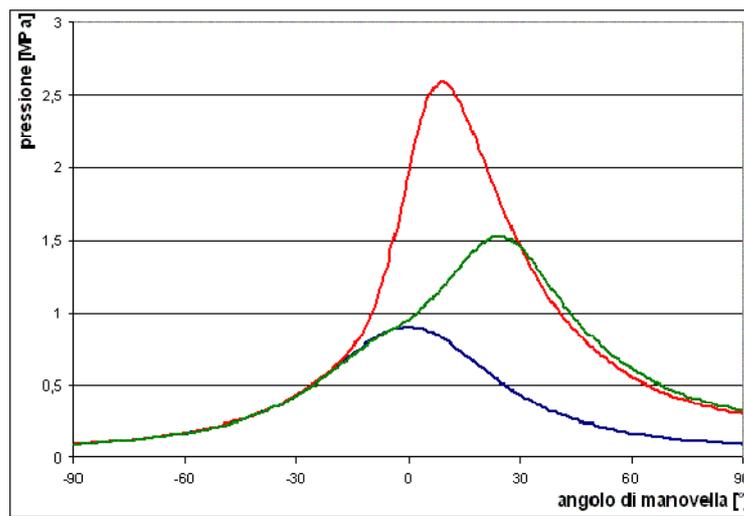


Figura 4-1 pressione nel cilindro per un ciclo motore e due cicli con combustione con diverso anticipo [7]

### 4.3. Dispersione ciclica

Molti rilievi sperimentali indicano che anche se il motore funziona in stazionario, un ciclo non si ripete mai identico a quello precedente dando luogo al ben noto fenomeno della dispersione ciclica. Queste variazioni da ciclo a ciclo sono da imputare principalmente alle seguenti cause:

1. le condizioni di moto della carica nel cilindro sono casuali ed irripetibili
2. il miscelamento dei gas residui, specialmente sotto candela, può variare sensibilmente
3. si possono avere differenze di aria e combustibile inviati allo stesso cilindro in cicli successivi.

Il peso relativo di questi fattori dipende dalle caratteristiche geometriche del motore e dalle sue condizioni di funzionamento. Le condizioni della carica in prossimità della candela influenzano lo stato iniziale della fiamma determinando la velocità con cui procedono le reazioni chimiche determinando e deformando il primo volume di miscela

accesa in modo diverso da ciclo a ciclo. Ne conseguono variazioni della velocità, con la quale il piccolo fronte di fiamma inizialmente laminare (pre-fiamma) si trova in una fiamma pienamente turbolenta.

Le conseguenze negative introdotte dal fenomeno della dispersione ciclica sono principalmente di due tipi. Prima di tutto alcuni parametri motoristici (quali l'anticipo di accensione), che vengono determinati empiricamente come soluzione di miglior compromesso verranno fissati ad un valore ottimale per il ciclo medio. Per la maggior parte di quelli effettivi essi avranno un valore tanto più lontano dall'ottimo, quanto più il ciclo considerato si allontana da quello medio. Per esempio, l'anticipo stabilito risulterà eccessivo per cicli con velocità di combustione superiore a quella del medio, mentre sarà insufficiente per tutti i cicli con velocità di combustione inferiore. Ne conseguono perdite di potenza e di rendimento del motore, perché per molti cicli i parametri importanti sono lontani dell'ottimo.

In molti casi, inoltre, sono i cicli estremi che impongono i limiti alle condizioni di funzionamento del motore, le quali di conseguenza, risultano eccessivamente restrittive per la maggior parte di quelli effettivi. Per esempio il limite magro cui il motore può funzionare è imposto dai cicli estremi a combustione più lenta, perché sono quelli che, in seguito ad uno smagrimo della miscela, sono inclini a dare origine ad una combustione incompleta ed irregolare. Se tutti i cicli si ripetessero identici al medio, il motore potrebbe essere regolato per funzionare con la miscela più magra, con evidenti vantaggi sul consumo (quindi sull'emissione di  $\text{CO}_2$ ) e sugli incombusti.

Si tenga poi presente che l'inerzia dei componenti meccanici è normalmente sufficiente, in presenza di una modesta dispersione ciclica, a mediare le variazioni nel tempo che si hanno all'interno dei cilindri, facendo in modo che la coppia erogata all'esterno risulti costante. Quando però la dispersione si fa elevata, questa compensazione si fa più imperfetta e il funzionamento del motore tende a diventare irregolare.

In ogni caso quando si studia la combustione in un motore, questo fenomeno costringe a mediare le informazioni relative ad un numero di cicli sufficientemente alto, solo così infatti si può ricavare un dato che sia sufficientemente significativo del comportamento medio del motore in quelle condizioni.

La durata della combustione definita come l'ampiezza dell'angolo di manovella tra il 5% e il 90% di massa bruciata, è un parametro che rappresenta bene per ogni velocità e carico sia la stabilità della combustione sia l'efficienza della combustione.

La combustione è un fenomeno stocastico e la sua fase, rappresentata dal 50% di frazione di massa bruciata (MFB50), a parità di anticipo di accensione varia continuamente di ciclo in ciclo. Le prestazioni dei motori ad accensione comandata sono influenzate dalla fase e dalla durata della combustione: questi due parametri sono direttamente comandati dall'anticipo.

La combustione è ben rappresentata dalla funzione di Wiebe: l'equazione mostra come la frazione di massa bruciata sia funzione di quattro parametri in accordo con il modello di Wiebe

$$x_b = 1 - e^{-a \cdot \left( \frac{\theta - \theta_{SOC}}{\Delta\theta} \right)^{m_w + 1}}$$

$\theta$  è l'angolo attuale di manovella,  $\theta_{SOC}$  è l'angolo di manovella in cui ha inizio la combustione (lo si fa coincidere con il 5% di frazione bruciata),  $\Delta\theta$  è la durata della combustione,  $a$  è un parametro collegato alla massa bruciata alla fine della combustione (quando  $\theta = \theta_{SOC} + \Delta\theta$ ) e si può considerare costante, infine  $m_w$  è un parametro di forma e dipende dall'andamento del rilascio di calore (ROHR) per dato  $\theta_{SOC}$  e  $\Delta\theta$ .

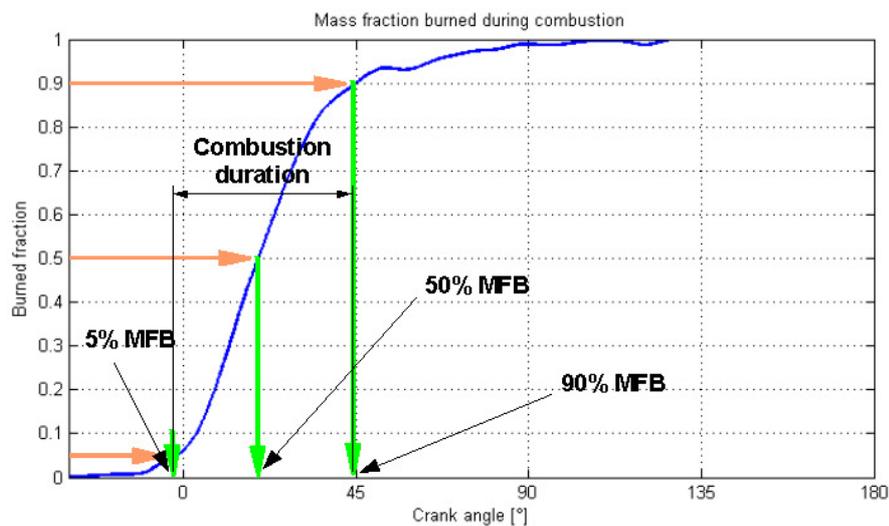


Figura 4-2 andamento del 50% di frazione bruciata con l'angolo di rotazione di manovella [3]

In teoria se riuscissimo a controllare selettivamente i tre parametri della funzione di Wiebe potremmo progettare la forma del rilascio di energia adeguandola alle esigenze di prestazione.

D'altra parte però la leva principale su cui si agisce in un motore ad accensione comandata (l'anticipo di accensione) influenza tutti e tre i parametri in maniera non deterministica.

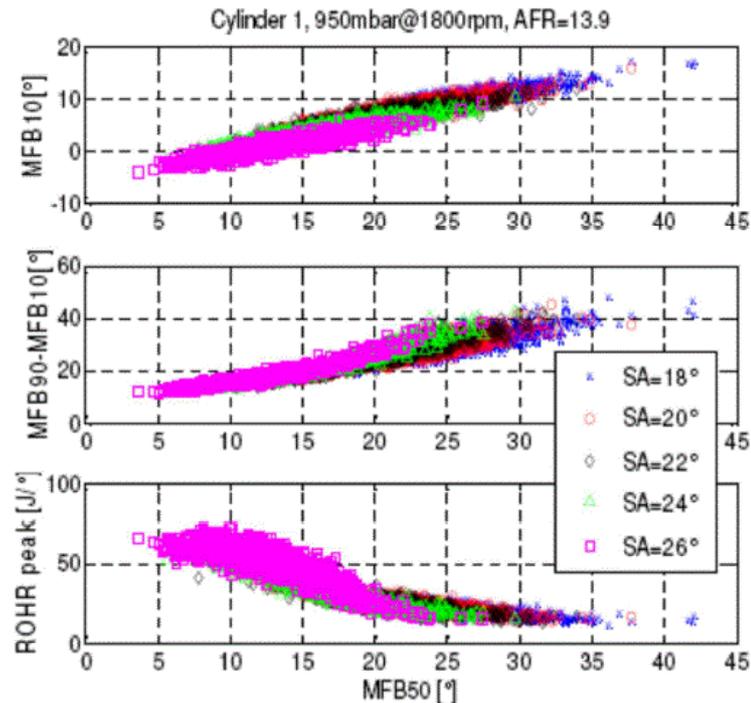


Figura 4-3 inizio combustione, durata combustione e picco di rilascio calore con MFB50 per diversi valori di anticipo [3]

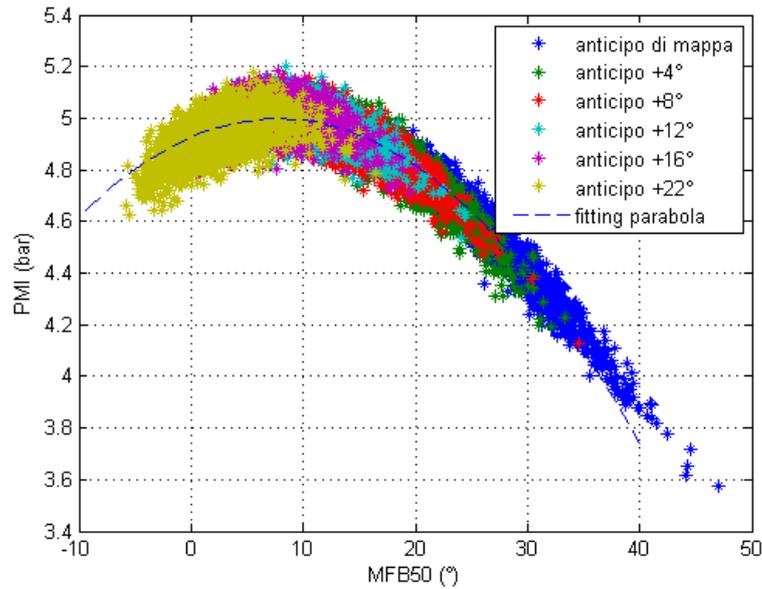
L'andamento dei parametri caratteristici della combustione può essere descritto attraverso MFB50, che è quindi un indicatore molto efficace della combustione nel suo complesso: fase, durata, forma.

Il miglior valore di anticipo è quello che fornisce un MFB50 il più possibile vicino all'ottimo: l'impostazione di SA implica ottimizzare  $\theta_{soc}$ ,  $\Delta\theta$  e  $m_w$ .

Sul piano MFB50-PMI si vede molto bene la dispersione ciclica, infatti per dato anticipo di accensione si ottengono fasi di combustione molto differenti: per dato SA si ha una certa variabilità nel senso del 50% di frazione bruciata e nel senso della pressione media indicata.

Un'ulteriore osservazione che si può fare è che le nuvole di punti si addensano su di una parabola.

Imponendo un SA si vede come MFB50 abbia una certa distribuzione statistica: questa indeterminazione sulla fase e durata della combustione è da attribuire principalmente al ritardo di accensione che a sua volta dipende da molti fattori non controllabili.



**Figura 4-4 andamento pressione media indicata con MFB50 per diversi valori di anticipo. Prove eseguite a 2400rpm, farfalla 22%, AFR 14.6**

La calibrazione di SA può essere eseguita analizzando il trend della pressione media indicata in funzione del solo MFB50.

L'azione su SA cambia la fase di combustione in maniera stocastica e di conseguenza la covarianza di PMI, però la relazione tra PMI e MFB50 non dipende da SA perché lo stesso valore di pressione media indicata può essere raggiunto con valori diversi di anticipo.

Nelle figure è stata plottata la frequenza assoluta di MFB50 per dato anticipo di accensione. E' ben riconoscibile una distribuzione normale. Questa ipotesi è alla base della simulazione della dispersione ciclica nell'algorithmo del motore virtuale.

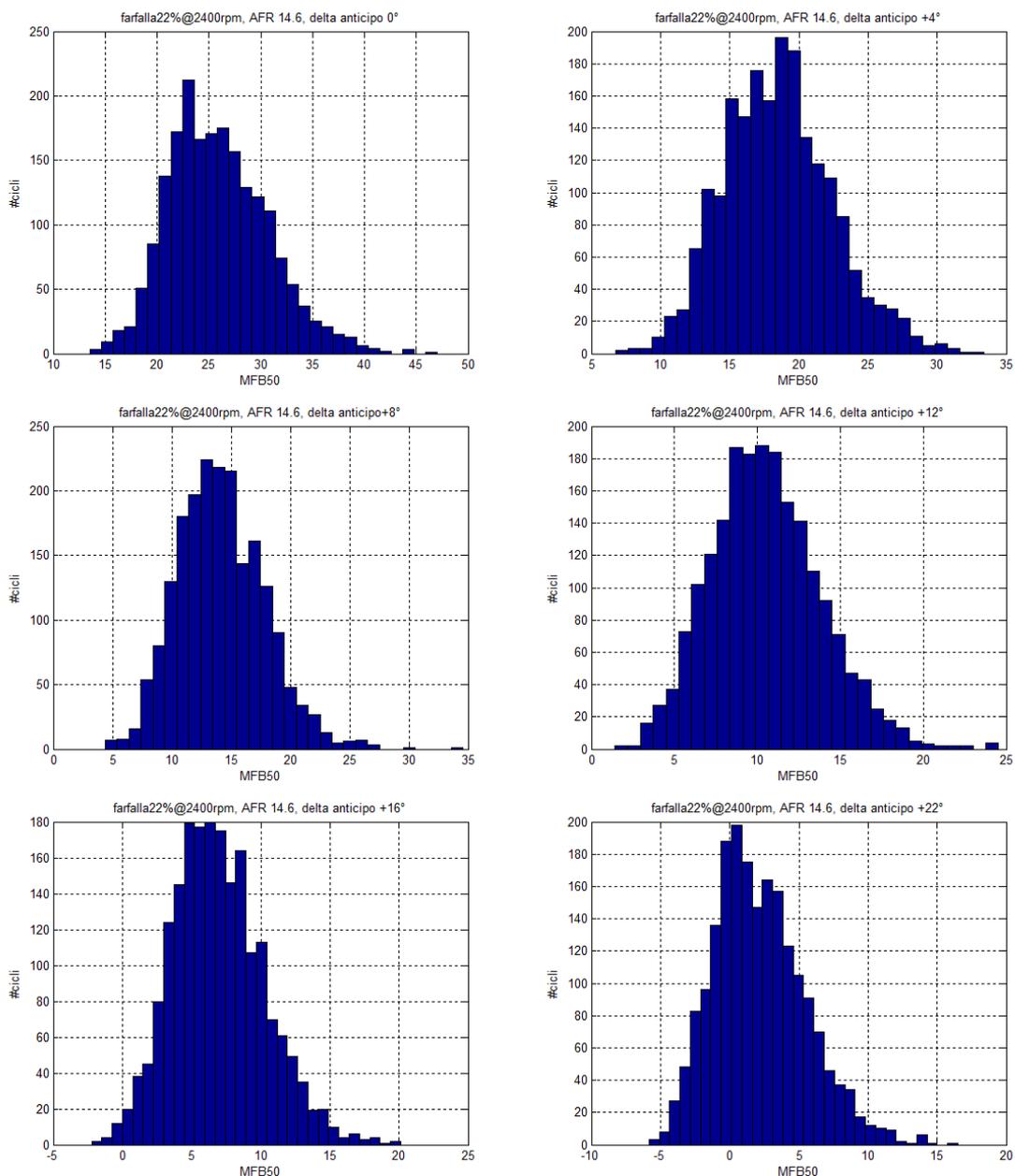
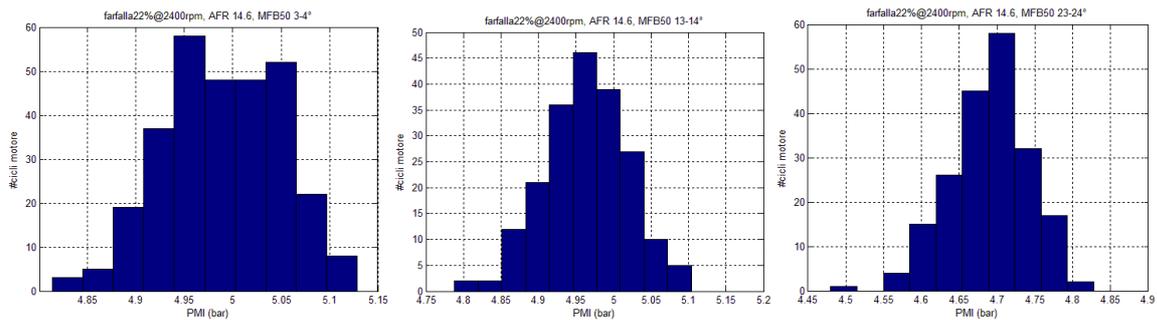


Figura 4-5 distribuzione di MFB50 per diversi valori di anticipo. Prove eseguite a 2400rpm, farfalla 22%, AFR 14.6

Analizzando le acquisizioni di segnali di pressione si nota che la distribuzione di PMI a parità di MFB50 è approssimata bene da una gaussiana. Questa dispersione della PMI a parità di MFB50 può dipendere da:

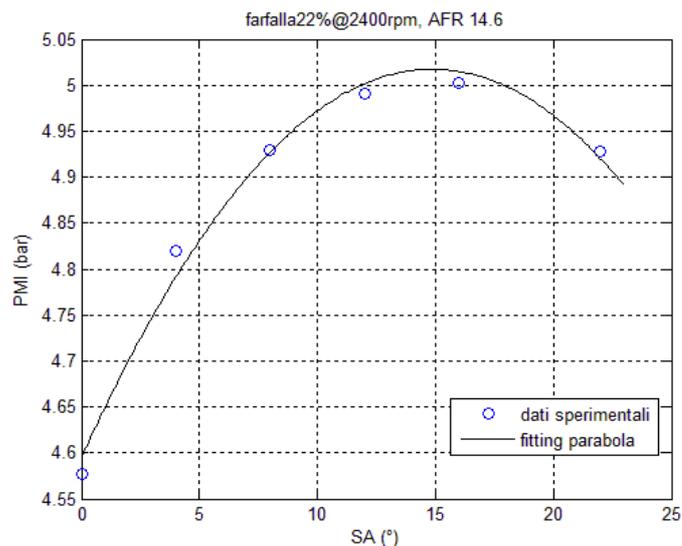
- AFR che varia da ciclo a ciclo a causato da un non perfetto funzionamento degli iniettori
- Rendimento volumetrico che varia da ciclo a ciclo dovuto a temperature differenti del cilindro a lorovolta influenzate dalla dispersione ciclica
- Durata variabile della combustione (MFB90-MFB5) che fa variare la curva di rilascio del calore



**Figura 4-6** Distribuzione pressione media indicata per diversi valori di MFB50. Prove eseguite a 2400rpm, farfalla 22%, AFR 14.6

#### 4.4. Curva ad ombrello

La variazione dell'anticipo di accensione, fa variare la fase della combustione e influenza a sua volta il lavoro indicato e quindi la pressione media indicata e quindi la coppia erogata dal motore. Facendo variare SA e misurando la pressione media indicata e rappresentando i punti di funzionamento si nota che questi vengono ben approssimati da una parabola, ottenendo così la nota curva ad ombrello.



**Figura 4-7** curva a ombrello

#### 4.5. Detonazione

La detonazione rappresenta una delle forme di combustione anomala più importanti, perché limita le prestazioni ed il rendimento dei motori e nello stesso tempo impone vincoli restrittivi alla formulazione dei carburanti. Essa si manifesta all'esterno con un caratteristico rumore metallico, perdita di potenza, vibrazioni, riscaldamento accentuato, arrivando in situazioni particolarmente severe al danneggiamento degli organi meccanici

del motore. La detonazione ha origine dalla autoaccensione di parte della miscela. Quando il fronte di fiamma avanza comprime e riscalda la frazione non ancora bruciata; questa frazione presenta disomogeneità per quanto riguarda composizione, temperatura, percentuale di gas residui. Può accadere che uno o più volumetti di miscela raggiungano le condizioni di autoaccensione prima di essere investiti dal fronte di fiamma principale; si libera localmente e quasi istantaneamente una grande quantità di energia (dipendente dalla massa di miscela coinvolta) che produce un picco di pressione. Questo si propaga all'interno con velocità sonica, stimolando l'autoaccensione di quella parte di carica per cui le reazioni di prefiamma erano quasi terminate. Le onde di pressione rimbalzano ripetutamente sulle pareti del cilindro dando luogo a vibrazioni che producono il caratteristico rumore metallico di una sollecitazione impulsiva.

In figura si possono notare le differenze tra i diagrammi di pressione di un ciclo leggermente detonante e uno molto detonante, si notano i tipici picchi decrescenti nel tempo. La frequenza ( $5\div 15$  kHz) è la stessa del rumore metallico udibile all'esterno e dipende dalla velocità con cui si propagano le onde di pressione nella camera e dal cammino percorso tra due riflessioni consecutive.

Tuttavia, contrariamente a quello che si può pensare, la detonazione non è un fenomeno da evitare a priori, ma piuttosto una condizione da controllare. Spesso accade infatti che la condizione di massima coppia in un determinato punto operativo presenti un certo livello di detonazione. Voler eliminare completamente la detonazione significherebbe rinunciare a una gran parte dell'energia potenzialmente disponibile. Chi ha il compito di effettuare la calibrazione di un motore deve quindi poter valutare la detonazione in maniera quantitativa e fissare una soglia considerata accettabile e tale da non pregiudicare la vita del motore stesso.

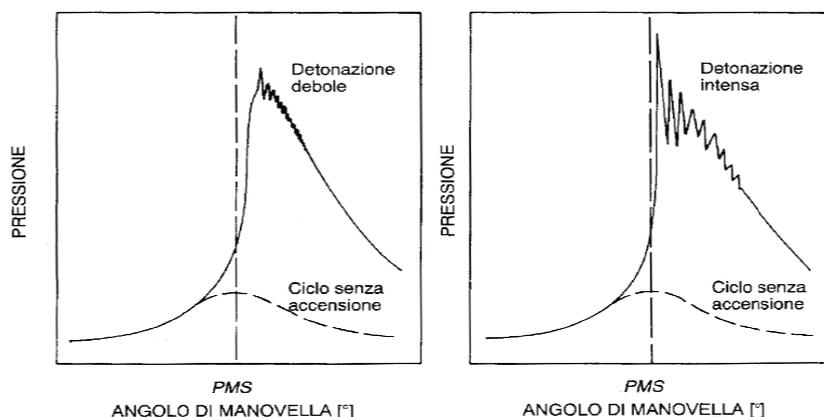


Figura 4-8 confronto tra un ciclo leggermente detonante e uno fortemente detonante [1]

Le oscillazioni in un ciclo fortemente detonante possono avere ampiezza anche del 20 ÷ 50% della pressione massima.

Promuovono la detonazione:

1. benzine con basso numero di ottano, cui corrisponde un'elevata reattività chimica della miscela
2. aumento del rapporto di compressione, che innalza temperatura e pressione della miscela
3. introduzione di una massa maggiore di carica (diminuendo la parzializzazione del condotto di alimentazione o innalzando il grado di sovralimentazione)
4. aumento della temperatura della carica aspirata che favorisce le reazioni pre-ossidazione
5. un più elevato anticipo di accensione che fa crescere più rapidamente la pressione e ne innalza il massimo
6. miscele leggermente grasse cui corrispondono pressioni e temperature più alte di combustione e le massime velocità delle reazioni di pre-fiamma nella carica compressa e riscaldata dal fronte di fiamma
7. una diminuzione del moto turbolento della carica che diminuisce la velocità del fronte di fiamma
8. un aumento del percorso del fronte di fiamma per raggiungere i punti più remoti della camera
9. miscele magre che rallentano l'avanzamento del fronte di reazione

#### **4.6. MAPO**

Un indice comunemente utilizzato per rappresentare la detonazione è il MAPO (Maximum Amplitude Pressure Oscillation). Il segnale di pressione viene filtrato passa alto o passa banda (con frequenza di taglio di 5 kHz), finestrato e viene applicata la seguente definizione di MAPO

$$MAPO = \max(|p_{filt}|)$$

La natura puntuale dell'indice impone che il segnale sia "pulito" cioè privo di picchi dovuti a rumore elettrico. Un impulso elettrico all'interno della finestra di combustione non sarebbe eliminato completamente dai filtri e porterebbe ad una falsa diagnosi.

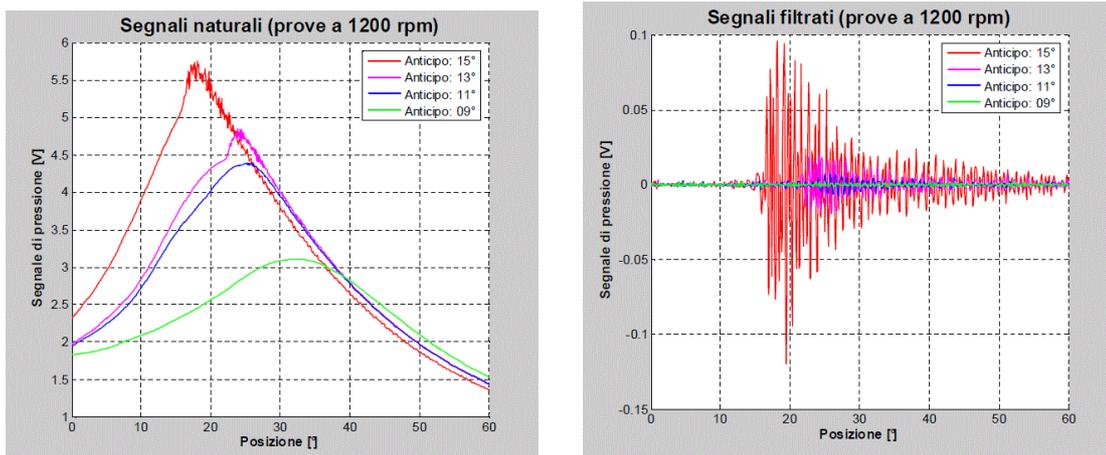


Figura 4-9 sinistra: confronto tra l'andamento della pressioni in tre cicli con diversi valori di detonazione. Destra: segnale di pressione finestrato e filtrato passa alto [3]

La detonazione è anch'esso un fenomeno stocastico quindi avrà una certa distribuzione probabilistica. Sperimentalmente si vede che per i cicli non detonanti il MAPO ha distribuzione normale, mentre per quelli detonanti la distribuzione è ben approssimato da una log-normale. In quest'ultimo caso deviazione standard e valore medio perdono di importanza, molto più interessante è valutare il valore mediano.

Nella figura 4-10 a sinistra, relativa ad un ciclo poco detonante, si riesce a riconoscere una distribuzione del MAPO in funzione del numero di cicli di tipo normale. Mentre nella figura di destra si riconosce una distribuzione del tipo log-normale.

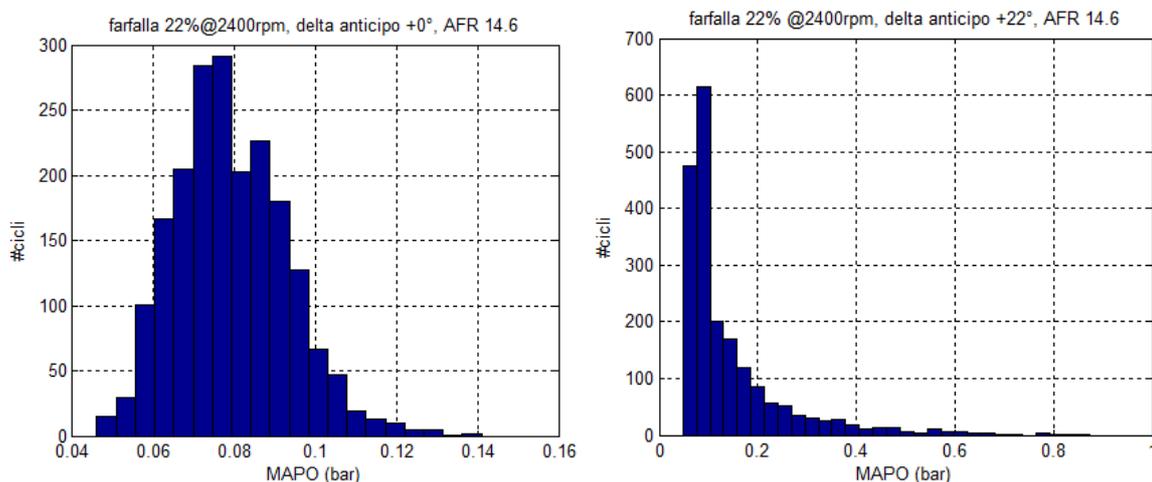


Figura 4-10 distribuzione MAPO per anticipo di mappa e delta anticipo +22° rispetto a mappa

## 4.7. Temperatura dei gas di scarico

Il trattamento dei gas di scarico è imprescindibile sui veicoli moderni per poter superare le prove di omologazione. Nei motori ad accensione comandata l'abbattimento degli inquinanti, CO, HC e NO<sub>x</sub> viene demandato al catalizzatore trivalente abbinato ad una sonda lambda per il controllo in retroazione del titolo della miscela. Nello specifico ossida CO ed HC e riduce NO<sub>x</sub> avvalendosi di metalli nobili che favoriscono queste reazioni. Un catalizzatore trivalente deve potersi attivare a temperature relativamente basse (200°C) e resistere alle massime che si possono sviluppare (900°C); perciò questo dispositivo riesce a lavorare in tutto il range di utilizzo di un motore ad accensione comandata. E' vero inoltre che se le temperature eccedono un certo valore si corre il rischio di danneggiarlo.

Analizziamo come dipende la temperatura di fine espansione dall'anticipo attuato e dal rapporto aria combustibile.

Il range di variazione di AFR è ridotto e quindi la dipendenza della temperatura dei gas di scarico è per forza di cosa limitata. In generale si ha comunque un massimo poco accentuato in corrispondenza di  $\lambda = 0.9$

Riducendo l'anticipo di accensione, l'efficienza della combustione diminuisce perché aumentano le perdite per calore e come conseguenza si ha un aumento della temperatura dei gas residui.

Nelle figure è rappresentato l'andamento della stima della temperatura in camera di combustione 30° prima del punto morto inferiore in corrispondenza dell'apertura delle valvole di scarico.

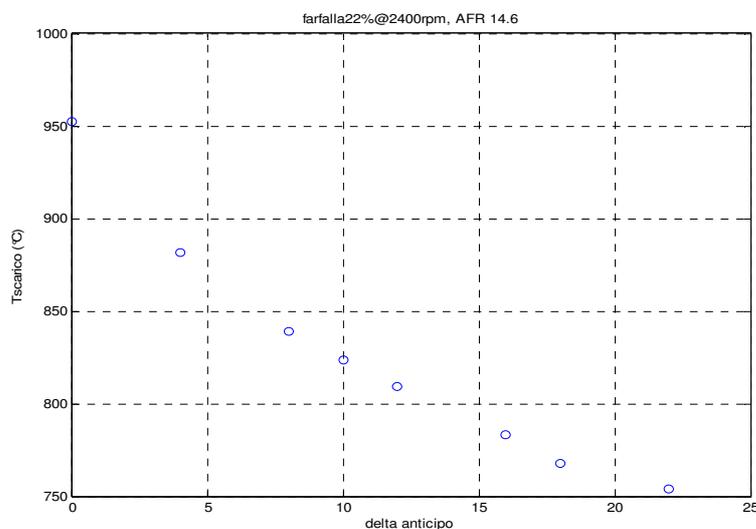


Figura 4-11 stima della temperatura dei gas di scarico al variare dell'anticipo di accensione

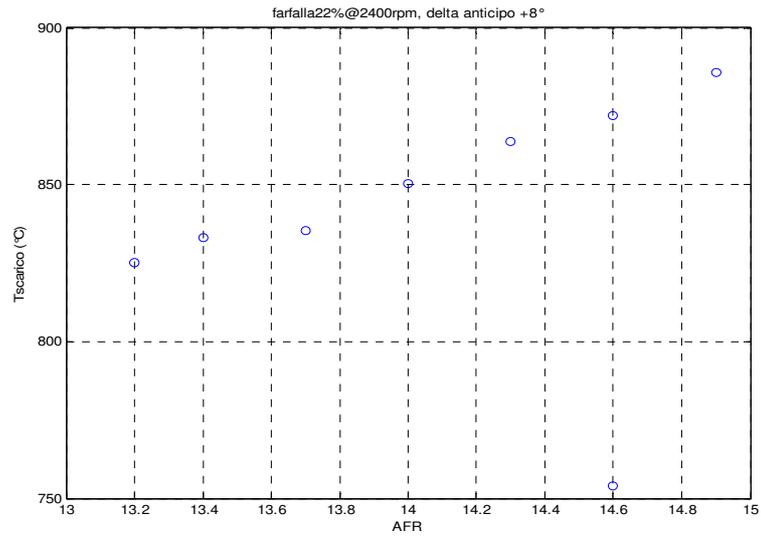


Figura 4-12 stima della temperatura dei gas di scarico al variare della composizione della miscela



## 5. GENERAZIONE DELLE MAPPE

Per come è stato pensato il motore virtuale per la generazione di pressione media indicata e temperatura di scarico, è stato necessario crearsi delle mappe di alcune grandezze in funzione dei due parametri che l'algoritmo ES si propone di controllare.

Si è partiti da segnali di pressione indicata di un motore 1200 FIRE Fiat. I segnali sono stati acquisiti con farfalla al 22% @ 2400rpm. Si avevano a disposizione due serie di prove ad anticipo e AFR variabile.

La prima serie comprende 6 acquisizioni da 1996 cicli motore ciascuna ad un valore di anticipo variato rispetto a quello di mappa compreso tra 0 e +22°. La seconda serie comprende 7 acquisizioni da 1196 cicli motore ciascuna facendo variare il rapporto aria combustibile da 13.2 a 14.9 e anticipato di +8° rispetto al valore di mappa.

I file con le acquisizioni sono stati processati da HeatIT Off, che è un software sviluppato da Alma Automotive per l'analisi off-line dei segnali di pressione in camera campionati con HeatIT RT. HeatIT permette di rappresentare sul dominio angolare o di volume le più importanti grandezze motoristiche

- Pressione cilindro
- ROHR (Rate of Heat Release)
- CHR (Cumulative Heat Release)
- Lavoro indicato
- Coppia indicata
- Stima della temperatura in camera

E' possibile analizzare molti cicli motore alla volta. Il grafico su base ciclo può essere utilizzato per visualizzare

- Pressione media indicata (IMEP)
- Calore cumulato rilasciato
- MFBxx (la percentuale bruciata può essere configurata)
- Indice di detonazione (MAPO e integrale)
- Picco di pressione e sua posizione angolare
- Massimo gradiente di pressione e sua posizione angolare
- Durata della combustione

L'analisi dell'intero file o di una sua porzione può essere esportata in file .txt e .mat: entrambi i file contengono informazioni su base angolo e/o su base ciclo.

Per ogni prova sono stati esportati MFB50 e sua deviazione standard, IMEP e sua deviazione standard, MAPO e sua deviazione e la temperatura stimata in corrispondenza dell'apertura delle valvole di scarico.

Da questi pochi punti si è dovuto estrapolare delle mappe che permettessero di ampliare il campo di funzionamento del motore. Ci si è avvalsi di uno strumento di Matlab denominato Model-Based Calibration Toolbox; questa utility ha permesso di creare delle mappe numeriche estese rispetto ai pochi dati di partenza.

Le mappe costruite sono:

- superficie MFB50 medio in funzione di SA e di AFR
- superficie T scarico in funzione di SA e di AFR
- superficie parametro di forma di una distribuzione weibull in funzione di SA e di AFR
- superficie parametro di scala di una distribuzione weibull in funzione di SA e di AFR

Il campo di AFR va da 11 a 18 con passo 0.01, il campo di SA va da 0 a +30° con passo 0.1°.

La confidenza delle mappe diminuisce man mano che ci si allontana dai punti sperimentali.

Una interpolazione quadratica ha permesso di avere un errore RMSE accettabile. RMSE deriva dall'errore quadratico medio (è la radice quadrata) che è una quantità non adimensionale e fornisce una misura della differenza tra il valore predetto e il valore effettivamente misurato.

$$RMSE = \sqrt{EMS} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \hat{x}_i)^2}{n}}$$

dove  $x_i$  è il dato misurato e  $\hat{x}_i$  è il valore stimato.

## 5.1. Mappa di MFB50

Per ogni prova sono noti MFB50 medio e sua deviazione standard (calcolati tramite HeatIT Off). Per la deviazione della fase di combustione si è ritenuta sufficiente l'ipotesi che questa dipenda significativamente solo da AFR.

I due grafici seguenti mostrano i dati da cui si è partiti per calcolare la mappa estesa di MFB50.

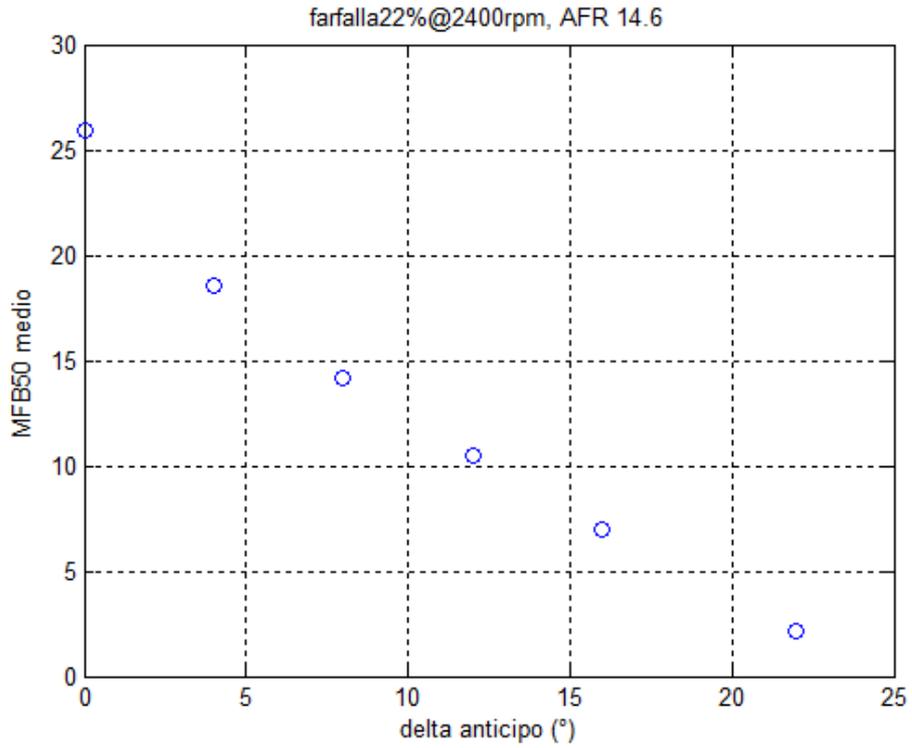


Figura 5-1

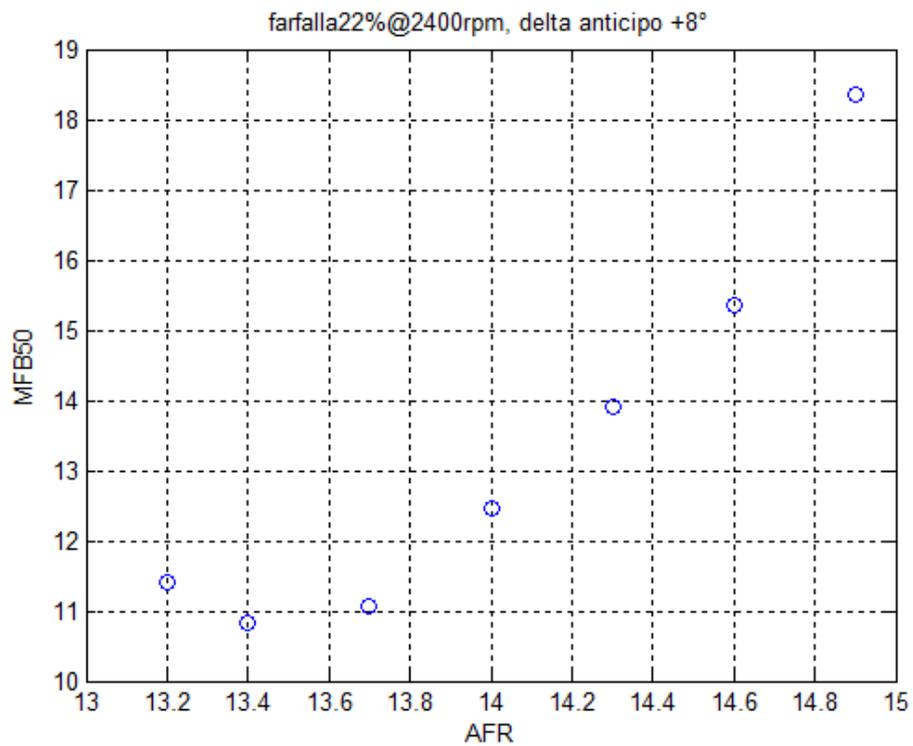


Figura 5-2

La mappa di MFB50 medio mostra come questo cali al diminuire del rapporto aria combustibile fino a circa 14.6; dopo ricomincia ad aumentare.

In presenza di miscela magra diminuisce la probabilità che le molecole di ossigeno e combustibile si incontrino per reagire rallentandone il processo.

MFB50 cala sempre all'aumentare dell'anticipo, perché la combustione viene fatta partire prima e quindi il tutto viene anticipato.

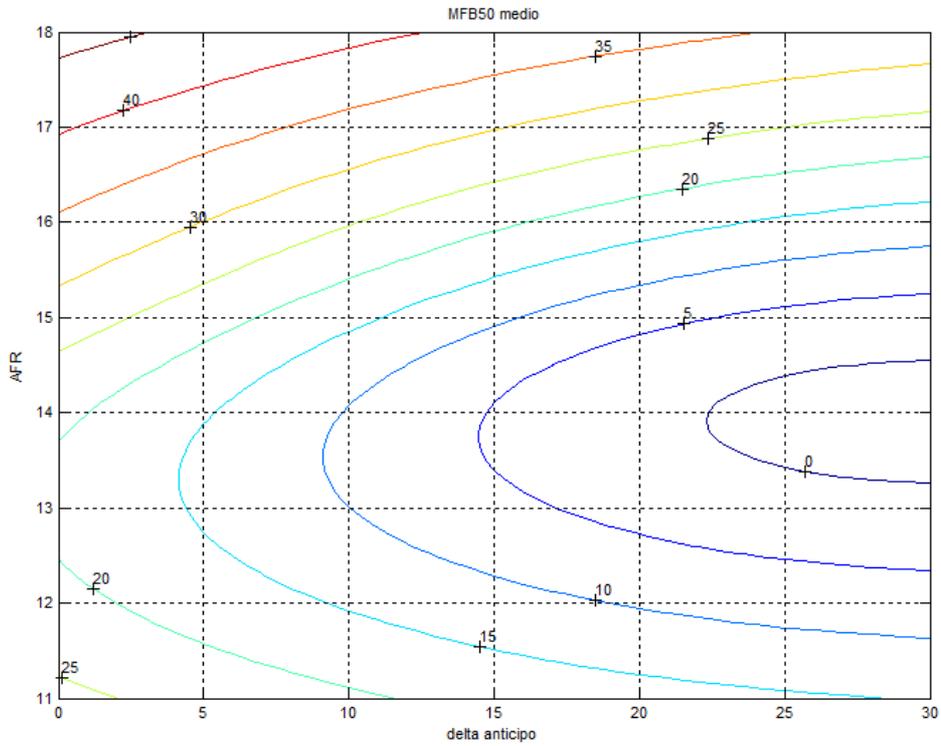


Figura 5-3 curve iso-MFB50

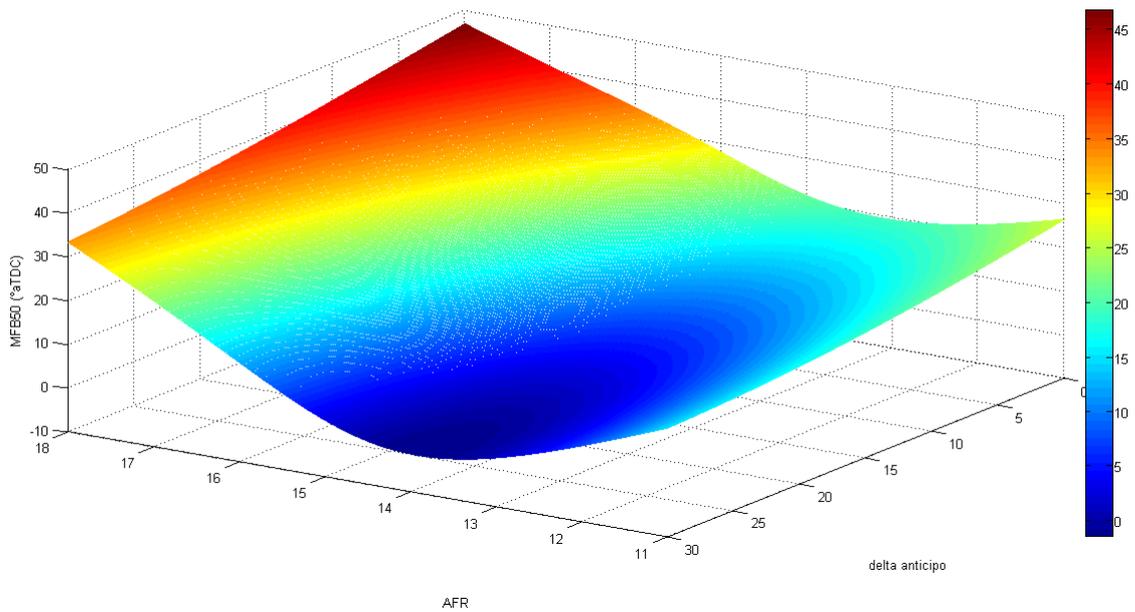


Figura 5-4 mappa MFB50

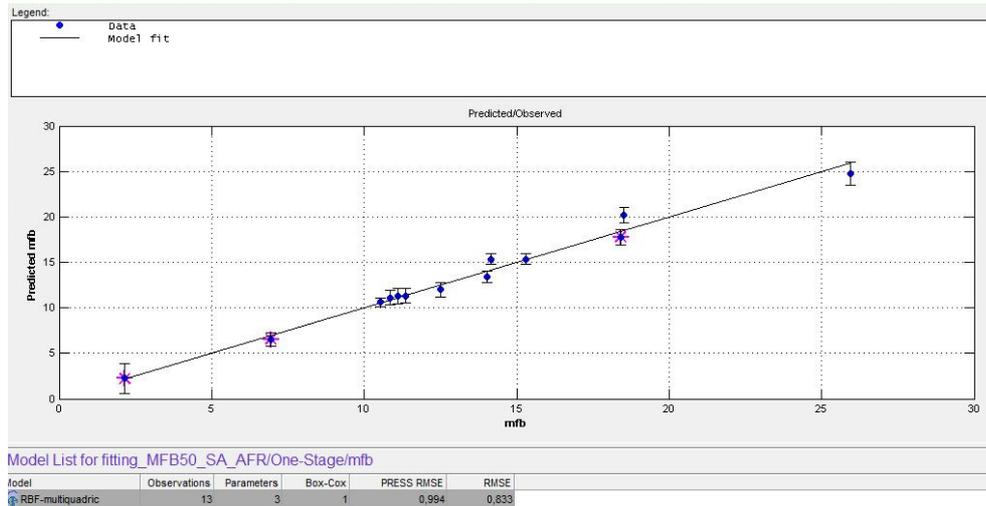


Figura 5-5 stima dell'errore quadratico medio mappa MFB50

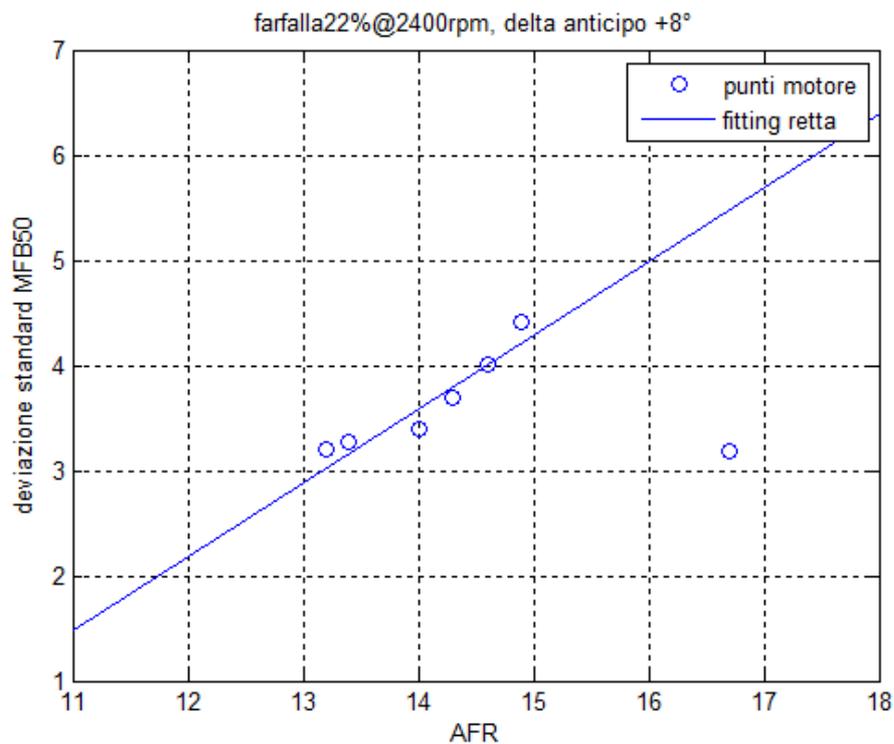


Figura 5-6

## 5.2. Mappa temperatura gas di scarico

La mappa estrapolata si riferisce alla temperatura stimata nel cilindro 30° prima del punto morto inferiore, in corrispondenza dell'apertura delle valvole di scarico. La stima della temperatura dipende dalla pressione, temperatura del collettore di spirazione e del rendimento volumetrico.

In figura si vede che la temperatura aumenta sempre al diminuire del delta anticipo perché la combustione viene spostata in avanti con pressioni di fine espansione maggiori e quindi temperature maggiori.

La temperatura è massima per composizioni magre della miscela perché l'eccesso di aria rallenta la combustione, quindi a fine espansione le temperature sono maggiori.

I due grafici seguenti mostrano i dati da cui si è partiti per calcolare la mappa estesa della temperatura stimata dei gas di scarico.

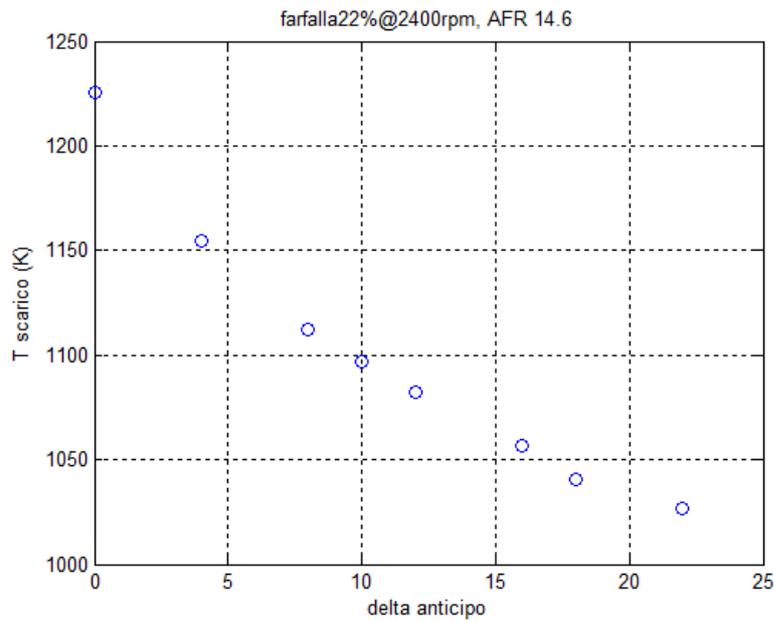


Figura 5-7

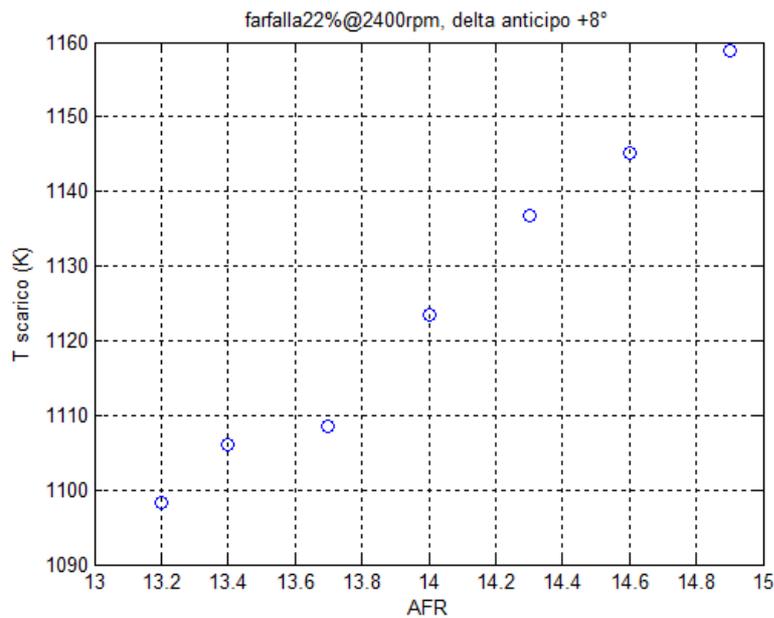


Figura 5-8

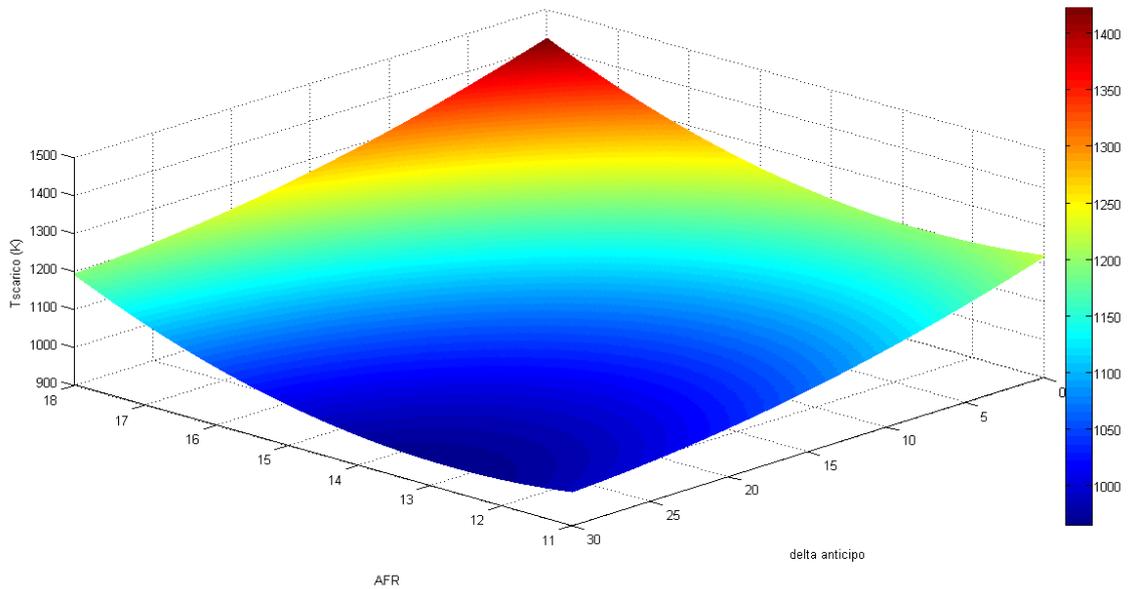


Figura 5-9 mappa temperatura stimata dei gas di scarico

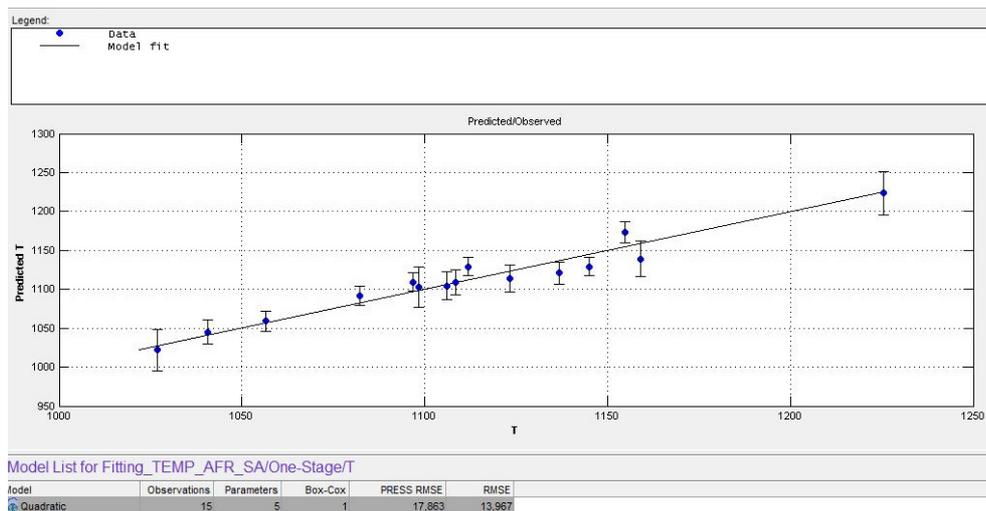


Figura 5-10 stima dell'errore quadratico medio mappa temperatura gas di scarico

### 5.3. Mappe per la generazione del MAPO

Il MAPO ha una distribuzione probabilistica che dipende da quanto il motore sta detonando. In condizioni poco detonanti il MAPO ha distribuzione normale; man mano che i cicli diventano più detonanti l'indice ha distribuzione log-normale.

Questi due tipi di distribuzioni probabilistiche possono essere efficacemente descritti con la distribuzione di Weibull che viene descritta attraverso due parametri positivi: uno di forma ( $b$ ) e uno di scala ( $a$ ).

$$f(x) = \frac{b}{a^b} x^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}$$

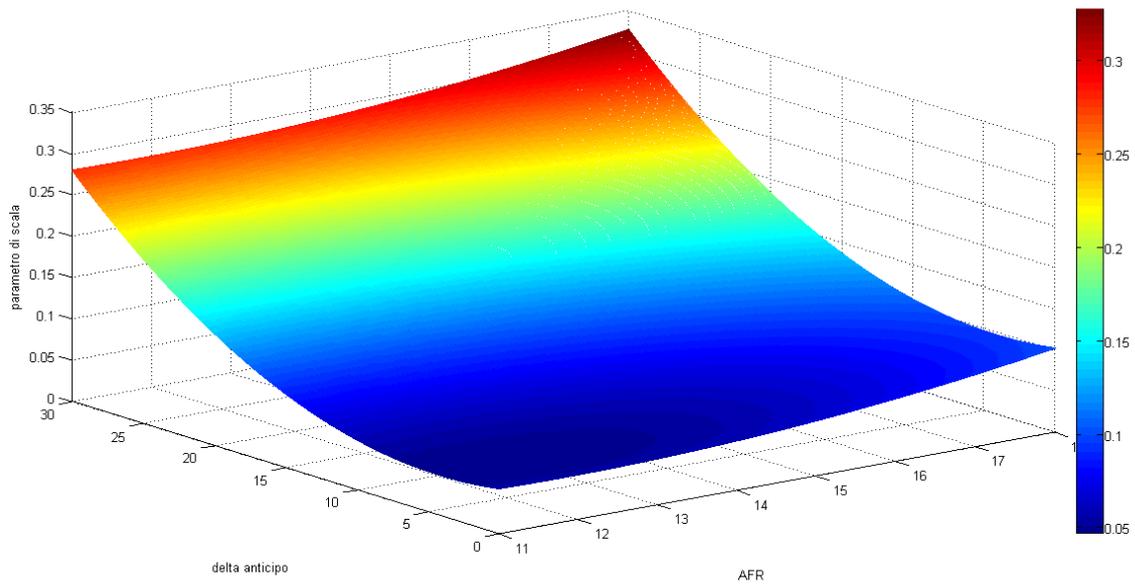


Figura 5-11 mappa parametro di scala per generazione MAPO

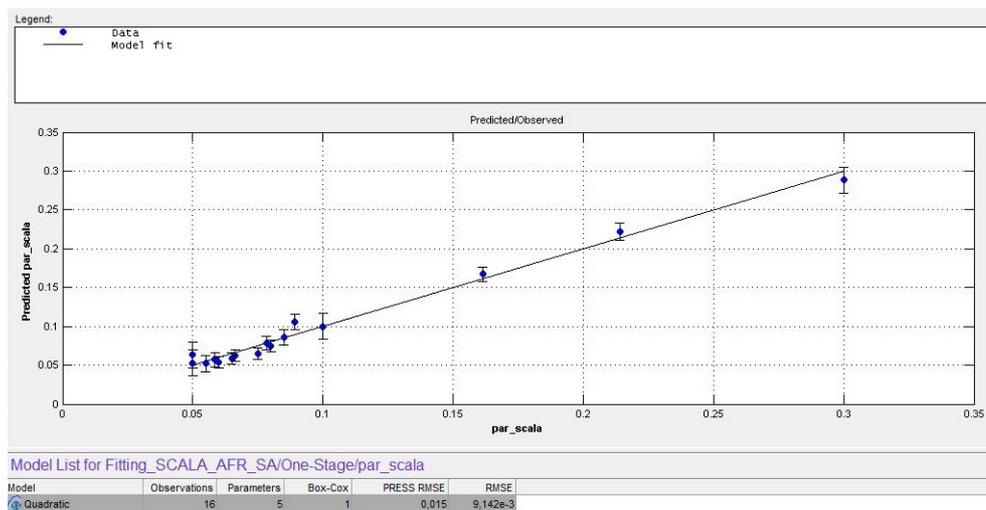


Figura 5-12 stima dell'errore quadratico medio della mappa parametro di scala

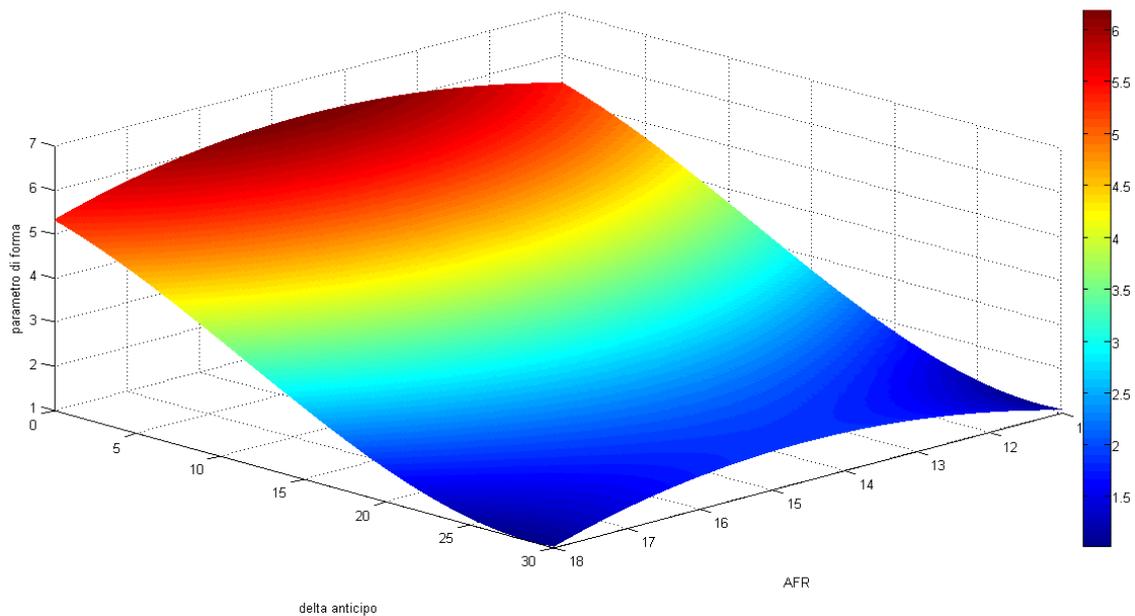


Figura 5-13 mappa parametro di forma per generazione MAPO

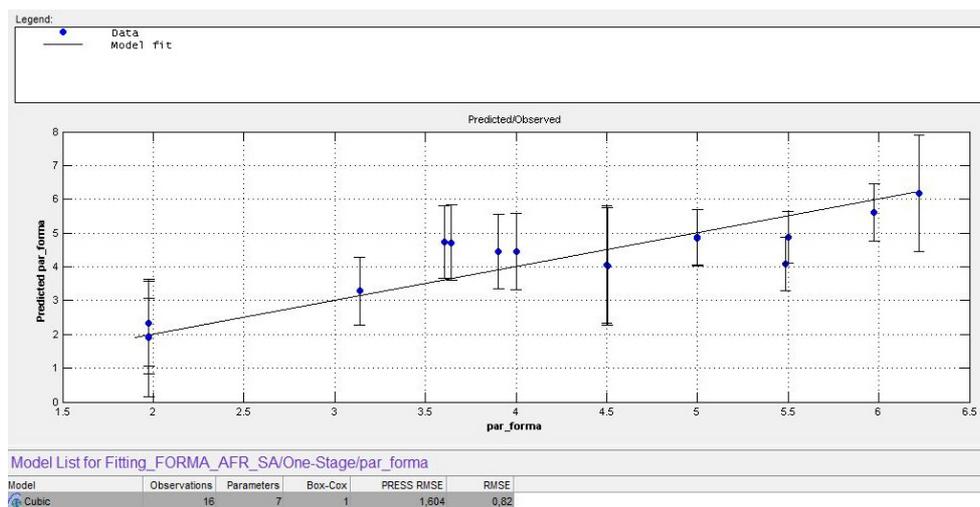


Figura 5-14 stima dell'errore quadratico medio della mappa parametro di forma

Di seguito viene riportato l'andamento della funzione distribuzione di probabilità con AFR costante al valore stechiometrico e delta anticipo di  $0^\circ$ ,  $+10^\circ$ ,  $+20^\circ$  e  $+30^\circ$ . Coerentemente con quanto detto per valori bassi di anticipo la tendenza a detonare è bassa e il mapo ha distribuzione normale, mentre per valori alti di anticipo la distribuzione è di tipo log-normale e la probabilità di avere cicli detonanti aumenta.

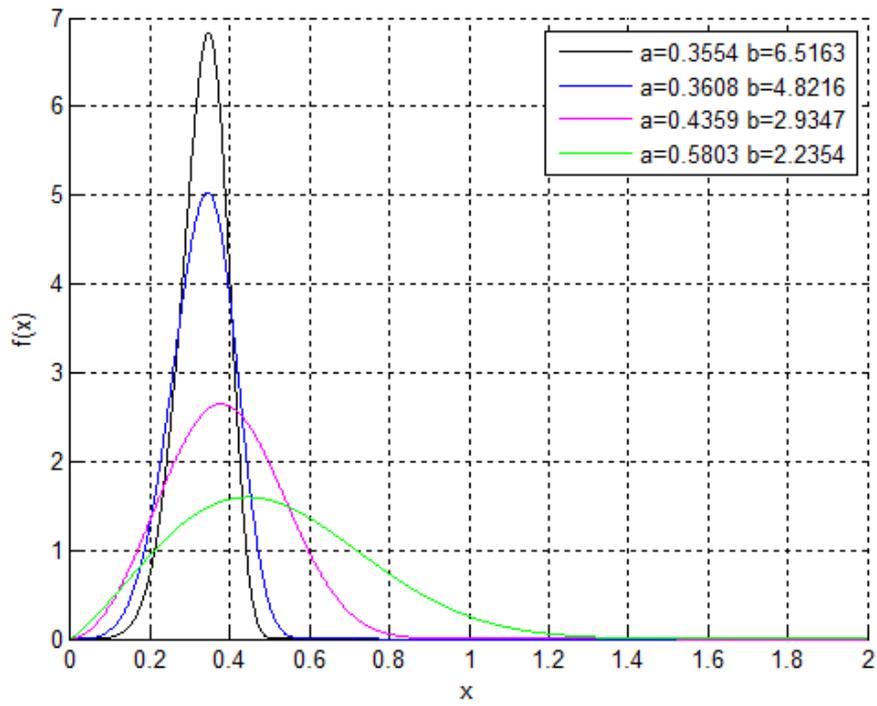


Figura 5-15 distribuzione simulata di MAPO per diversi valori di anticipo

# 6.MOTORE VIRTUALE

## 6.1. Generazione Pressione Media Indicata (PMI)

Attraverso anticipo e rapporto aria combustibile attuali si entra nella mappa di MFB50 e se ne ricava un valore medio; la deviazione standard di MFB50 si può porre, con buona approssimazione, direttamente proporzionale da AFR. Ora si combinano questi due valori in un blocco che seleziona un valore casuale di MFB50 da una distribuzione normale. Questo blocco simula la dispersione ciclica descritta nel capitolo 4.3; infatti come illustrato precedentemente MFB50 a parità di anticipo è normalmente distribuito. Con il valore ottenuto si ricava un valore di PMI normalizzato rispetto al valore massimo ottenibile con AFR stechiometrico. Il valore normalizzato viene moltiplicato per un fattore di scala in funzione di AFR attuale che corregge il valore di pressione media indicata.

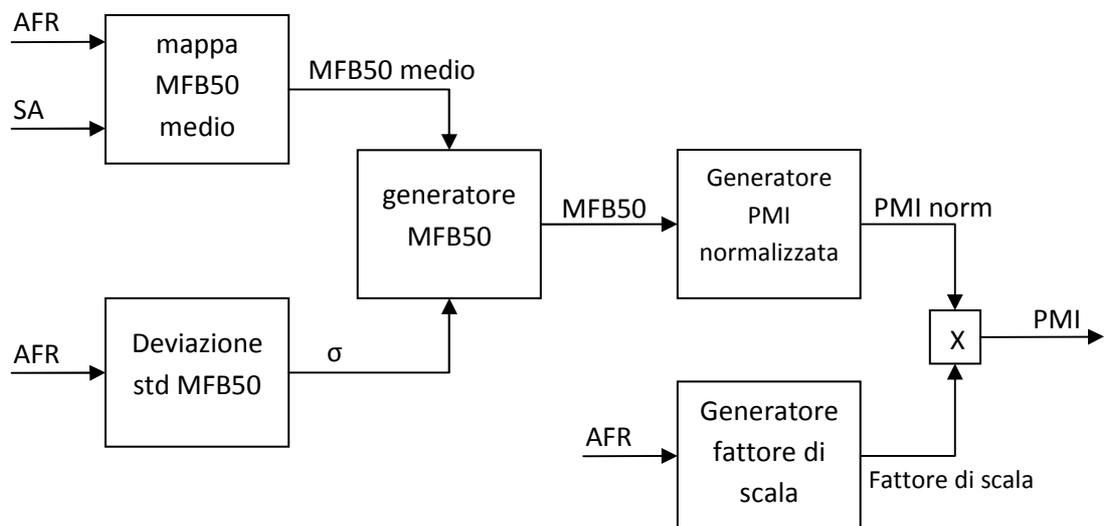


Figura 6-1 schema a blocchi algoritmo per la simulazione della pressione media indicata (PMI)

$$MFB50 = \overline{MFB50} + \sigma \cdot randn$$

Cioè un numero selezionato da una distribuzione normale caratterizzato da valor medio  $\overline{MFB50}$  e deviazione  $\sigma$ . *Randn* è una funzione di Matlab e fornisce un numero tra -1 e +1 normalmente distribuito.

Il blocco "generatore PMI normalizzata" è una cubica ottenuta interpolando i punti del piano PMI-MFB50 (AFR stechiometrico) e dividendola per il massimo valore che assume nell'intervallo  $-10^{\circ} \div +40^{\circ}$ ; entrando con un valore di MFB50 si ottiene un valore che può essere al massimo 1.

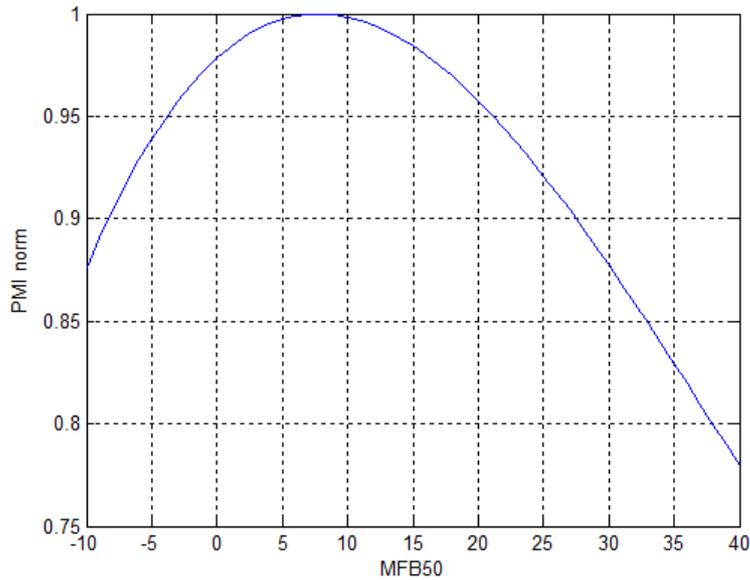


Figura 6-2 andamento PMI normalizzata in funzione di MFB50

Il blocco "generatore fattore di scala" è una parabola ottenuta interpolando il valore della PMI delle prove con anticipo costante (delta a  $+8^{\circ}$ ) e AFR variabile. Entrando con il valore di AFR attuato si ottiene la pressione media indicata massima che è possibile generare.

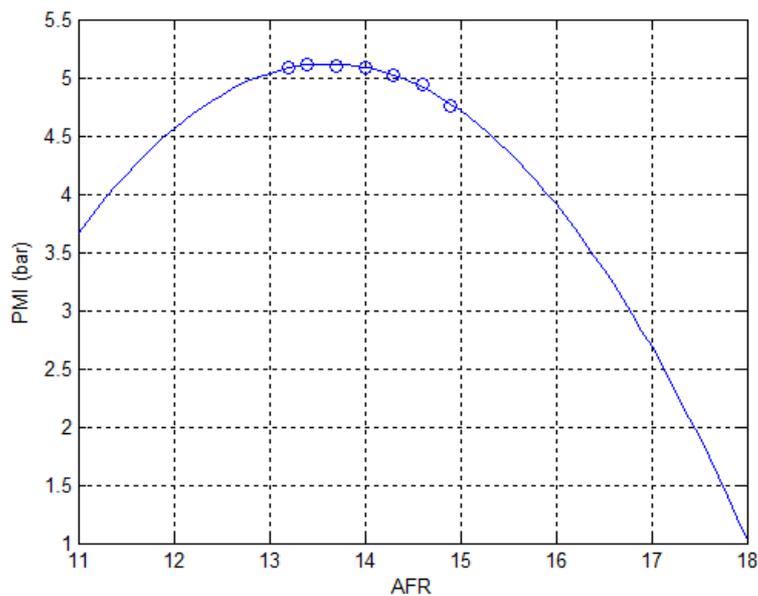


Figura 6-3 andamento PMI in funzione della composizione della miscela. I punti evidenziati sono i dati sperimentali

## 6.2. Generazione temperatura dei gas di scarico.

Attraverso anticipo e rapporto aria combustibile attuali si entra nella mappa delle temperature di scarico, al valore ottenuto si sottrae il minimo valore presente nella mappa ottenendo così una temperatura normalizzata il cui valore minimo è 0. Questa operazione è stata eseguita perché nella definizione della funzione di merito il valore della temperatura deve partire da 0.

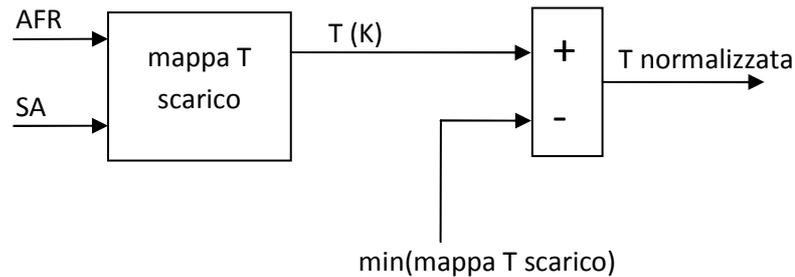


Figura 6-4 schema a blocchi algoritmo per la simulazione delle temperatura dei gas di scarico normalizzata

## 6.3. Generazione di MAPO

Attraverso anticipo e rapporto aria combustibile attuali si entra in due mappe, la prima fornisce il parametro di forma la seconda fornisce il parametro di scala della distribuzione Weibull. Il blocco successivo genera un valore random di MAPO da una distribuzione di Weibull descritta dai due parametri precedenti.

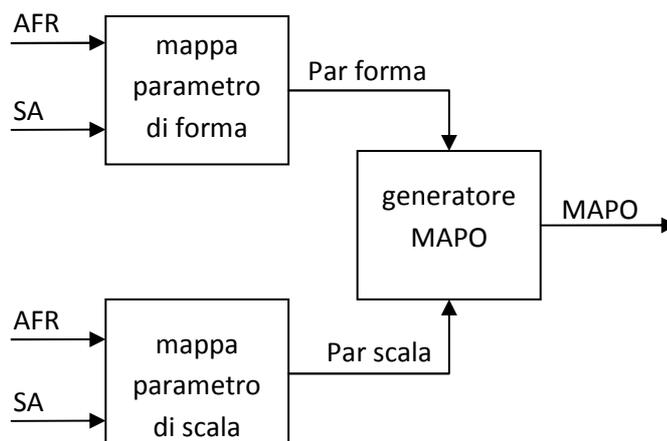


Figura 6-5 schema a blocchi algoritmo per la simulazione del MAPO

Il blocco "generatore MAPO" si basa sulla seguente funzione di Matlab:

$$MAPO = \text{random}('wbl', \text{parscala}, \text{parforma})$$

Il quale genera un valore random di una distribuzione weibull (wbl), descritta dal parametro di forma e di scala.

# 7.CONTROLLORE 1.0

## 7.1. Generalità sul controllo ottimo

Il controllo automatico di un dato sistema dinamico si prefigge di modificare il comportamento del sistema da controllare (ovvero le sue uscite) attraverso la manipolazione delle grandezze d'ingresso. Ad esempio può richiedersi che l'uscita rimanga costante ad un valore prefissato al variare dell'ingresso (controllo semplice) oppure segua fedelmente la dinamica dell'ingresso stesso (sistema di asservimento) a meno di amplificazioni e ritardi.

Spesso alla base di uno studio attento delle specifiche dinamiche di un sistema vi è la motivazione di ricercare il comportamento "migliore" rispetto a determinati obiettivi. Quando questi motivi appaiono in forma esplicita, la cornice naturale nella quale ascrivere il problema è quella del controllo ottimo.

Obiettivo del controllo ottimo è determinare i segnali di controllo tali per cui il sistema da controllare soddisfi determinati vincoli fisici e allo stesso tempo renda minimo o massimo un qualche criterio scelto per misurarne le prestazioni.

La formulazione del problema del "controllo ottimo" classico richiede:

1. Un modello che descrive il comportamento del sistema dinamico da controllare
2. Un indice di comportamento che tiene conto delle specifiche desiderate e delle esigenze del progettista
3. La specificazione delle condizioni al contorno e dei vincoli fisici sugli stati e sul controllo

La struttura di un problema di controllo ottimo, nella versione più semplice, comprende un sistema dinamico (lineare o non lineare, a tempo continuo o a tempo discreto) per il quale possono essere assegnate le funzioni di ingresso. Vi è inoltre una funzione obiettivo il cui valore è determinato dal comportamento del sistema, ed è, in un certo senso, la misura della qualità della risposta del sistema. Il problema di controllo ottimo può essere formulato come selezione di quella funzione di ingresso che ottimizza (massimizza o minimizza) la funzione obiettivo.

Il controllo del sistema in esame viene affidato ad un altro sistema costruito appositamente, detto controllore, che viene progettato dopo uno studio preliminare del sistema da controllare per individuarne il modello matematico esatto, servendosi degli

strumenti messi a punto dalla teoria dei sistemi. Il controllo automatico di un sistema è possibile solo nella misura in cui il sistema stesso è raggiungibile e osservabile, cioè nella misura in cui è possibile portarlo in un dato stato interno agendo sui suoi ingressi, e risalire allo stato attuale del sistema basandosi sulle sue uscite.

## 7.2. Progetto controllore

Il fine di questa tesi di laurea è quello di progettare e impostare un controllore dell'ottimo senza l'ausilio di modelli del sistema controllato.

L'algoritmo creato è un ibrido e trae ispirazione dalla tecnica dell'Extremum Seeking.

Si tratta di un sistema closed-loop che va a regolare l'anticipo di accensione e il rapporto aria-combustibile utilizzando come input il segnale di pressione in camera (pressione indicata) e la temperatura dei gas di scarico con l'obiettivo di massimizzare una funzione di merito che verrà definita in seguito.

In aggiunta è stato implementato un limitatore dell'anticipo di accensione per il controllo della detonazione.

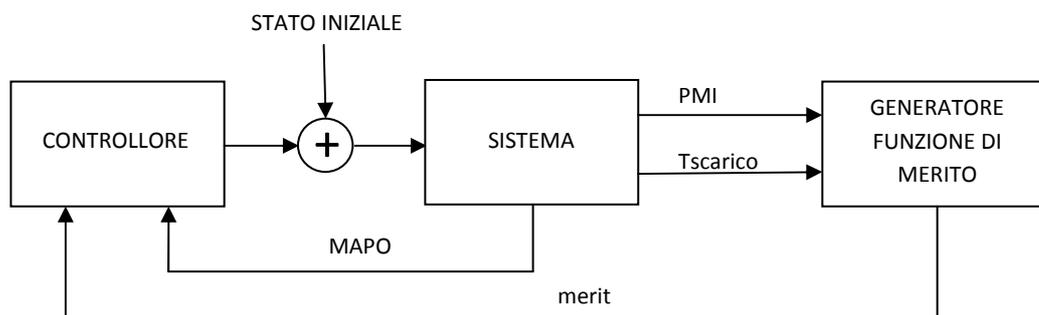


Figura 7-1 schema a blocchi procedura

## 7.3. Controllore

L'idea che sta alla base del controllore è quella di eccitare il sistema con due disturbi sinusoidali (uno per SA e uno per AFR) a frequenza nota e confrontare le loro fasi con le fasi delle armoniche della funzione di merito alla frequenza dei disturbi.

Si parte da un valore iniziale dell'anticipo di accensione e composizione della miscela e si sommano un disturbo sinusoidale di ampiezza e frequenza nota per le due grandezze.

I valori puntuali di SA e AFR influiscono sulla pressione media indicata (PMI) sulla temperatura dei gas di scarico e sulla tendenza alla detonazione; a sua volta la PMI puntuale e la temperatura dei gas di scarico vengono combinati per generare la funzione di merito da massimizzare che verrà descritta successivamente.

Il sistema è di tipo DIDO (*Dual Input Dual Output*) quindi i disturbi in input devono essere disaccoppiati per poi poterli riconoscere nel post trattamento della funzione di merito. Il disaccoppiamento scelto è basato sulla frequenza.

Il disaccoppiamento dei disturbi fa sì che il controllore sia organizzato in due macro-blocchi che vengono eseguiti in intervalli temporali differenti, richiedendo, rispettivamente, variazioni di anticipo e di AFR, con l'obiettivo di massimizzare la funzione di merito.

I periodi di oscillazione sono definiti come un numero intero di cicli motore, il macro-blocco del controllo su SA viene eseguito ogni  $zz$  cicli, il macro-blocco del controllo su AFR viene eseguito ogni  $ZZ$  cicli.  $zz$  e  $ZZ$  sono multipli interi rispettivamente del periodo del disturbo su SA e AFR.

Il periodo di oscillazione di AFR ( $T_{AFR}$ ) è maggiore rispetto al periodo di SA ( $T_{SA}$ ), perciò il controllo sull'anticipo girerà con frequenza maggiore.

$zz = k_1 T_{SA}$ ,  $ZZ = k_2 T_{AFR}$  con  $k_1$  e  $k_2$  interi e multipli.

Per esempio se  $zz=60$  e  $ZZ=300$  il blocco della correzione di AFR verrà eseguito ogni

$\frac{ZZ}{zz} = 5$  correzioni di SA.

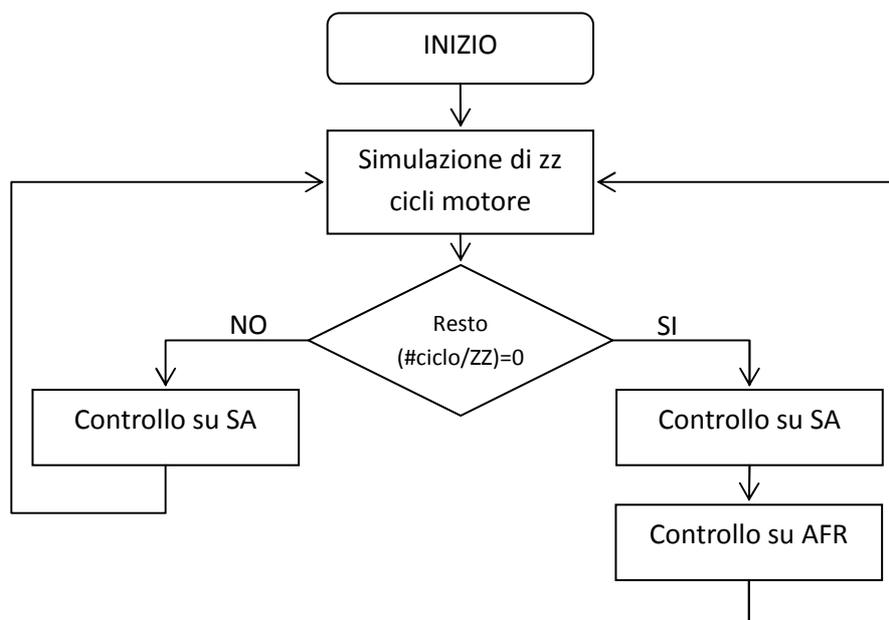


Figura 7-2 logica delle tempistiche del calcolo delle correzioni su anticipo e AFR

## 7.4. Funzione di merito

La funzione di merito viene calcolata considerando la pressione media indicata e la temperatura dello scarico generati attraverso il motore virtuale.

E' così definita

$$merit = PMI * \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{0.05 * (T_{lim} - T_{norm})}} \right)$$

Dove  $T_{norm} = T_{scarico} - \min(mappa T_{scarico})$  e  $T_{lim}$  è un valore intermedio tra il minimo e il massimo della mappa della temperatura dei gas di scarico.

In figura è stato rappresentato l'andamento di  $\left( 1 - \frac{1}{1 + e^{0.05 * (T_{lim} - T_{norm})}} \right)$  per diversi valori di  $T_{lim}$ .

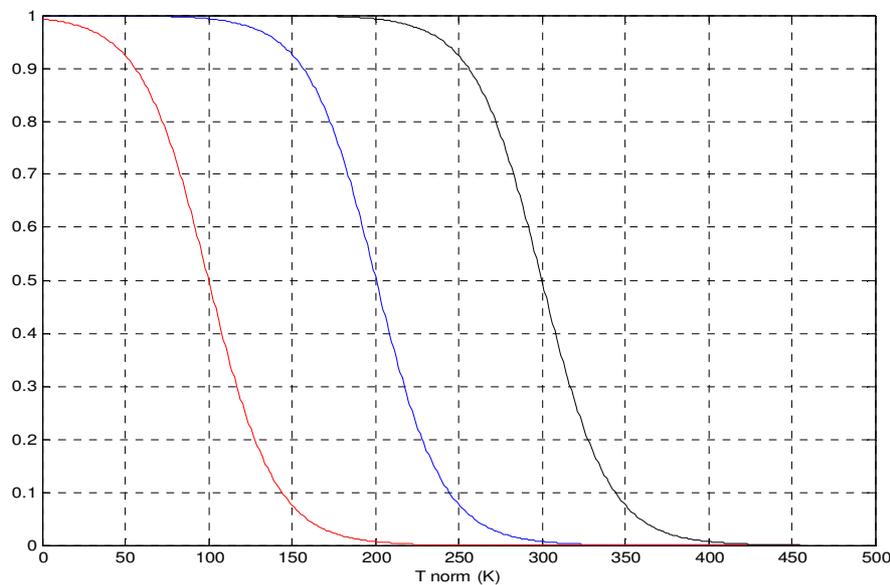


Figura 7-3 andamento di  $\left( 1 - \frac{1}{1 + e^{0.05 * (T_{lim} - T_{norm})}} \right)$  per  $T_{lim}$  100°C, 200°C e 300°C

## 7.5. Controllo sull'anticipo

Si inizia col memorizzare tanti valori di *merit* pari ad un multiplo del periodo di oscillazione del disturbo su SA (verranno indicati con il simbolo *zz*); la funzione di merito viene calcolata ogni ciclo motore per cui la frequenza di campionamento è pari a  $\frac{rpm}{2 \cdot 60}$

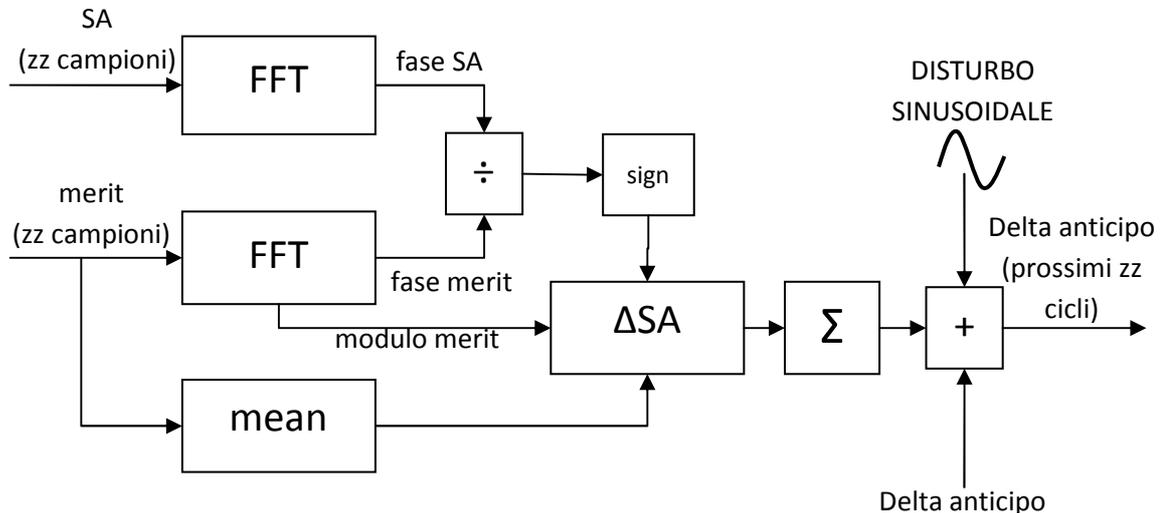


Figura 7-4 schema a blocchi logici controllore anticipativo

A questo punto si ha un numero sufficiente di campioni per poter farne un'analisi in frequenza della funzione di merito:

- Si calcola la trasformata di Fourier discreta (*FFT*) dell'anticipo sugli ultimi *zz* valori e se ne analizzano i fattori caratteristici (fase e ampiezza) alla frequenza del disturbo
- Si calcola la *FFT* di *merit* sugli ultimi *zz* valori e per l'armonica a frequenza pari alla frequenza del disturbo e ne vengono considerati ampiezza e fase.

Come prima cosa vengono comparate le fasi; se il loro rapporto è positivo significa che ci troviamo a sinistra del massimo, viceversa se il rapporto è negativo ci troviamo a destra del massimo. Questo sta ad indicare che nel primo caso bisognerà aumentare l'anticipo, mentre nel secondo caso bisognerà diminuirlo.

Osservando la figura 7-5 e ponendoci, per esempio, a sinistra del massimo ed eccitando il sistema con una sinusoide, si vede che quando SA aumenta anche *merit* aumenta; ciò sta ad indicare che ingresso ed uscita sono in fase. L'opposto accade se ci si pone a destra del massimo.

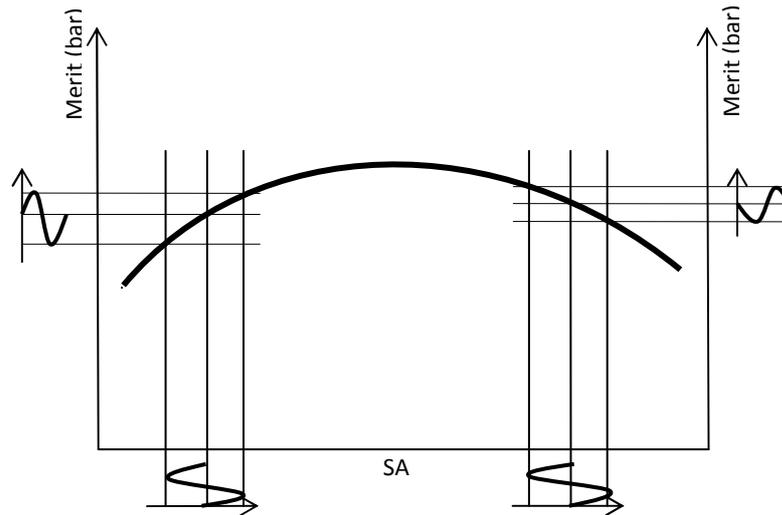


Figura 7-5

Il blocco  $\Delta SA$  determina l'offset delle variazioni dell'anticipo nei seguenti  $zz$  cicli. L'incremento o decremento è proporzionale al rapporto tra l'ampiezza del modulo dell'armonica e la media degli ultimi  $zz$  valori di *merit*, il tutto moltiplicato per una costante di guadagno.

La costante di guadagno viene selezionata tra due valori:

- se disturbo e *merit* sono in fase il guadagno è minore
- se disturbo e *merit* sono controfase il guadagno è doppio

questa condizione è stata aggiunta perché si è visto che la convergenza del controllore partendo da valori alti dell'anticipo è più lenta.

## 7.6. Controllo su AFR

Si inizia col memorizzare tanti valori di *merit* pari ad un multiplo del periodo di oscillazione del disturbo su AFR (verranno indicati con il simbolo ZZ).

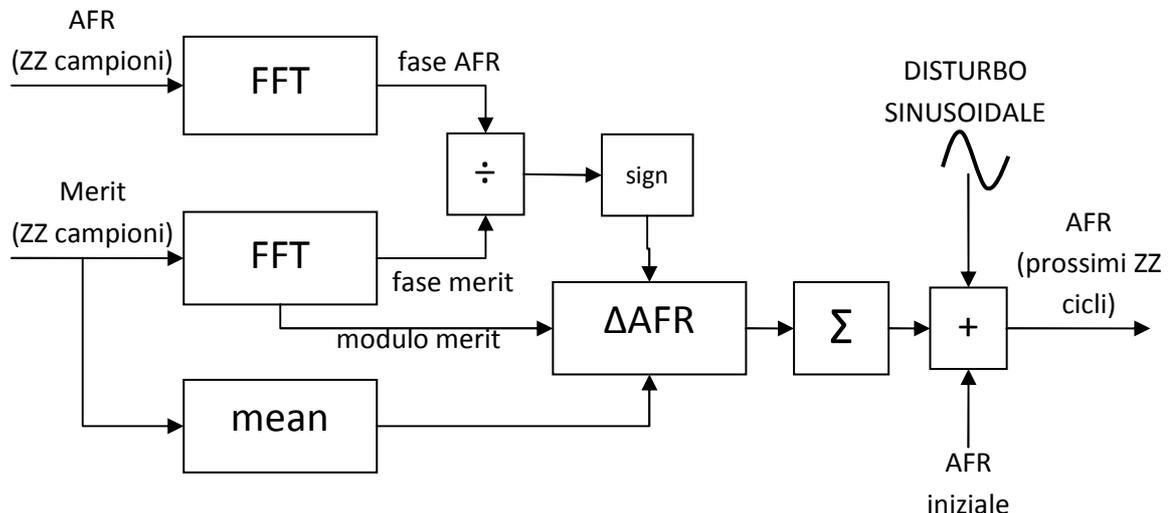


Figura 7-6 schema a blocchi logici controllore AFR

A questo punto si ha il numero sufficiente di campioni per fare un'analisi in frequenza della funzione di merito:

- Si calcola la trasformata di Fourier discreta (*FFT*) di AFR sugli ultimi ZZ valori e se ne analizzano i fattori caratteristici (fase e ampiezza) alla frequenza del disturbo
- Si calcola la *FFT* di *merit* sugli ultimi ZZ valori e per l'armonica a frequenza pari alla frequenza del disturbo vengono considerati ampiezza e fase.

Come prima cosa vengono comparate le fasi; se il loro rapporto è positivo significa che ci troviamo a sinistra del massimo, viceversa se il rapporto è negativo ci troviamo a destra del massimo. Questo sta ad indicare che nel primo caso bisognerà aumentare il rapporto aria combustibile, mentre nel secondo caso bisognerà diminuirlo.

Il blocco  $\Delta AFR$  determina l'offset delle variazioni di AFR nei seguenti ZZ cicli. L'incremento o decremento è proporzionale al rapporto tra l'ampiezza del modulo dell'armonica e la media degli ultimi ZZ valori di *merit*, il tutto moltiplicato per una costante di guadagno.

## 7.7. Controllo sul MAPO

Per il controllo del MAPO non si utilizza il valore puntuale ma il valore di MAPO sotto al quale stanno il 97% dei zz cicli, indicato con MAPO<sub>xx</sub>.

In una memoria vengono scritti i valori di anticipo massimo per dato AFR; il valore massimo viene ricavato monitorando l'indice di detonazione. Se per il valore attuale di AFR e SA si supera una soglia predefinita del MAPO<sub>xx</sub> allora per i seguenti zz cicli viene attuato un anticipo che è al massimo il minimo valore della sinusoide nei zz cicli attuali. Viceversa non viene imposto nessun limite.

La seconda versione del controllo della detonazione viene fatta limitando il delta anticipo massimo attuabile non appena si supera la soglia di MAPO<sub>xx</sub>. Il valore di anticipo che dà luogo a cicli mediamente troppo detonanti non potrà più essere superato.

## 8. Simulazioni controllore 1.0

### 8.1. Scelta dei parametri del controllore

I parametri che influenzano il controllore sono le frequenze di oscillazione dei disturbi sinusoidali, le finestre di osservazione della funzione di merito per il controllo dell'anticipo e del rapporto aria combustibile e le due costanti di guadagno per la determinazione dei delta anticipo e delta AFR comandati:

- $freq\_sa$  frequenza disturbo sull'anticipo di accensione
- $freq\_afr$  frequenza disturbo su AFR
- $zz = k_1 \frac{1}{freq\_sa}$  finestra di osservazione di *merit* per il controllo sull'anticipo di accensione
- $ZZ = k_2 \frac{1}{freq\_afr}$  finestra di osservazione di *merit* per il controllo su AFR
- $kadv$  costante di guadagno controllo anticipo di accensione
- $kafr$  costante di guadagno controllo AFR

Tutti questi parametri determinano la dinamica del controllore, nonché la sua precisione a regime.

Il comportamento del motore è differente in base ai valori iniziali di anticipo e AFR; perciò si è dovuto cercare un set di parametri di compromesso che fornisca dei buoni risultati per tutti i tipi di prove in cui è stato testato.

L'obiettivo è quello di far convergere la funzione di merito, precedentemente definita, nel più breve tempo possibile e partendo da valori diversi di delta anticipo e AFR.

Le prove sono:

1. delta anticipo iniziale e AFR iniziale bassi
2. delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale basso
3. delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto
4. delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto

Ogni prova è stata fatta con i seguenti valori dei parametri sopra definiti:

- $freq\_sa$  1/20, 1/40 e 1/60 cicli motore

- $freq\_afr$  1/100 e 1/200 cicli motore
- $k_1$  3 e 6
- $k_2$  3 e 6
- $kadv$  1.00, 1.375, 1.75, 2.125 e 2.50
- $kafr$  0.150, 0.2375, 0.325, 0.4125 e 0.500

Per un totale di  $3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 5 = 600$  prove simulate da 18000 cicli motore ciascuna.

Per ogni prova sono stati memorizzati l'andamento dell'anticipo di accensione, l'andamento di AFR, l'andamento della funzione di merito e una matrice che con per ogni prova tiene memoria del valore dei vari parametri.

Per valutare ogni prova si è calcolata la sovra-elongazione e il numero di cicli per far andare a regime l'anticipo e AFR. Di tutte le prove si sono scartate tutte quelle che non mandano a regime le due grandezze controllate e quelle che impiegano più di 3000 cicli per regimare.

La prova  $n^{\circ}1$  fornisce 46 combinazioni di parametri che sono in grado soddisfare i requisiti richiesti. La prova  $n^{\circ}2$  ne fornisce 2, la  $n^{\circ}3$  10 e la  $n^{\circ}4$  7.

Incrociando i risultati si ottengono due set di parametri che permettono di soddisfare le specifiche di precisione e velocità.

$freq\_sa$	1/20	1/20
$freq\_afr$	1/100	1/100
$zz$	60	60
$ZZ$	300	300
$kadv$	2.125	2.500
$kafr$	0.500	0.500

**Tabella 8-1 set di parametri ottimi**

Come detto questi due set di parametri sono un compromesso, il set ottimo per ogni prova è diverso da prova a prova.

I due set di parametri permettono di ottenere grossomodo gli stessi risultati.

## 8.2. Prova 1: delta anticipo iniziale e AFR iniziale bassi

La simulazione viene inizializzata con delta anticipo  $2^\circ \pm 2^\circ$  e AFR  $12 \pm 0.2$ .

Il controllore ogni 60 cicli motore esegue il controllo sull'anticipo e calcola un incremento (o decremento) da sommare al valor medio dei cicli precedenti.

In figura si vede come dopo circa 1000 cicli si arriva al valore di regime che è attorno ai  $+13.5^\circ$  rispetto al valore di mappa. Le evidenti oscillazioni a regime sono da imputare alla costante di guadagno elevata. La seconda figura mostra il delta anticipo filtrato passa basso con frequenza di taglio pari a  $1/20$  cicli.

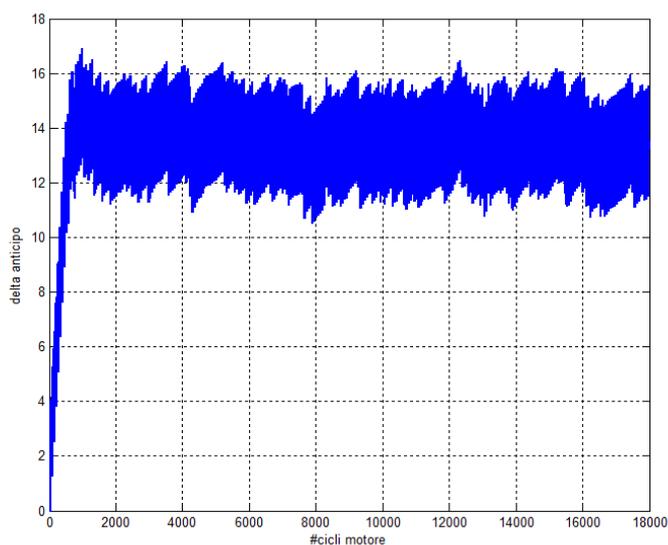


Figura 8-1 delta anticipo attuato

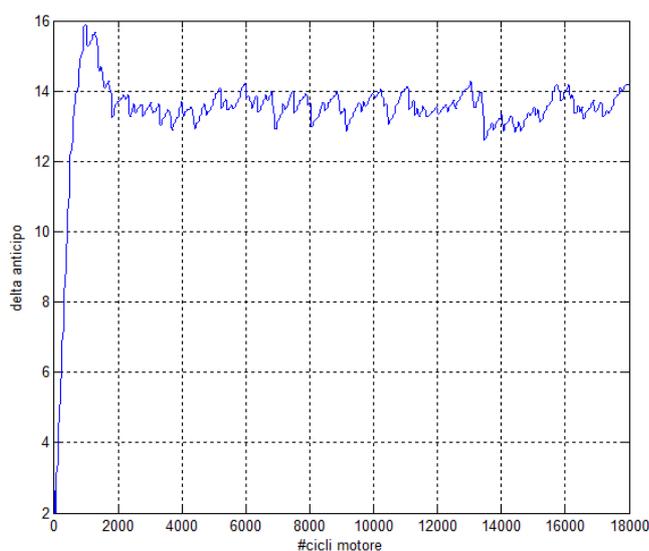
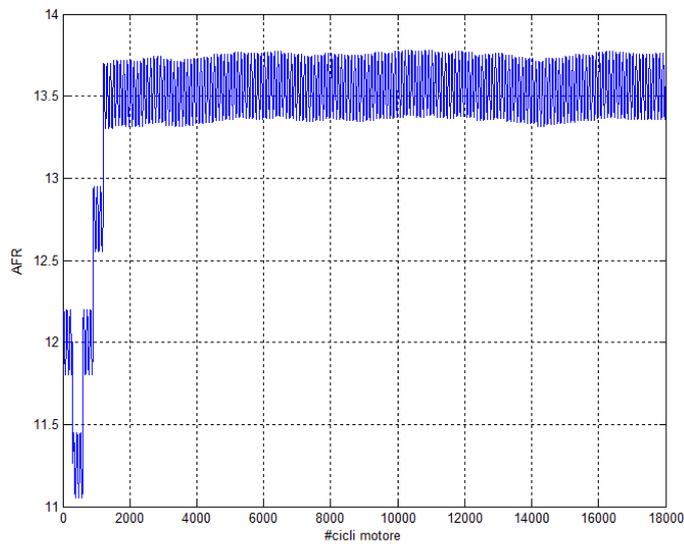


Figura 8-2 delta anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio  $1/20$  campioni)

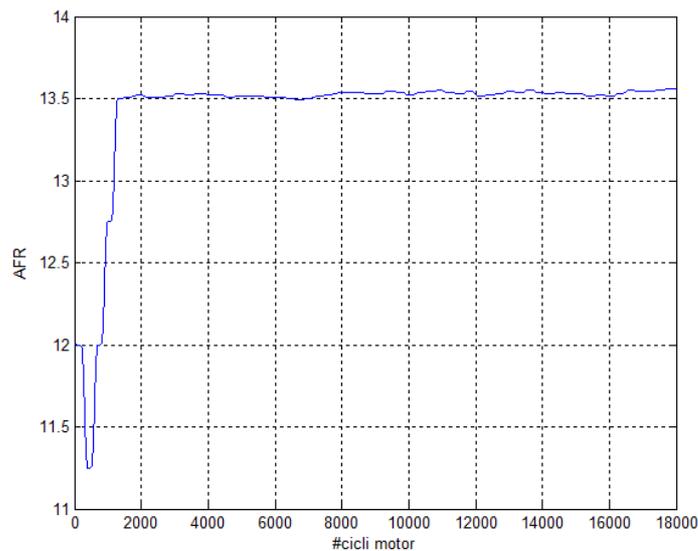
Ogni 300 cicli motore il controllore esegue il controllo sulla composizione della miscela e al passo 1200 AFR converge a circa 13.5.

La prima correzione viene fatta erroneamente nel senso opposto: il motivo è da imputare alla fase dell'armonica della funzione di merito alla frequenza del disturbo su AFR che è opposta alla fase del disturbo (in altre parole sono controfase); la freccia in figura 8-5 mette in evidenza questo fatto.

Dopo il primo passo di calcolo, essendo le due armoniche in fase, le correzioni vengono eseguite correttamente, portando il rapporto aria combustibile al valore di regime.



**Figura 8-3 AFR attuato**



**Figura 8-4 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**

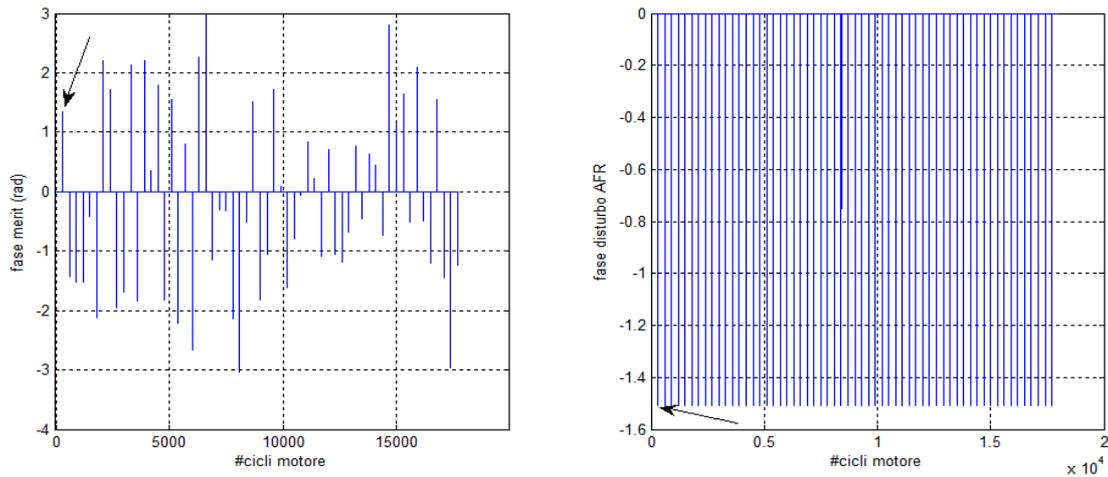


Figura 8-5

Nella figura 8-6 si può notare che nella prima parte della procedura di calcolo ci sia una forte correlazione tra l'anticipo di accensione e la funzione di merito, infatti si nota chiaramente la stessa frequenza di oscillazione delle due grandezza.

La correlazione tra AFR e *merit* emerge dal ciclo 300 in avanti. Non essendoci una chiara "firma" del disturbo di AFR sui primi 300 campioni l'algoritmo compie un errore. Non appena l'anticipo inizia ad aumentare *merit* diventa sensibile al disturbi su AFR, il controllore si accorge di questo fatto e inizia a correggere correttamente.

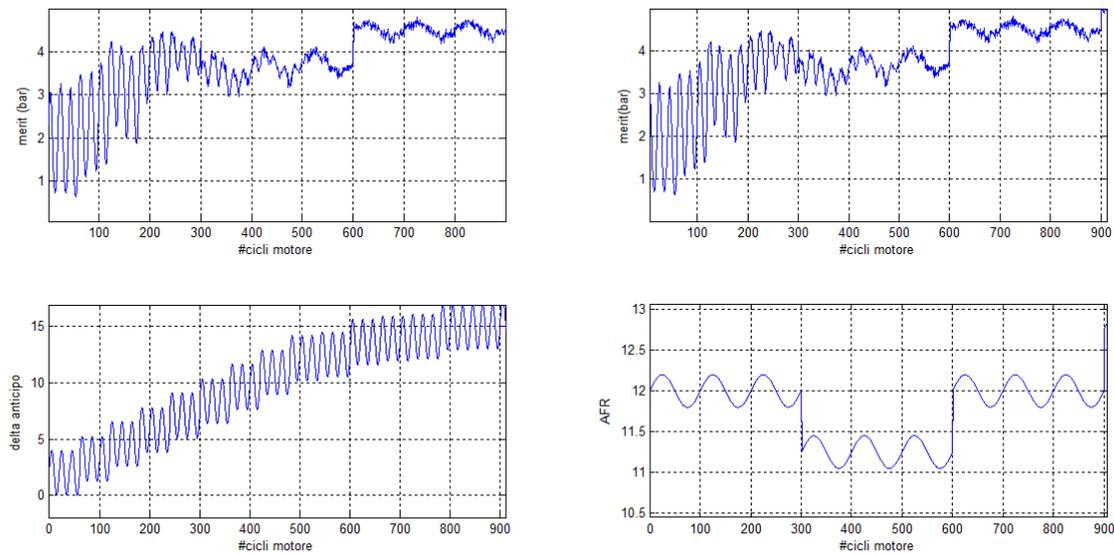
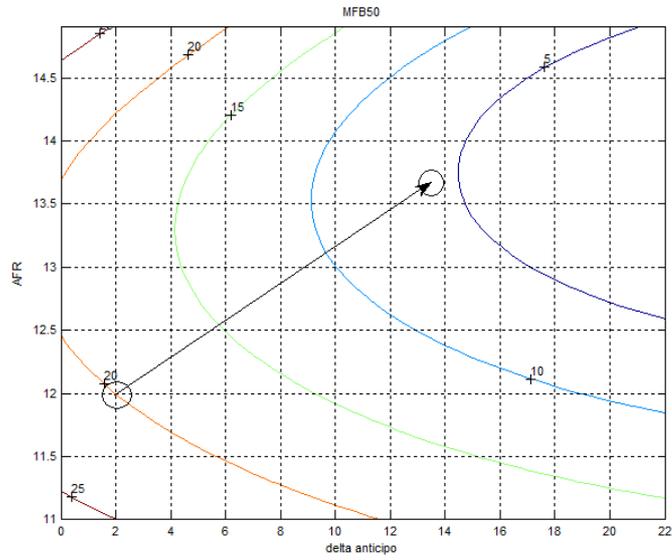
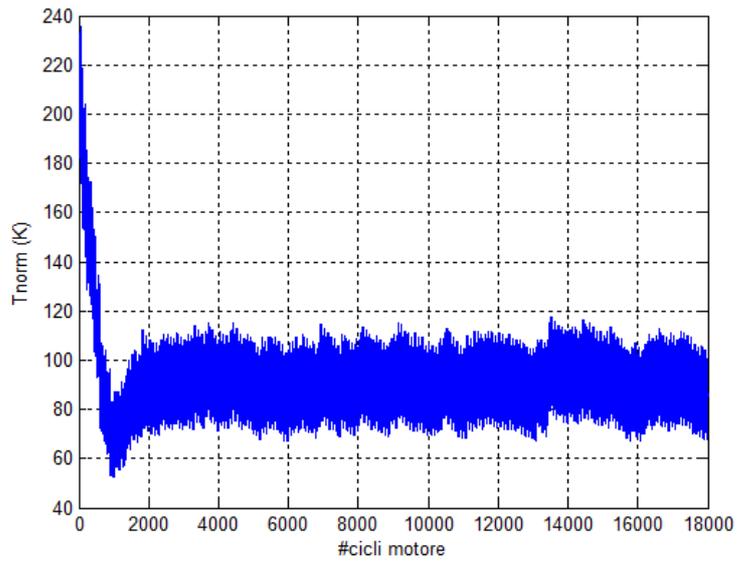


Figura 8-6

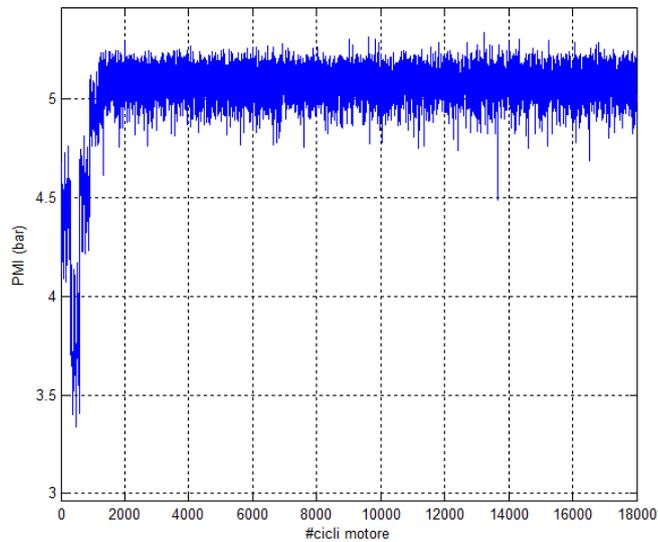
Il controllore porta il motore da una fase di combustione media iniziale di  $20^\circ$  a una finale media di circa  $6^\circ$ . I risultati sono soddisfacenti perché effettivamente come si vede in figura 6-2 il massimo della pressione media indicata si ottiene con un MFB50 di circa  $6^\circ$ .



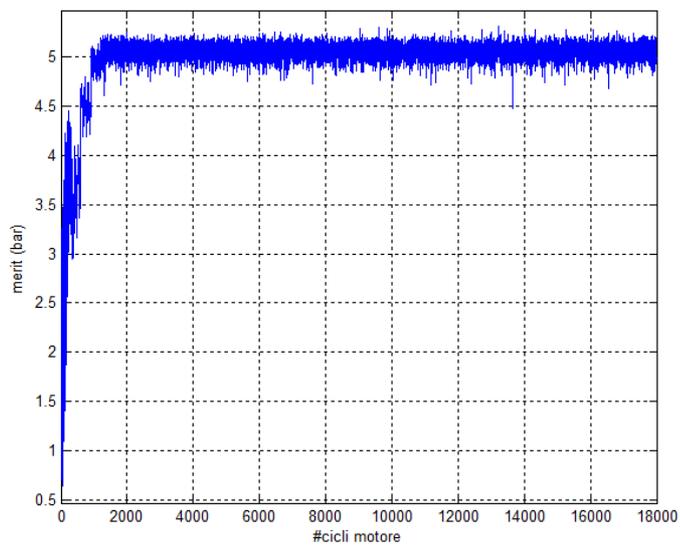
**Figura 8-7 stato iniziale e finale del sistema sulla superficie MFB50**



**Figura 8-8 temperatura gas di scarico normalizzata**



**Figura 8-9 pressione media indicata**



**Figura 8-10 funzione di merito**

Il controllore non attua nessuna limitazione del delta anticipo perché MAPO si mantiene  
 La figura di sinistra mostra il valore puntuale del MAPO e quella di destra il MAPO<sub>xx</sub>  
 cioè il valore di MAPO limite sotto il quale stanno il 97% di *zz* cicli motore.  
 Il controllore non limita il delta anticipo perchè mai MAPO<sub>xx</sub> supera 0.9 bar.

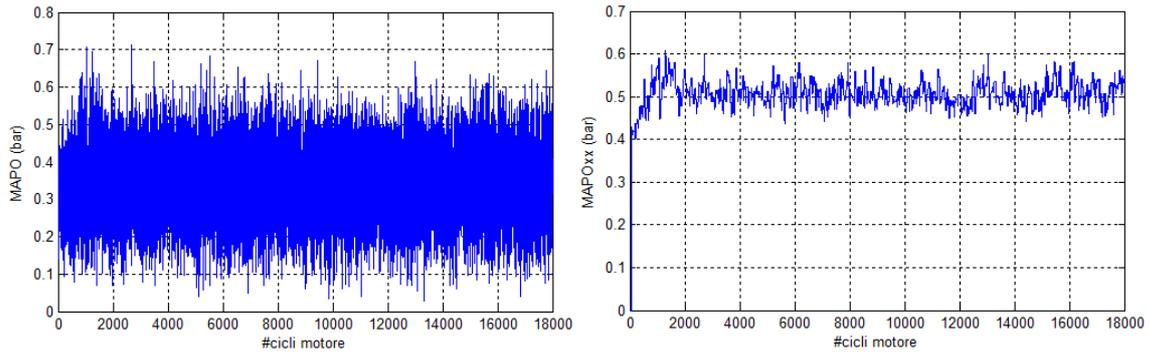


Figura 8-11 MAPO e MAPOxx limite

### 8.3. Prova 2: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale basso

La simulazione viene inizializzata con delta anticipo  $26^\circ \pm 2^\circ$  e AFR  $12 \pm 0.2$ .

Il delta anticipo va a regime al valore di circa  $13.5^\circ$  dopo circa 2000 cicli motore.

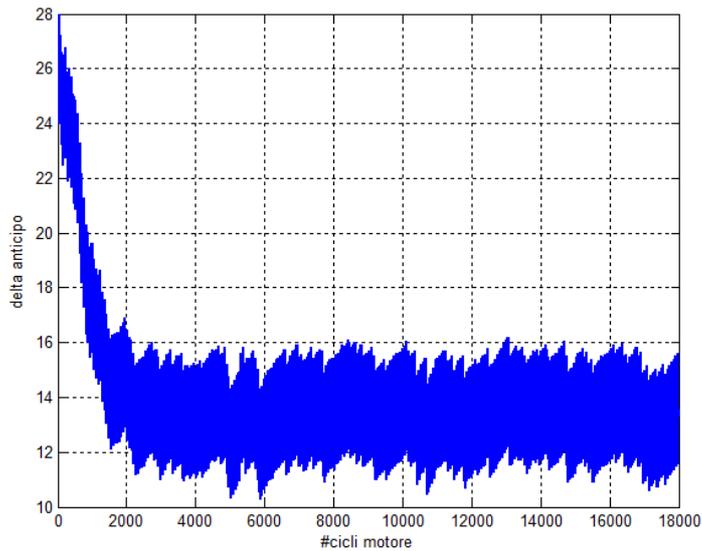
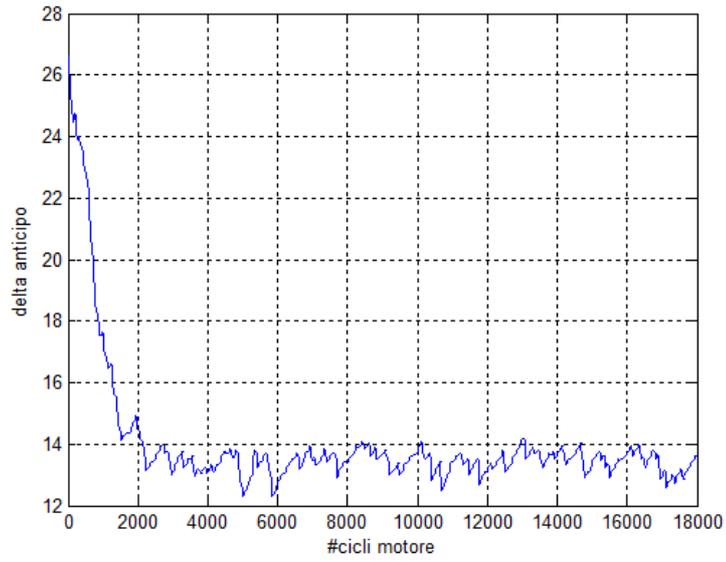
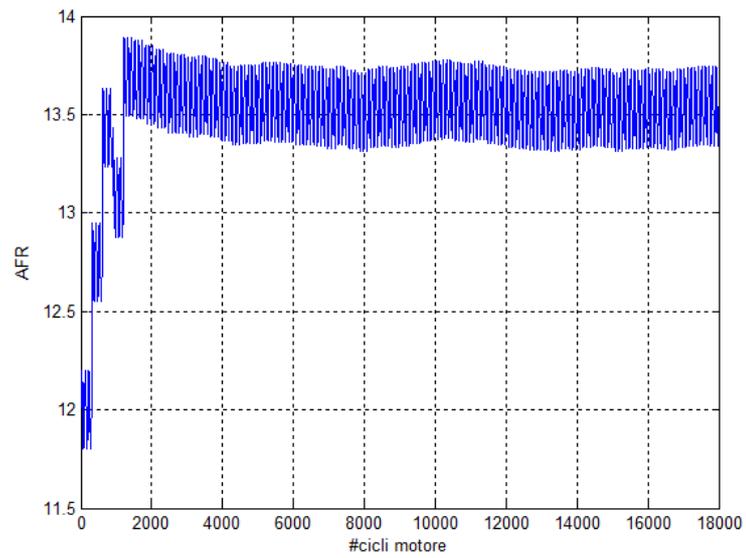


Figura 8-12 delta anticipo attuato



**Figura 8-13 delta anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**

AFR converge più lentamente al valore di 13.55 rispetto alla simulazione precedente.



**Figura 8-14 AFR attuato**

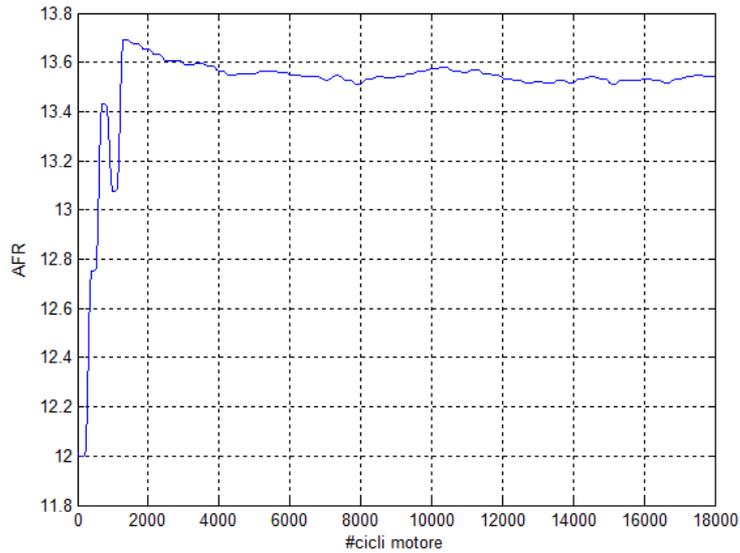


Figura 8-15 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)

Il controllore porta il motore da una fase di combustione media iniziale di  $8^\circ$  a una finale media di circa  $6^\circ$ . I risultati sono soddisfacenti perché effettivamente come si vede in figura (mettere il nome delle figure) il massimo della pressione media indicata si ottiene con un MFB50 tra 5 e  $10^\circ$ .

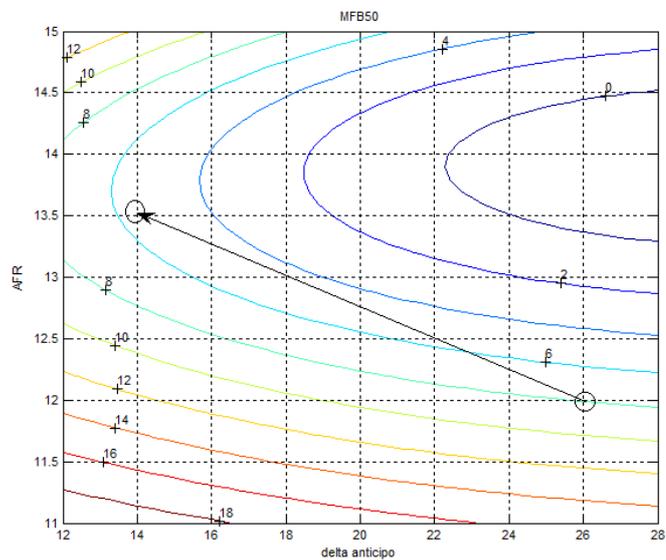
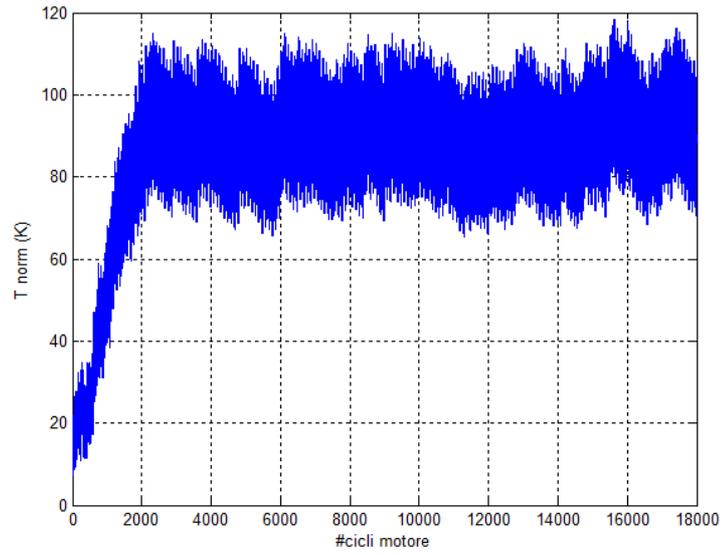
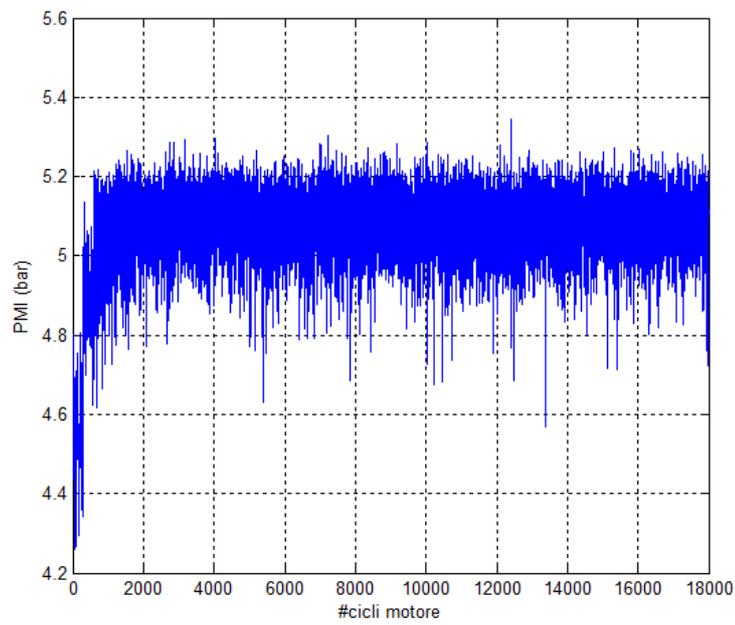


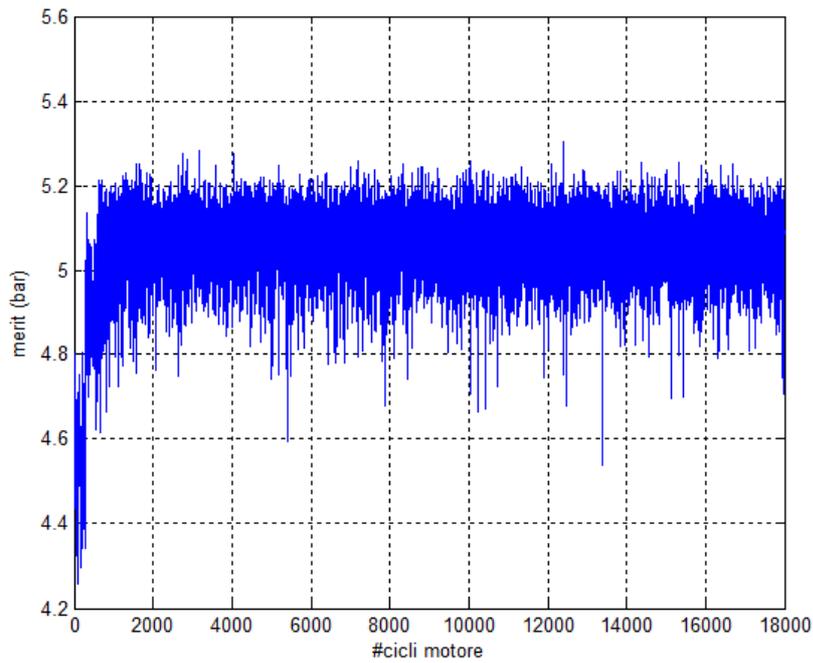
Figura 8-16 stato iniziale e finale del sistema sulla superficie MFB50



**Figura 8-17 temperatura gas di scarico normalizzata**

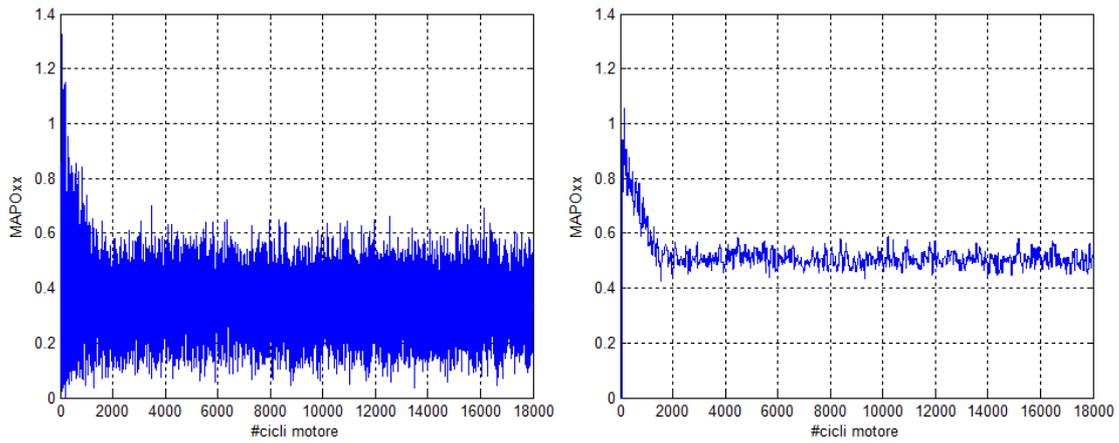


**Figura 8-18 pressione media indicata**



**Figura 8-19 funzione di merito**

Il MAPOxx supera il valore limite di 0.9 bar solo nei primi  $zz$  cicli, ma di fatto non viene posta nessuna limitazione all'anticipo perché nei  $zz$  cicli seguenti il controllo eseguito esaminando la funzione di merito lo diminuisce di una quantità che non provoca più detonazione.



**Figura 8-20 MAPO e MAPOxx limite**

#### 8.4. Prova 3: delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto

La simulazione viene inizializzata con delta anticipo  $2^\circ \pm 2^\circ$  e AFR  $17 \pm 0.2$ .

Dopo circa 2000 cicli sia l'anticipo che il rapporto aria combustibile regimano rispettivamente a  $13.5^\circ$  e 13.6.

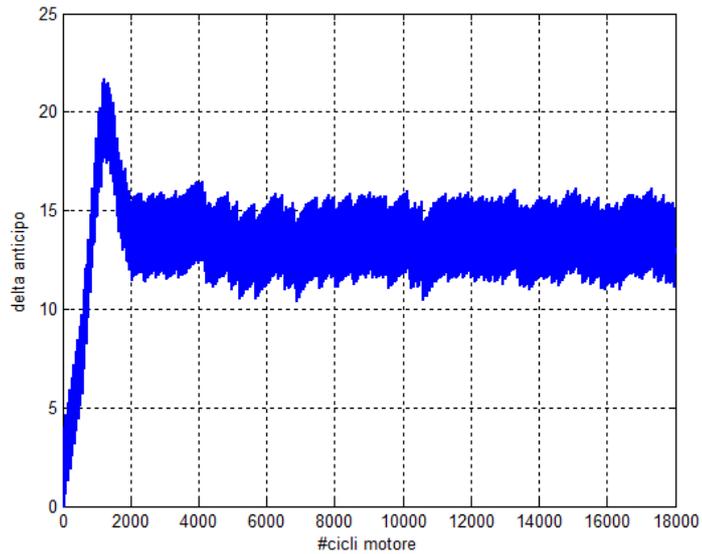


Figura 8-21 delta anticipo attuato

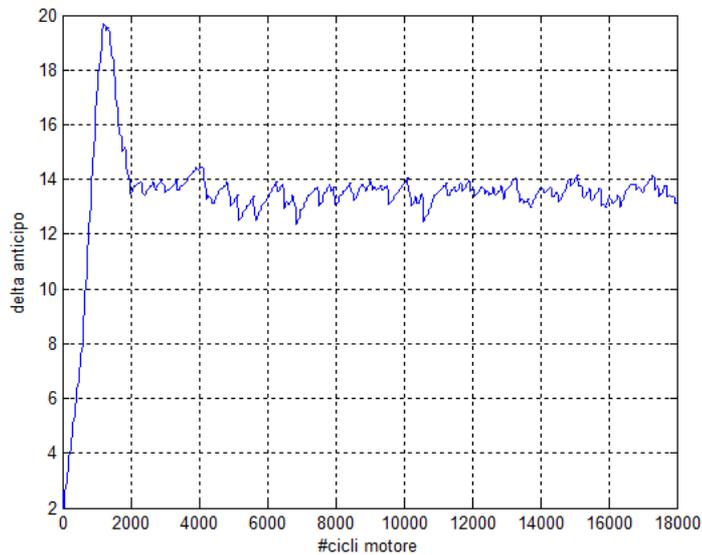
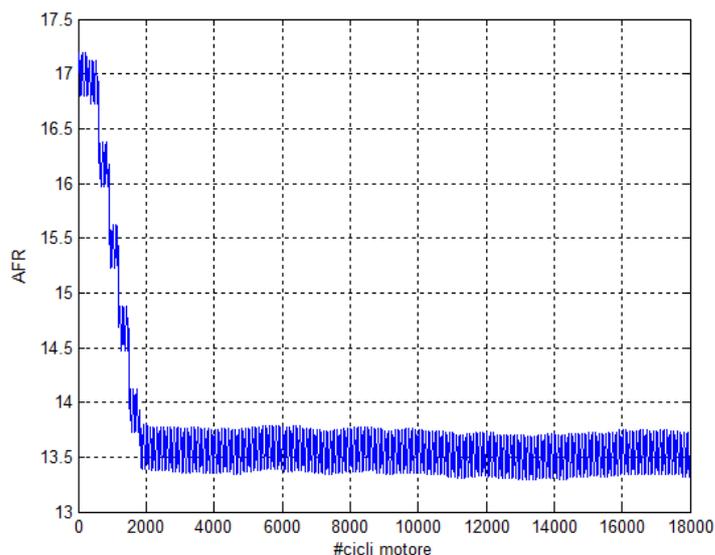
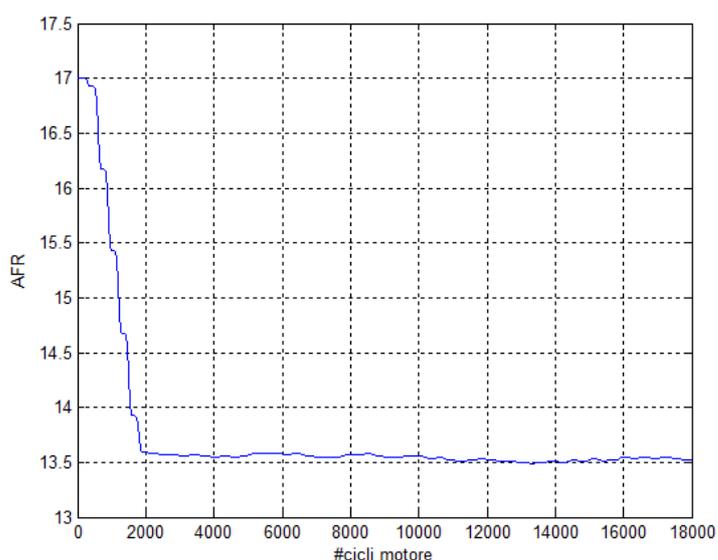


Figura 8-22 delta anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)



**Figura 8-23 AFR attuato**



**Figura 8-24 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**

La dinamica del controllo sull'anticipo è più veloce rispetto a quella su AFR. Nei primi 1000 cicli AFR è ancora lontano dal suo ottimo e l'unico modo per far calare MFB50 (cioè far aumentare la PMI e quindi *merit*) è anticipare l'accensione; per questo motivo viene mandato a circa  $20^\circ$  quando AFR è ancora maggiore di 15. Quando però anche AFR cala per portare MFB50 al valore ottimo, che ricordiamo essere vicino ai  $6^\circ$ , l'anticipo deve diminuire.

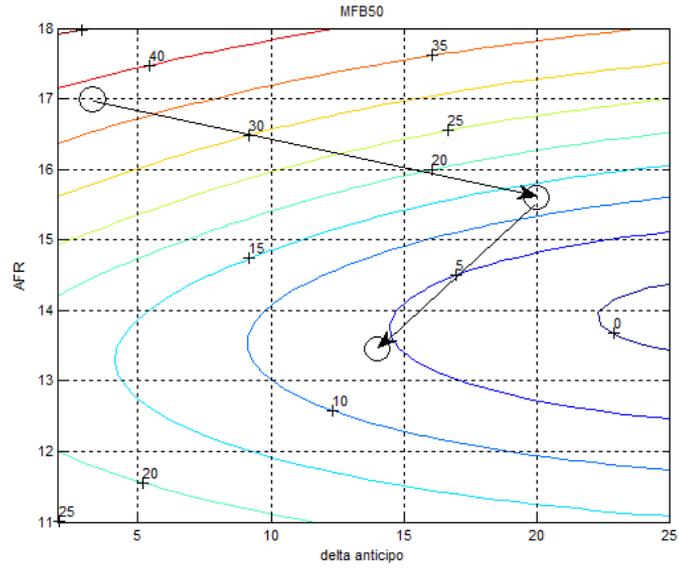


Figura 8-25 stato iniziale e finale del sistema sulla superficie MFB50

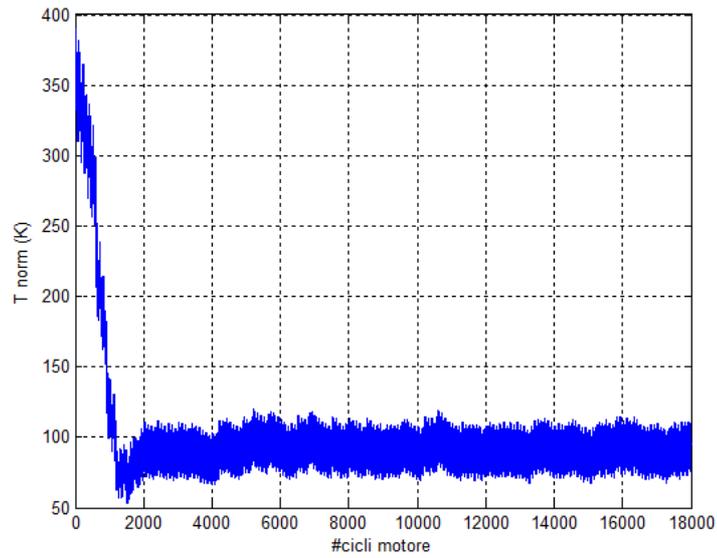
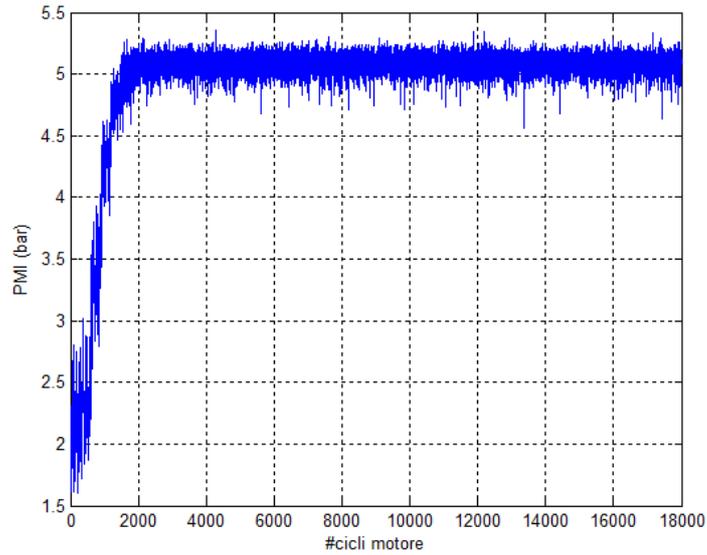
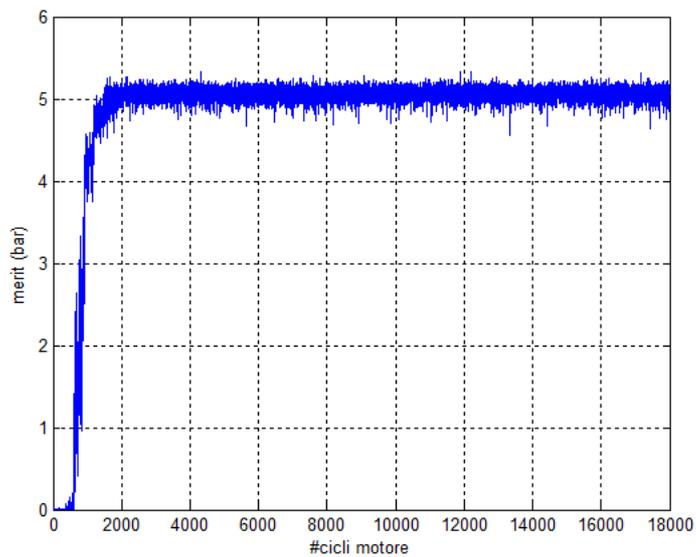


Figura 8-26 temperatura normalizzata gas di scarico



**Figura 8-27 pressione media indicata**



**Figura 8-28 funzione di merito**

Il controllore non attua nessuna limitazione del delta anticipo perchè il MAPO si mantiene

Il controllore non limita il delta anticipo perchè mai MAPO<sub>xx</sub> supera 0.9 bar.

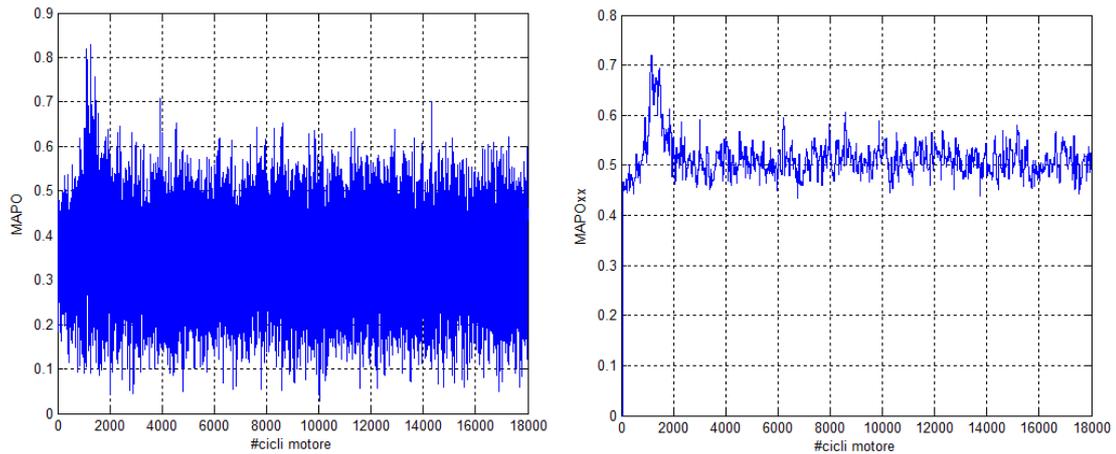


Figura 8-29 MAPO e MAPOxx limite

### 8.5. Prova 4: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto

La simulazione viene inizializzata con delta anticipo  $26^\circ \pm 2^\circ$  e AFR  $17 \pm 0.2$ .

Dopo circa 3000 cicli sia l'anticipo che il rapporto aria combustibile regimano rispettivamente a  $13.5^\circ$  e 13.6.

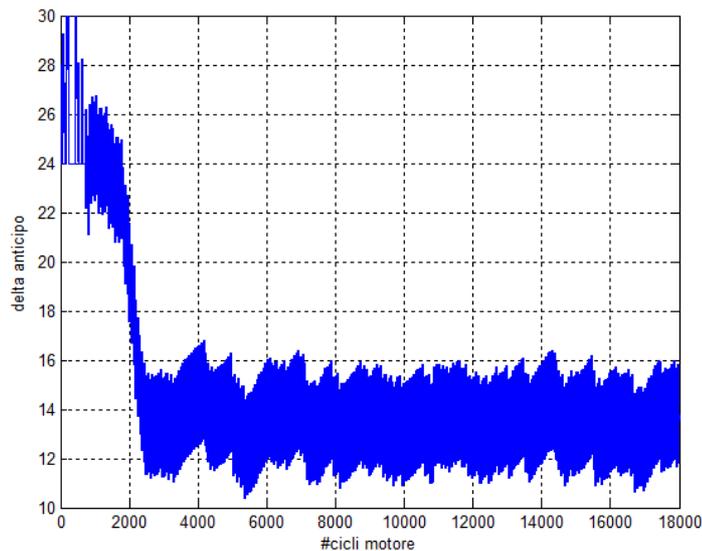
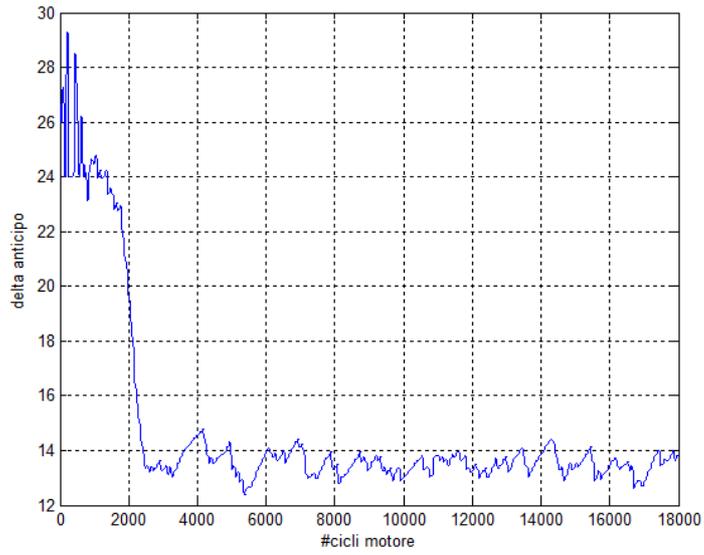
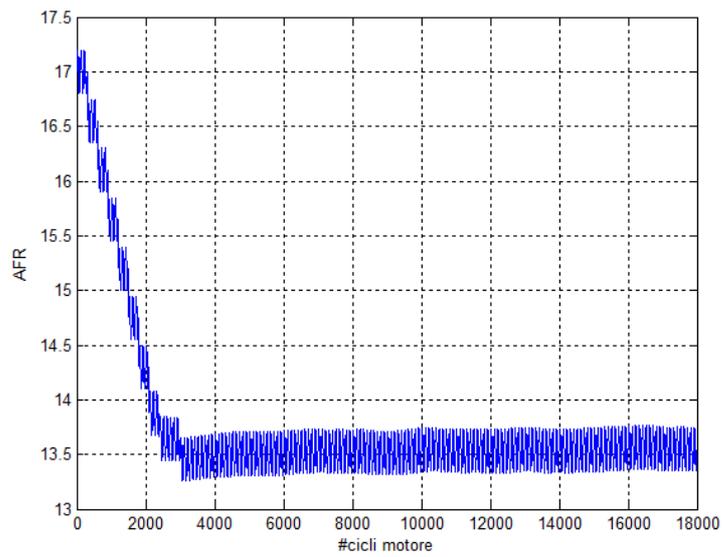


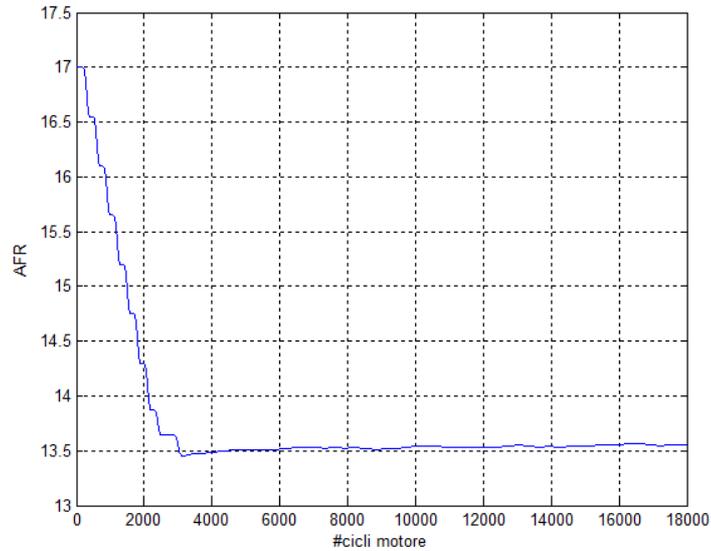
Figura 8-30 delta anticipo attuato



**Figura 8-31 delta anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**



**Figura 8-32 AFR attuato**

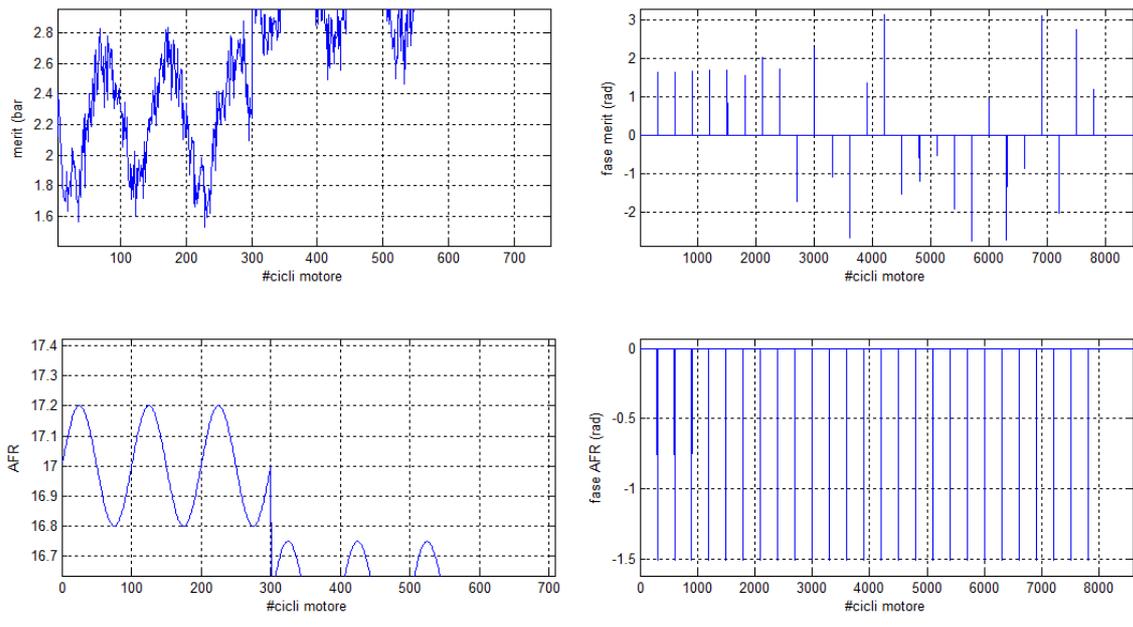


**Figura 8-33 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**

Di tutte le prove questa è la più lenta a convergere, il motivo sta nel gradiente locale della mappa MFB50 fino al ciclo 1000. Come si vede in figura 8-36 la sensibilità di MFB50 dal delta anticipo per AFR fino a 15 è molto bassa (le curve iso-MFB50 vengono attraversate in obliquo).

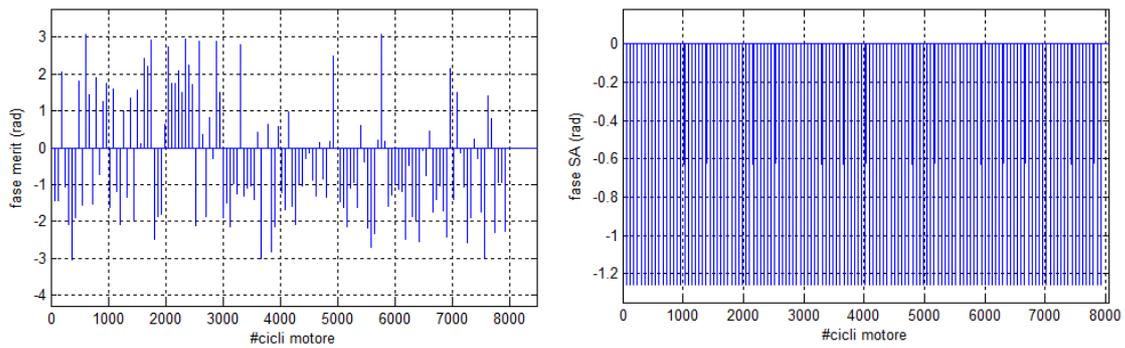
AFR viene modificato correttamente fin dall'inizio perché è in contro fase con *merit*, e viene diminuito (figura 8-34); nei primi step SA viene erroneamente incrementato perché è in fase con *merit* (figura 8-35). Solamente quando la composizione della miscela scende sotto 15.0 allora le due grandezze sono controfase e il controllore inizia a togliere anticipo portando il motore nel punto di funzionamento ottimo.

Come si vede nella figura 8-34 seguente c'è una forte correlazione tra *merit* e AFR e si nota chiaramente che sono controfase.



**Figura 8-34**

In figura sono riportate le fasi dell'armonica a frequenza del disturbo di SA e le fasi del disturbo calcolate ogni  $zz$  cicli; nei primi passi i due segnali sono in fase e il controllore crea dei delta anticipo positivi. Dal ciclo 1000 al ciclo 3000 ciclo il numero di volte in cui si è controfase è maggiore e complessivamente delta SA viene diminuito fino al valore di  $13.5^\circ$



**Figura 8-35**

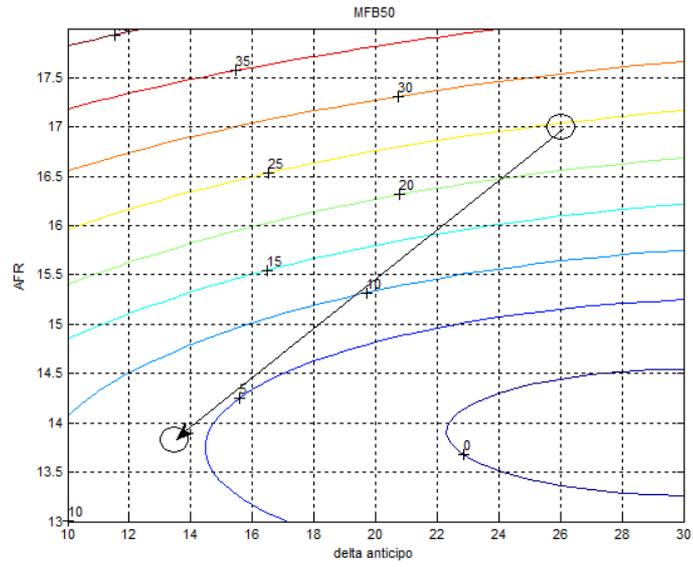


Figura 8-36 stato iniziale e finale del sistema sulla superficie MFB50

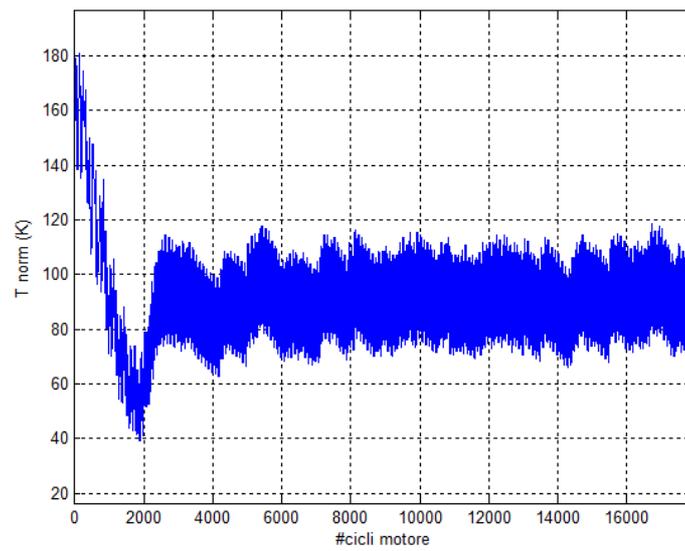
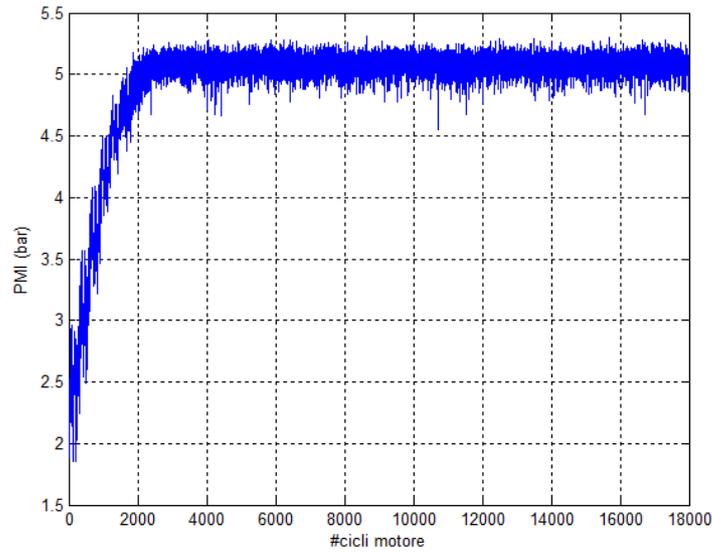
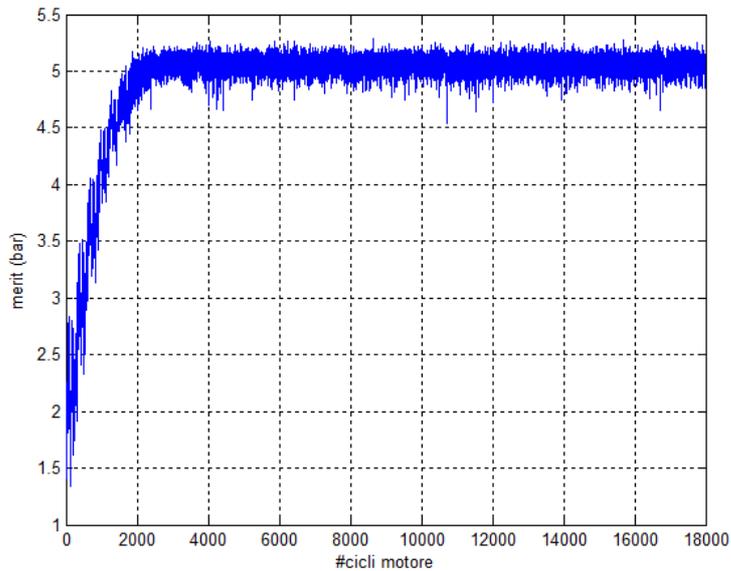


Figura 8-37 temperatura normalizzata gas di scarico

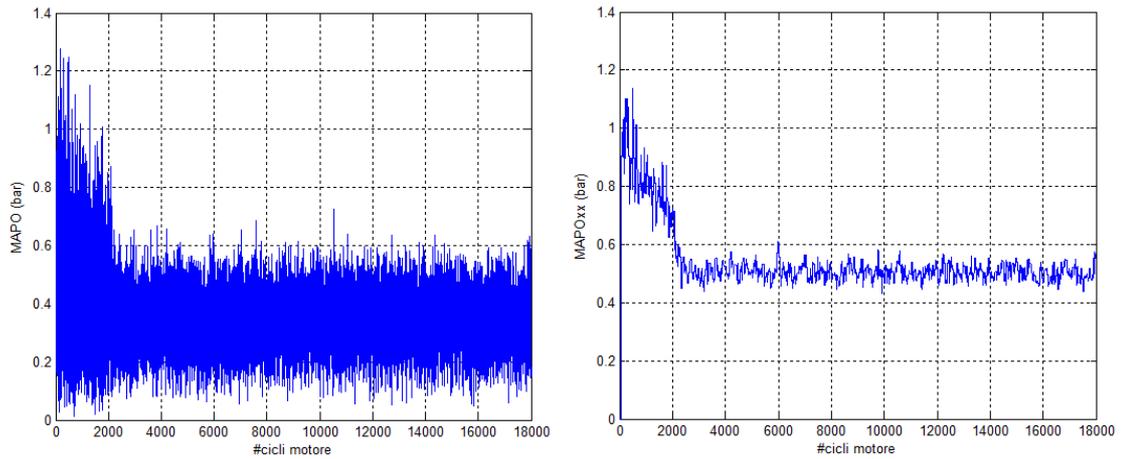


**Figura 8-38 pressione media indicata**



**Figura 8-39 funzione di merito**

Come si vede in figura MAPO<sub>xx</sub> supera il valore limite di 0.9 bar. Il controllore limita, per l'intervallo di AFR in cui viene fatta l'analisi statistica del MAPO, il massimo delta anticipo attuabile nei seguenti  $zz$  cicli simulati.

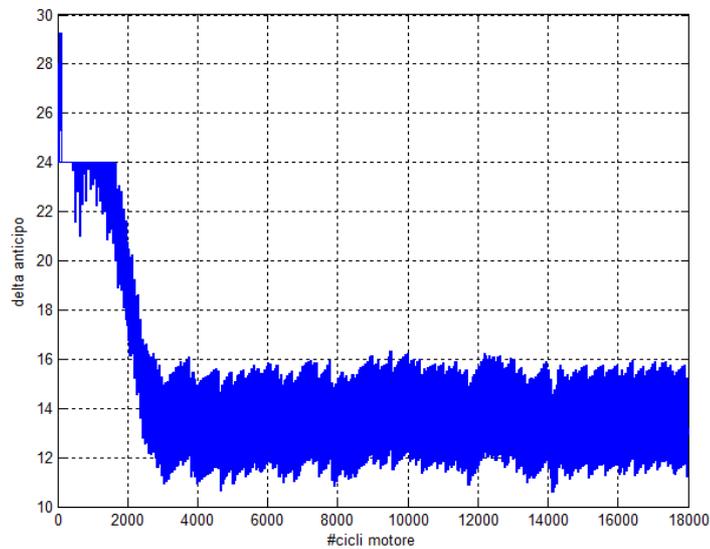


**Figura 8-40 MAPO e MAPOxx limite**

Si innescano una sequenza alto-basso di delta anticipo (che corrispondono ad una sequenza di cicli mediamente detonanti e no) fino a che questo non inizia a calare.

Per questo motivo si è inserito un limite massimo assoluto: non appena MAPOxx supera 0.9 bar quel valore di anticipo è il massimo attuabile e non è più consentito superarlo.

Di seguito viene riportato l'andamento delle grandezze con il nuovo controllo su MAPO.



**Figura 8-41 deltaanticipo attuato**

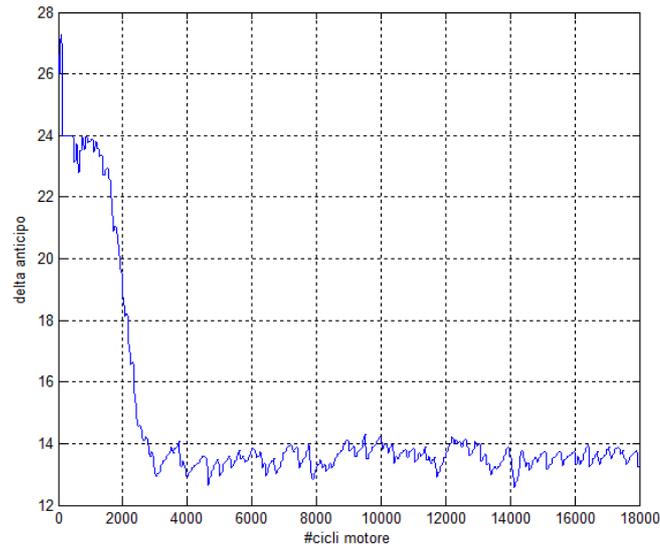


Figura 8-42 delta anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)

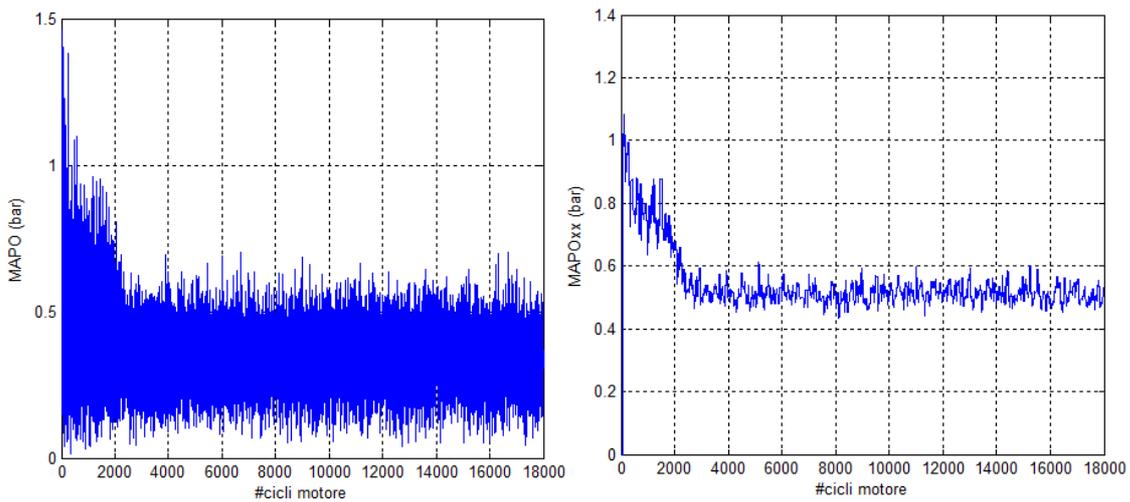


Figura 8-43 MAPO e MAPOxx limite

## 8.6. Considerazioni finali

La dinamica del controllore è dominata dalla parte più lenta, cioè quella di AFR.

La poca prontezza si ripercuote in errori evidenti sul transitorio dell'anticipo di accensione (vedi prova n° 3 e 4).

In tutte le prove le due leve di comando convergono al valore che massimizza la funzione di merito. L'algoritmo è pronto per essere implementato nel sistema reale per il controllo in tempo reale.

## 9.CONTROLLORE 1.1

Le prove simulate hanno messo in evidenza che il controllore effettivamente funziona bene e la funzione di merito converge al suo massimo. Quello che non soddisfa pienamente è la sua velocità, e nello specifico la velocità del controllo di AFR che si ripercuote in errori del calcolo di delta anticipo durante i transitori.

L'idea che sta alla base della seconda versione del controllore è velocizzare, nella parte iniziale, il controllo di AFR quando si hanno composizioni della miscela estreme.

Di seguito viene riportato lo schema del controllo aggiuntivo su AFR nella prima parte della procedura.

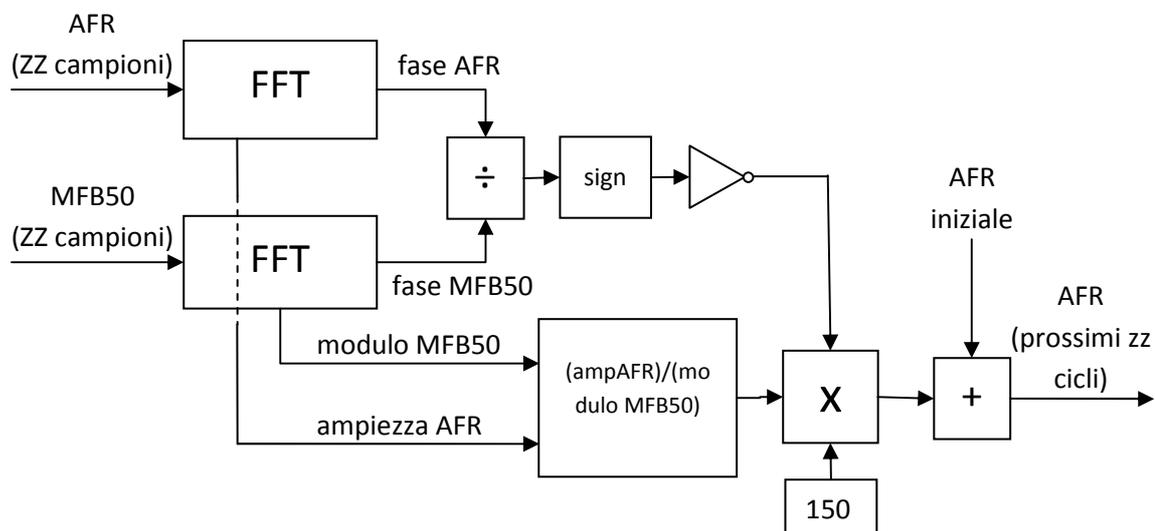


Figura 9-1 schema a blocchi logica controllo AFR

L'algoritmo viene inizializzato con delta anticipo costante e composizione della miscela variabile sinusoidalmente di periodo  $ZZ/3$  cicli.

Vengono simulati  $ZZ$  cicli motore e campionati lo stesso numero di valori di MFB50; se ne fa un'analisi in frequenza e si calcola l'ampiezza e la fase dell'armonica a frequenza del disturbo di AFR. Viene fatto il rapporto tra questa ampiezza e l'ampiezza del disturbo, così facendo si può ricavare che dipendenza c'è tra le due grandezze. In altre parole il rapporto  $amp_{AFR}/amp_{MFB50}$  ci dice di quanto varia la fase di combustione per una variazione unitaria di AFR.

Nel caso in cui  $amp_{MFB50}$  sia grande abbastanza significa che ci troviamo in una zona della mappa di MFB50 molto sensibile alla variazione di AFR (quindi punti motore molto magri o molto grassi), è necessario allora una correzione significativa, che viene fatta

moltiplicando di un fattore 150 il rapporto sopra indicato. Il segno della correzione viene calcolato attraverso il segno del rapporto tra le fasi: se sono in fase (punti motore magri) devo calare AFR, viceversa se sono controfase (punti motore molto grassi) AFR deve aumentare.

Di seguito viene riportato lo schema del controllo aggiuntivo su delta anticipo nella prima parte della procedura.

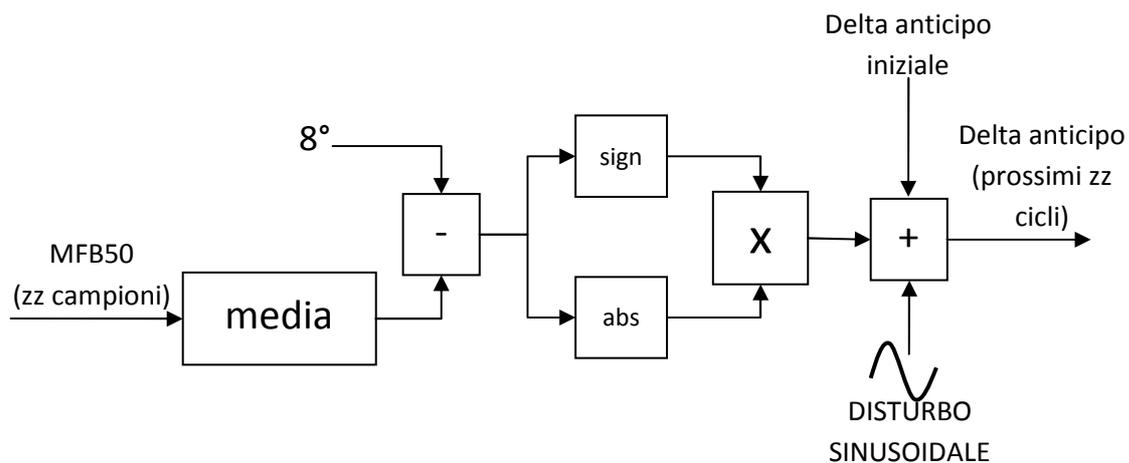


Figura 9-2 schema a blocchi logica controllo anticipo

Fatta la prima correzione, AFR e delta anticipo vengono mantenuti costanti per zz cicli motore. Si calcola il valore medio di MFB50 per questi ultimi zz cicli e si attua una correzione del delta anticipo proporzionale alla differenza tra la media appena valutata e un MFB50 di  $8^\circ$ , che in bibliografia viene indicato come il valore ottimo per massimizzare la coppia erogata dai motori ad accensione comandata.

La correzione viene sommata al valore iniziale e al disturbo sinusoidale, in parallelo viene anche sommato ad AFR comandato il disturbo sinusoidale; da questo punto in avanti entra in azione il controllore basato su ES descritto al capitolo 7.

La modifica introdotta permette di diminuire la costante di guadagno della parte che riguarda l'accensione e quindi le sue oscillazioni a regime.

## 10. Simulazioni controllore 1.1

Per testare il nuovo algoritmo sono stati usati gli stessi parametri precedentemente definiti a meno della costante di guadagno per il calcolo del delta anticipo che ora vale 1.5

### 10.1. Prova 1: delta anticipo iniziale e AFR iniziale bassi

La simulazione viene inizializzata con delta anticipo  $2^\circ \pm 2^\circ$  e AFR  $12 \pm 0.2$ .

Di seguito vengono riportati gli andamenti di delta anticipo e AFR comandati, temperatura normalizzata, PMI e *merit*.

Dopo circa 1500 cicli sia l'anticipo che il rapporto aria combustibile regimano rispettivamente a  $13.5^\circ$  e 13.6.

Al ciclo 300 viene comandato un delta AFR di +1.1, al ciclo 360 viene comandato un delta anticipo di  $+9^\circ$ . Essendo la costante *kadv* minore le oscillazioni a regime sono di minore entità.

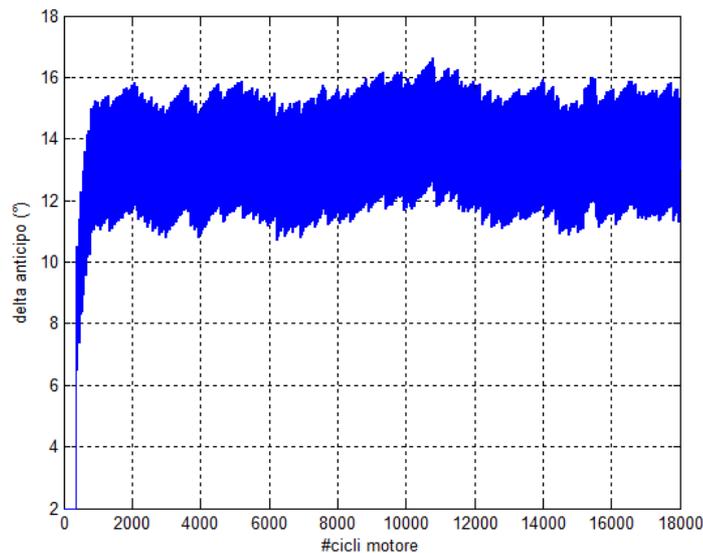
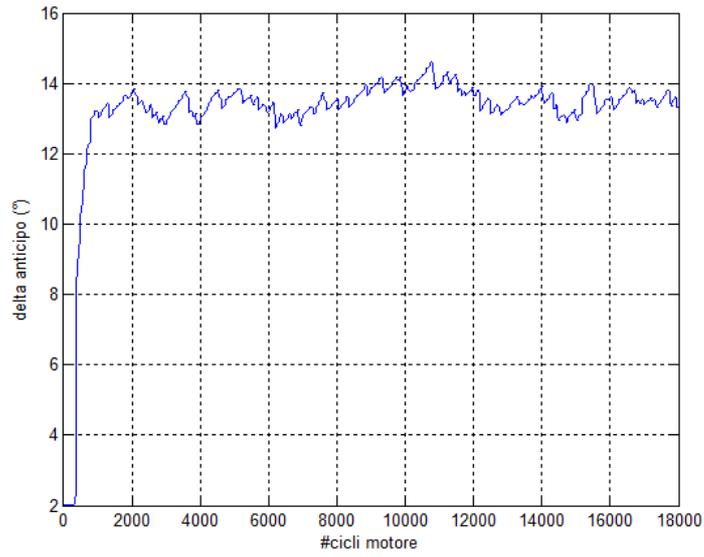
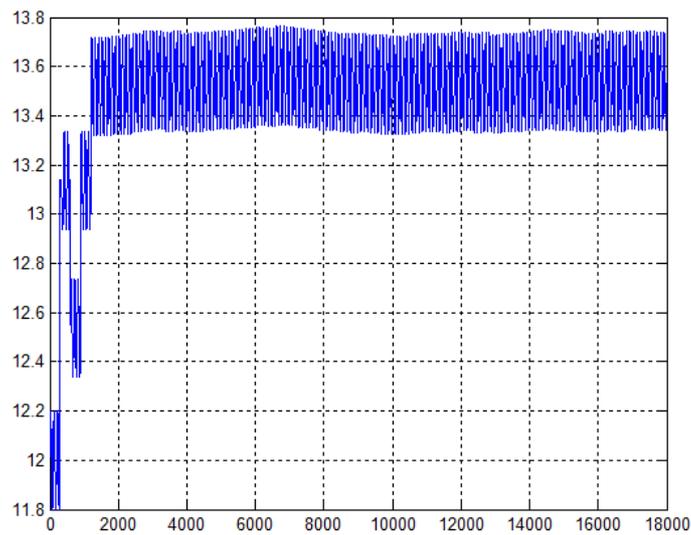


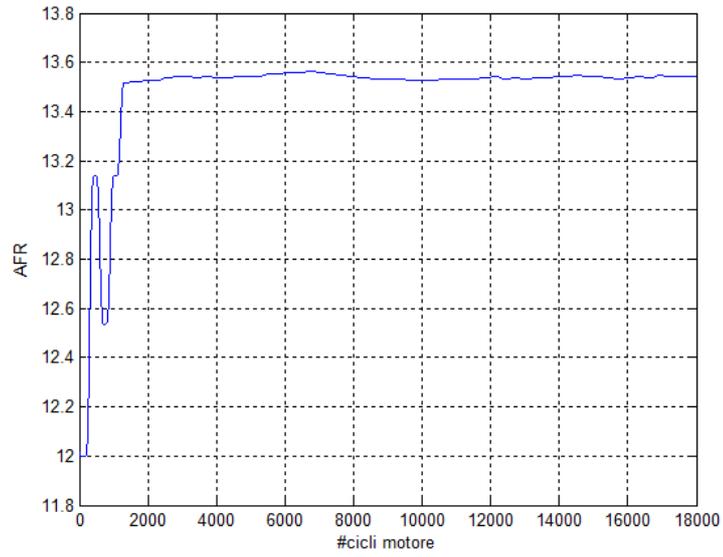
Figura 10-1 delta anticipo attuato



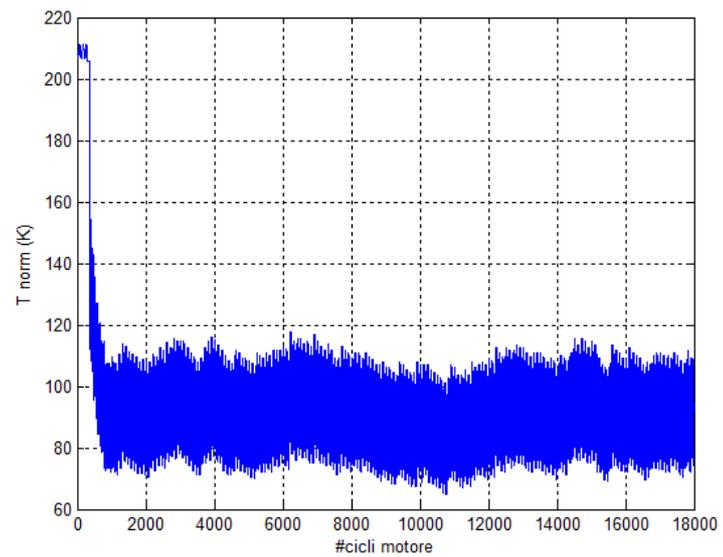
**Figura 10-2 delta anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**



**Figura 10-3 AFR attuoato**



**Figura 10-4 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**



**Figura 10-5 temperatura normalizzata gas di scarico**

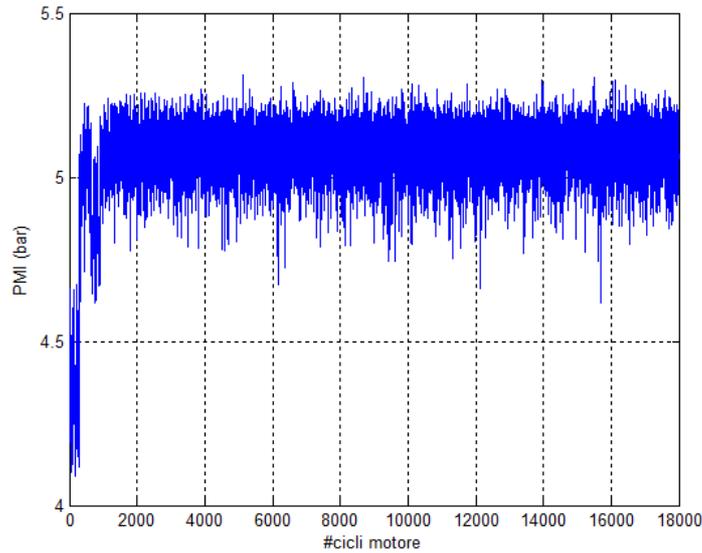


Figura 10-6 pressione media indicata

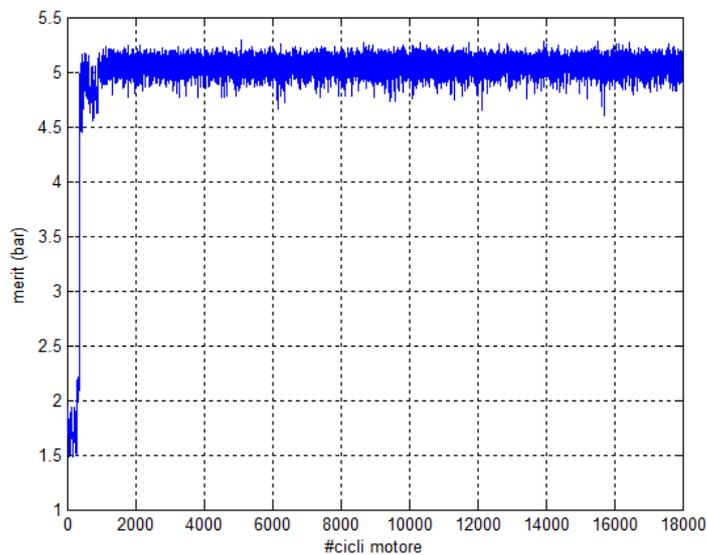


Figura 10-7 funzione di merito

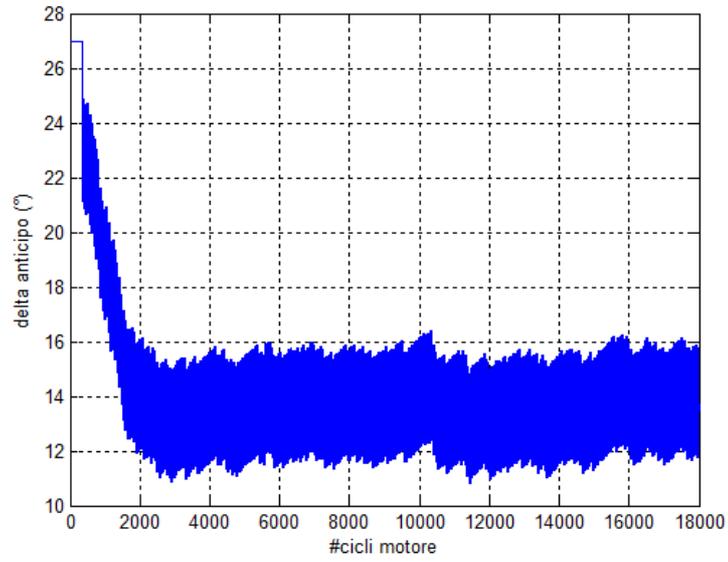
## 10.2. Prova 2: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale basso

La simulazione viene inizializzata con delta anticipo  $27^\circ \pm 2^\circ$  e AFR  $12 \pm 0.2$ .

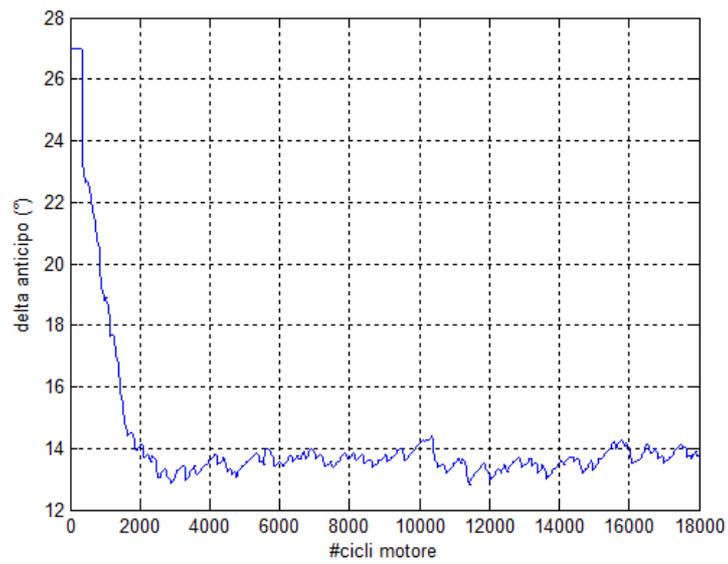
Di seguito vengono riportati gli andamenti di delta anticipo e AFR comandati, temperatura normalizzata, PMI e *merit*.

L'anticipo e AFR convergono rispettivamente dopo 2000 e 1200 cicli.

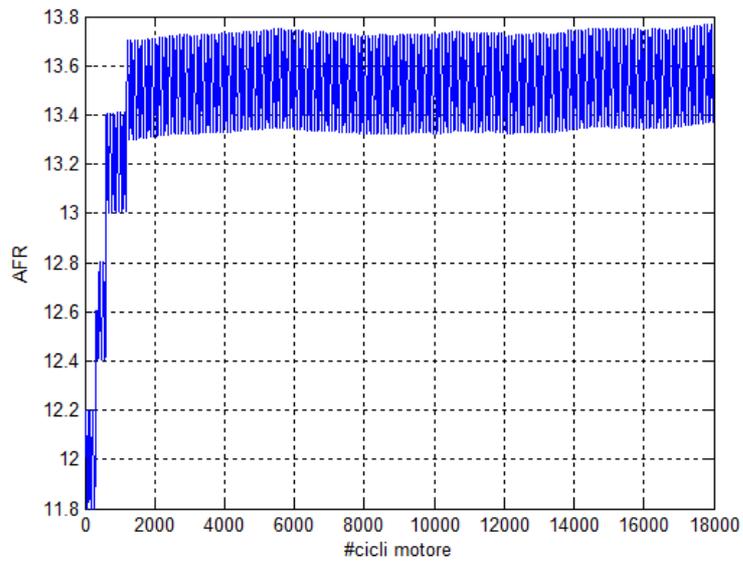
Al ciclo 300 viene comandato un delta AFR di +0.6, al ciclo 360 viene comandato un delta anticipo di  $-4^\circ$ .



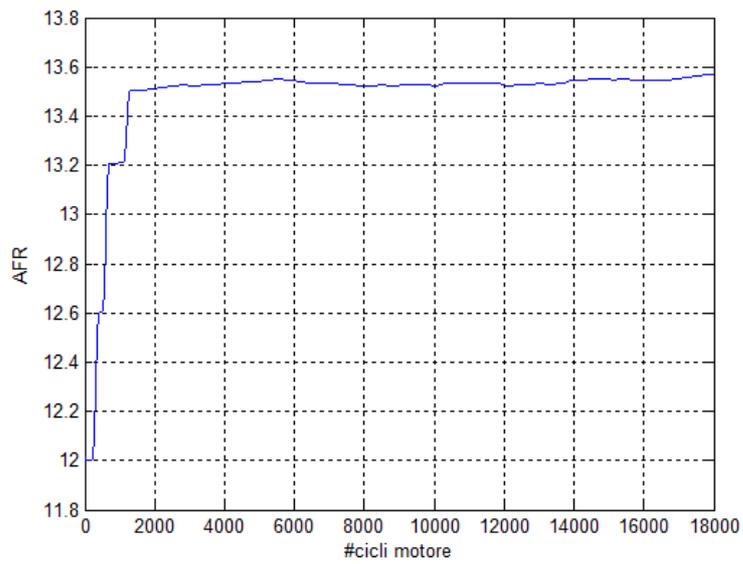
**Figura 10-8 delta anticipo attuato**



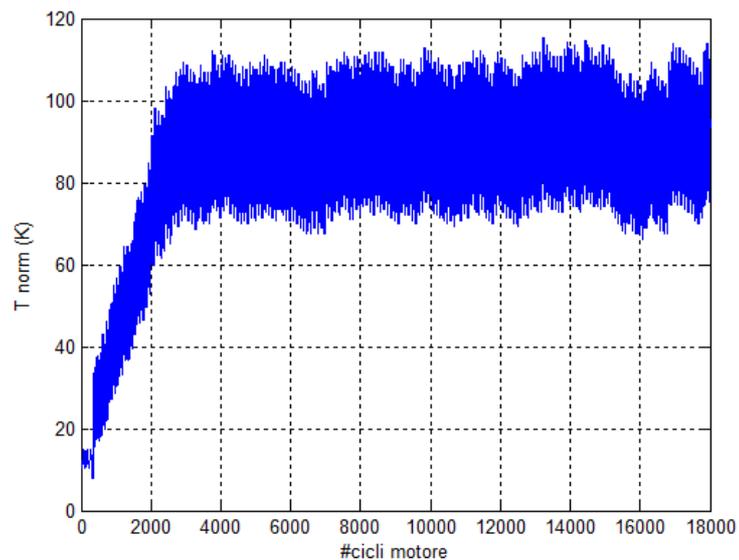
**Figura 10-9 delta anticipi po filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**



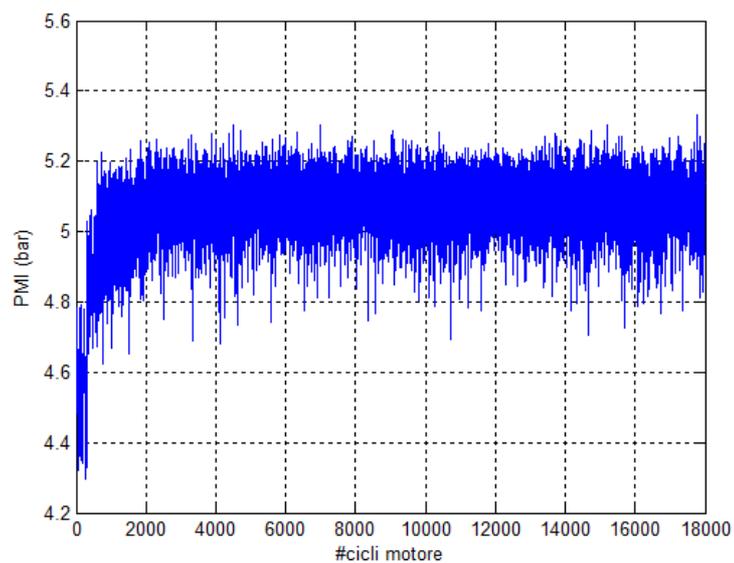
**Figura 10-10 AFR attuato**



**Figura 10-11 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**



**Figura 10-12** temperatura normalizzata gas di scarico



**Figura 10-13** pressione media indicata

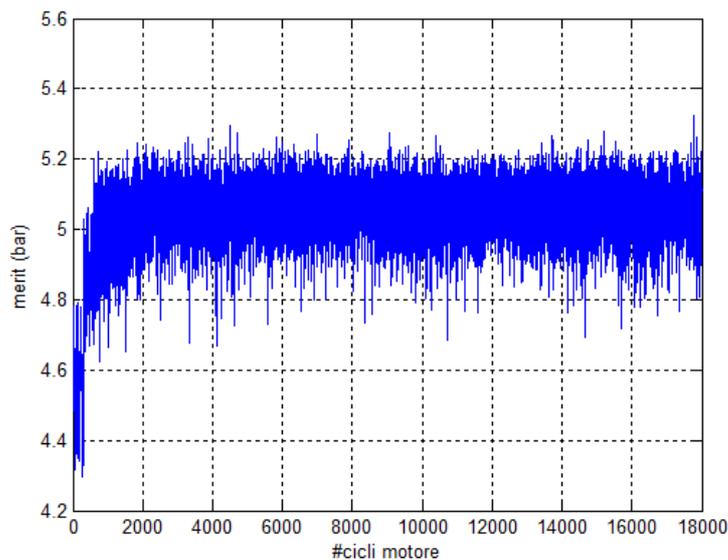


Figura 10-14 funzione di merito

### 10.3. Prova 3: delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto

La simulazione viene inizializzata con delta anticipo  $2^\circ \pm 2^\circ$  e AFR  $17 \pm 0.2$ .

Di seguito vengono riportati gli andamenti di delta anticipo e AFR comandati, temperatura normalizzata, PMI e *merit*.

L'anticipo e AFR convergono rispettivamente dopo 1600 e 1200 cicli.

Al ciclo 300 viene comandato un delta AFR di  $-3.2$ , al ciclo 360 viene comandato un delta anticipo di  $+6^\circ$ .

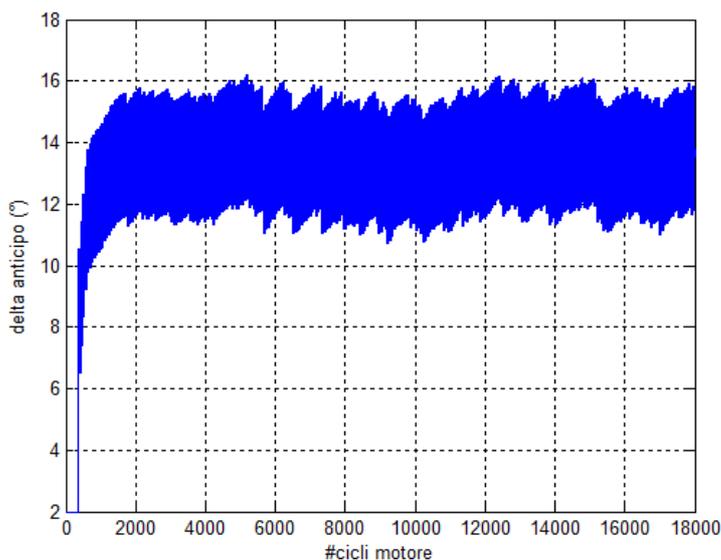
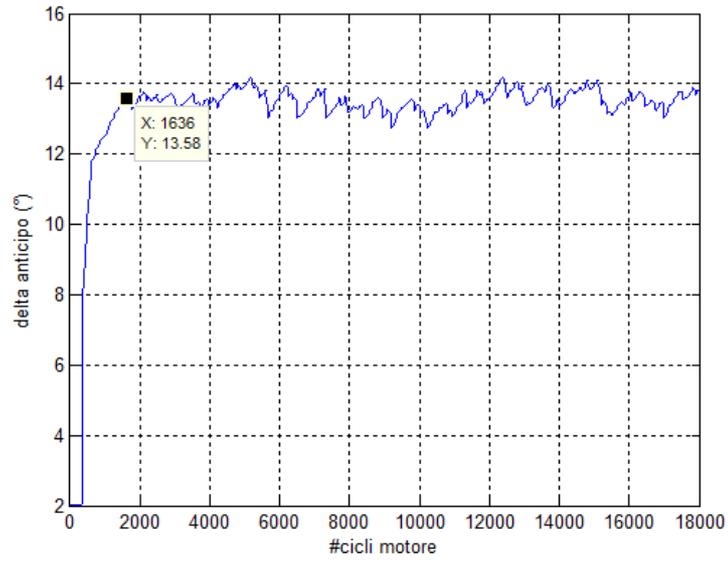
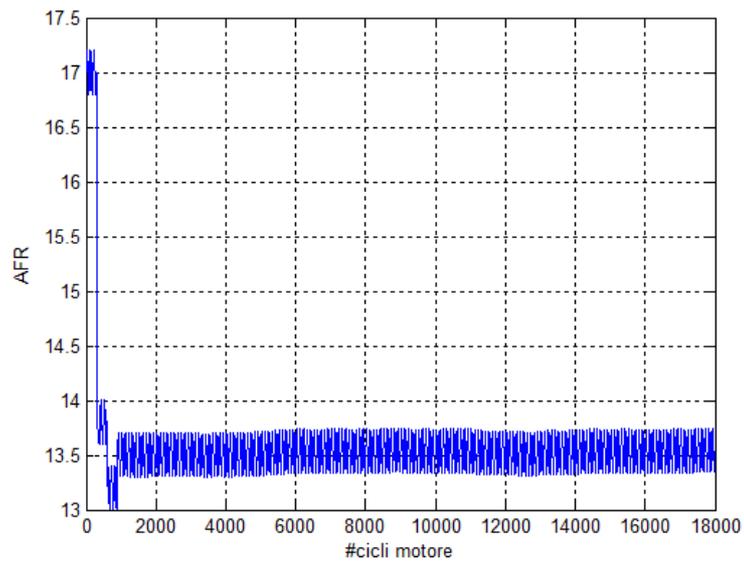


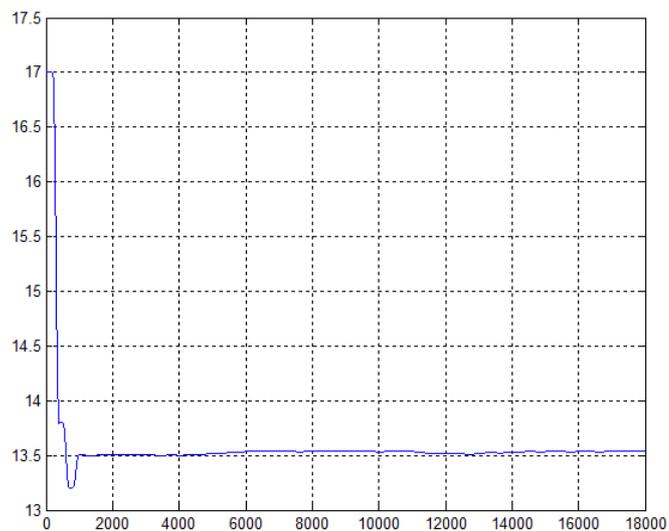
Figura 10-15 delta anticipo attuato



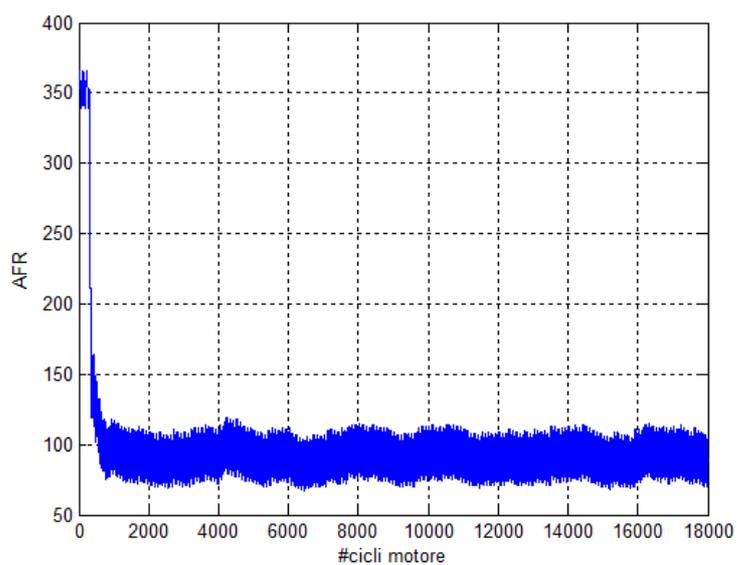
**Figura 10-16 delta anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**



**Figura 10-17 AFR comandato**



**Figura 10-18 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**



**Figura 10-19 temperatura normalizzata gas di scarico**

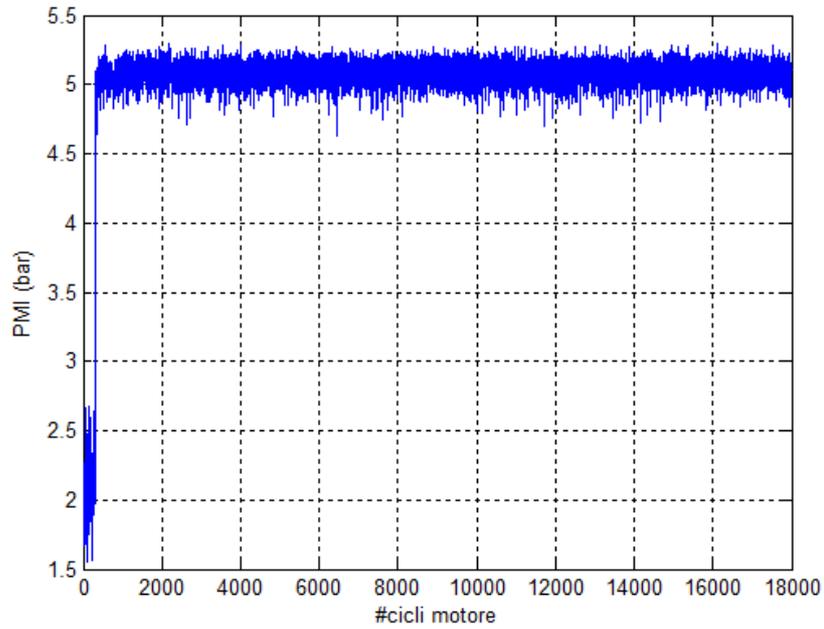


Figura 10-20 pressione media indicata

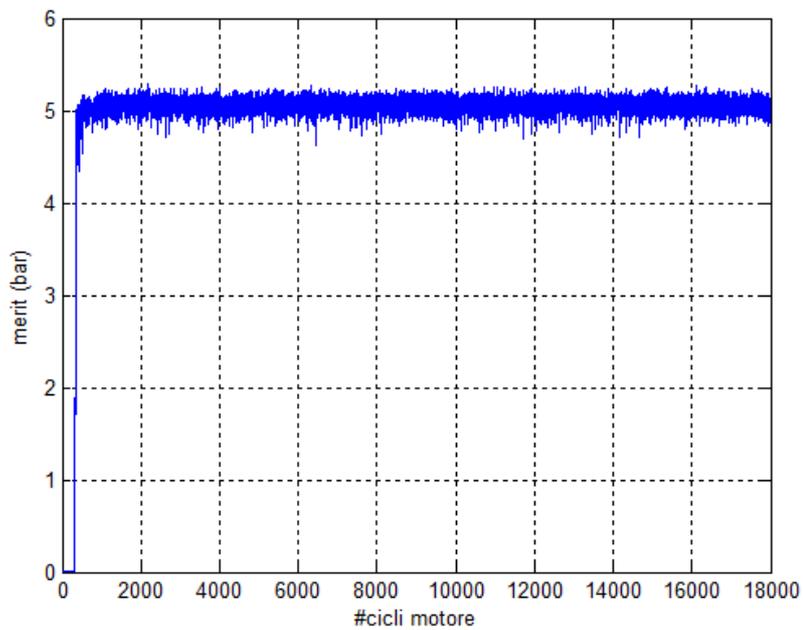


Figura 10-21 funzione di merito

#### 10.4. Prova 4: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto

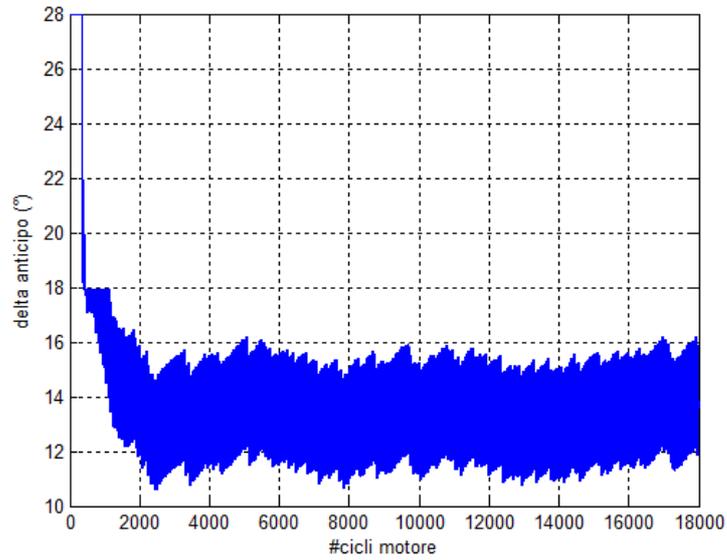
La simulazione viene inizializzata con delta anticipo  $28^{\circ} \pm 2^{\circ}$  e AFR  $17 \pm 0.2$ .

Di seguito vengono riportati gli andamenti di delta anticipo e AFR comandati, temperatura normalizzata, PMI e *merit*.

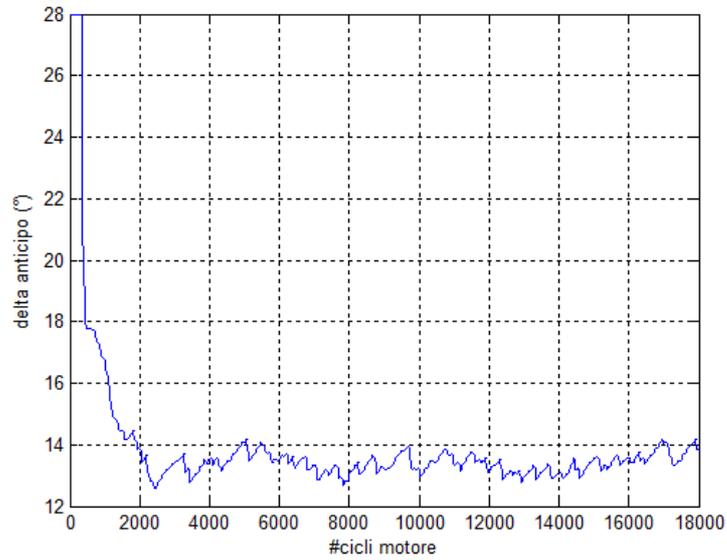
L'anticipo e AFR convergono rispettivamente dopo 1800 e 1200 cicli.

Al ciclo 300 viene comandato un delta AFR di -2.5, al ciclo 360 viene comandato un delta anticipo di  $-7^\circ$ .

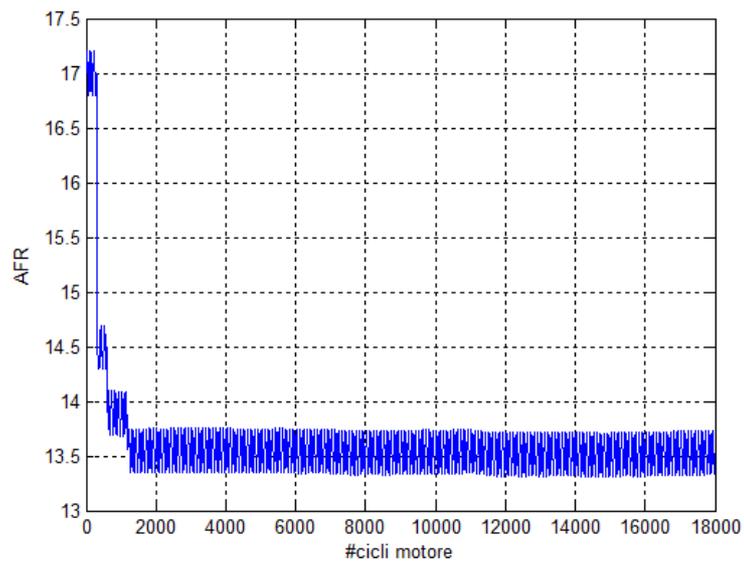
Entra in funzione il controllo sulla detonazione che limita il delta anticipo massimo a  $+18^\circ$ .



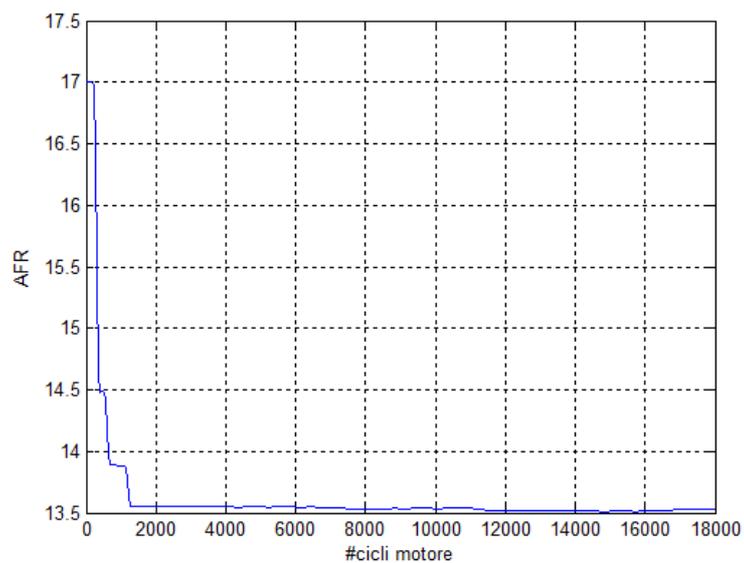
**Figura 10-22 delta anticipo attuato**



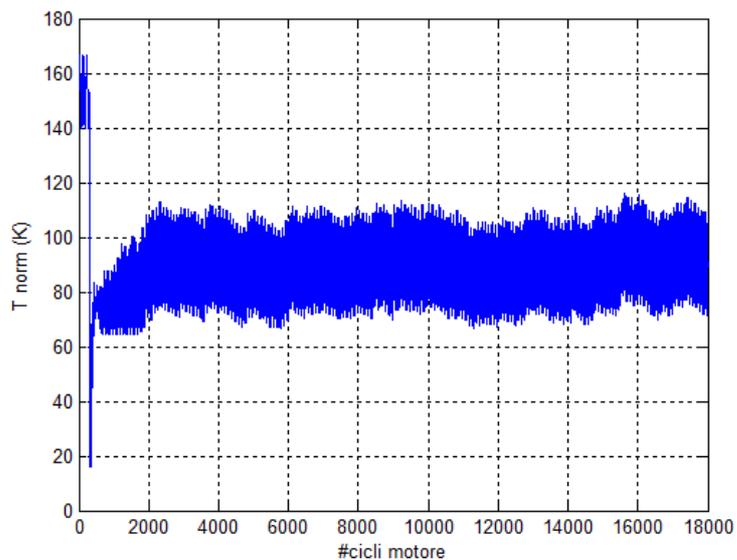
**Figura 10-23 delta anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**



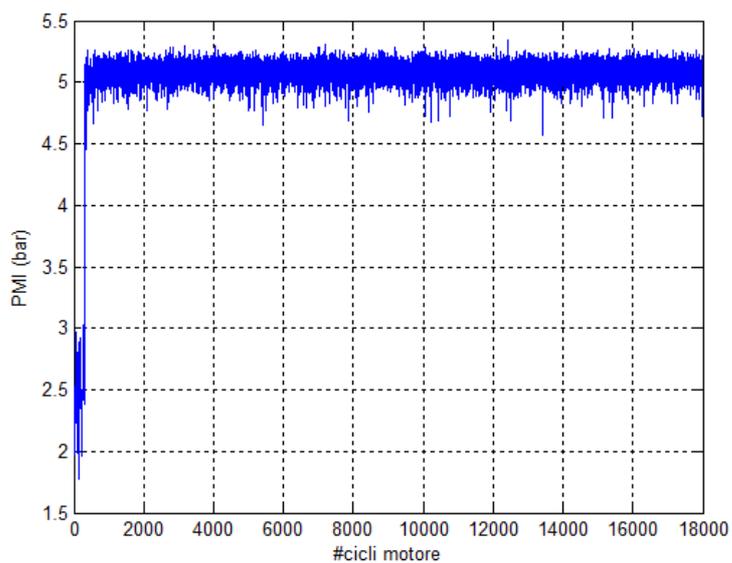
**Figura 10-24 AFR attuato**



**Figura 10-25 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**



**Figura 10-26 temperatura normalizzata gas di scarico**



**Figura 10-27 pressione media indicata**

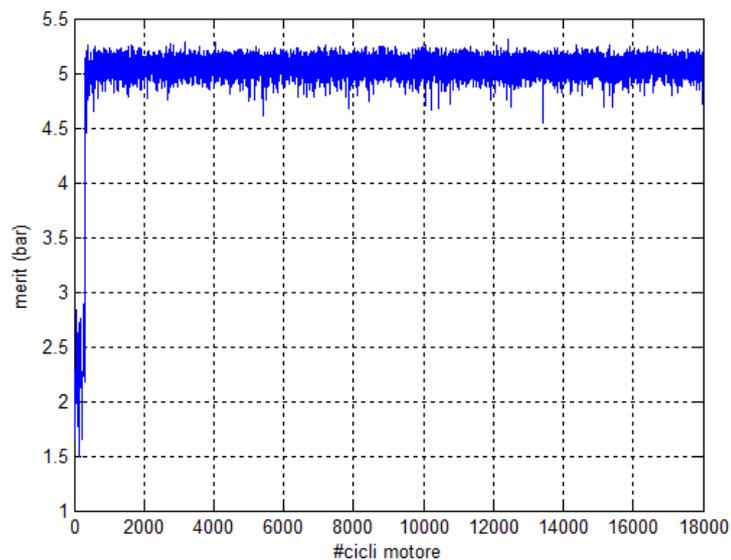


Figura 10-28 funzione di merito

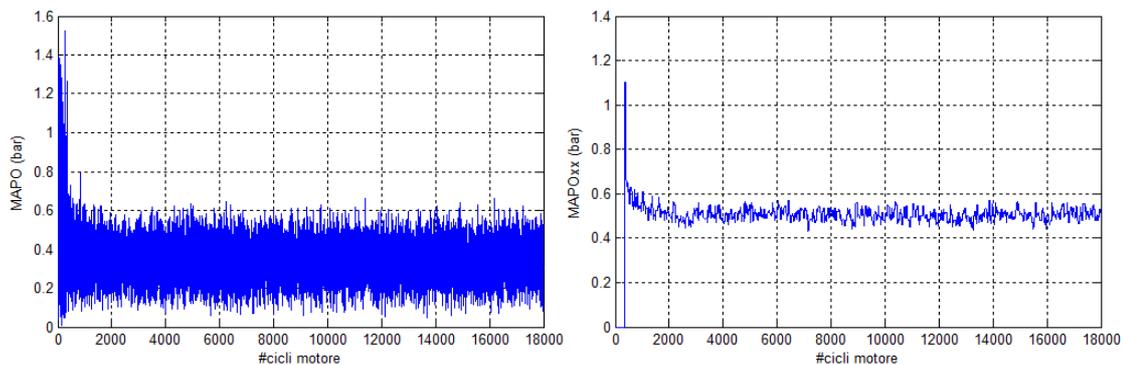


Figura 10-29 MAPO e MAPOxx limite

## 10.5. Considerazioni finali

1. Per la prova n°1 le velocità con cui convergono delta anticipo e AFR sono simili; nella seconda versione del controllore, però, non viene comandato un delta AFR negativo che nella prima versione dopo la prima correzione lo portava a valori molto grassi.
2. Per la prova n°2 il numero di cicli necessari per far convergere AFR cala del 40%.
3. Per la prova n°3 il numero di cicli necessari per far convergere AFR e delta anticipo calano rispettivamente del 40% e 20%. Inoltre avendo velocizzato la dinamica del controllo sulla miscela il delta anticipo non sovraelonga.
4. Per la prova n°3 il numero di cicli necessari per far convergere AFR e delta anticipo calano rispettivamente del 60% e 40%. Il controllo sul MAPO è, nel secondo caso, più severo attuando un limite più restrittivo sul massimo delta anticipo.



# 11. Sala prove

## 11.1. Motore

Il motore utilizzato per le prove proviene da una SUZUKI GSX-R600K6 ed è quello montato sulla monoposto della Unibo Motorsport che gareggia nel campionato Formula SAE (Society of Automotive Engineers).

Per regolamento è stata inserita tra airbox e farfalla una restrizione del passaggio dell'aria, una limitazione usata in molti sport motoristici per limitare le prestazioni dei mezzi.

### 11.1.1. Caratteristiche tecniche

#### MOTORE

Tipo	quattro cilindri in linea, DOHC
Raffreddamento	a liquido
Alesaggio	67.0 mm
Corsa	42.5 mm
Cilindrata totale	599 cm <sup>3</sup>
Rapporto di compressione	12.5 : 1
Potenza massima	92 cv @ 12500rpm
Coppia massima	59 Nm @ 10000rpm
Alimentazione	iniezione multipoint
Avviamento	elettrico
Lubrificazione	a carter bagnato
Regime di minimo	1300 ± 100 rpm

#### TRASMISSIONE

Frizione	multidisco a bagno d'olio
Trasmissione	6 velocità a presa diretta
Disposizione marce	1-in alto, 5-in basso
Rapporto di riduzione primario	1.974 (77/39)
Rapporto marce	prima 2.785 (39/14)
	Seconda 2.052 (39/19)
	Terza 1.714 (36/210)
	Quarta 1.500 (36/24)

Quinta	1.347 (31/23)
Sesta	1.208 (29/24)
Rapporto di riduzione finale	2.687 (43/16)

### **IMPIANTO ELETTRICO**

Sistema di iniezione	iniezione elettronica
Candele	NGK CR9E o DENSO U27ESR-N
Batteria	12V-80Ah
Alternatore	trifase
Fusibile principale	30A

#### **11.1.2. Lista Sensori**

- VRS ruota fonica
- Sensore di fase
- Sensore marcia inserita
- Sensore angolo apertura farfalla
- Pressione air-box
- Sensore apertura farfalla
- Temperatura aria air-box
- Temperatura acqua raffreddamento
- Temperatura olio
- Temperatura gas di scarico monte catalizzatore
- 4 sonde lambda lineari
- Sensore di pressione in camera.

#### **11.2. Freno a correnti parassite**

Il freno è del tipo a correnti parassite della ditta Borghi & Saveri s.r.l. che viene comandato tramite il PXI della National Instruments.

#### **Caratteristiche tecniche**

- diametro albero: 60mm
- diametro rotore: 506mm
- coppia max: 1400Nm
- giri max: 8000rpm
- potenza max: 350CV(257.4kW)

- peso max ammesso sulla flangia anteriore a 8000rpm: 9kg
- momento inerzia:  $0.618 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- rigidezza torsionale: 649 280 Nm/rad
- peso netto: 723kg

Il freno è raffreddato con acqua temperatura costante (max 30°C) e pressione di 1bar.

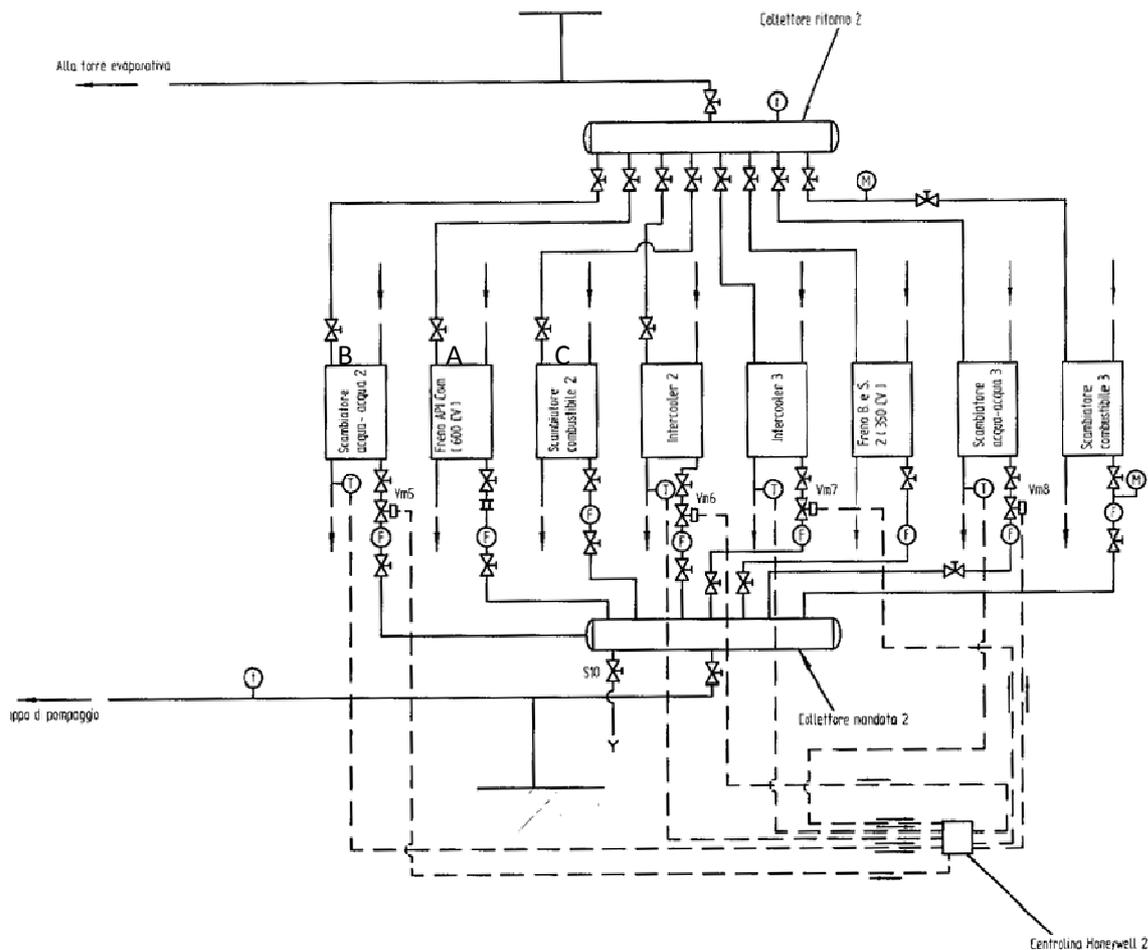
Tutta la coppia trasmessa dal motore al rotore del freno si scarica sui supporti della carcassa oscillante e viene quantificata da una cella di carico. Quest'ultima è in grado di misurare la forza scaricata dal rotore al telaio. La coppia dunque viene misurata indirettamente a partire dalla forza e dal braccio, pari alla distanza dal centro di rotazione e la cella di carico. Utilizzando il segnale di ruota fonica del freno è poi possibile risalire alla potenza erogata.

### **11.3. Impianto di raffreddamento**

L'acqua refrigerata proveniente dalla torre evaporativa viene prelevata dal collettore di mandata per raffreddare il freno a correnti parassite (A), la portata è costante ed è data dalla pressione e dal diametro delle tubature.

L'acqua refrigerata proveniente dalla torre evaporativa viene prelevata dal collettore di mandata per raffreddare il combustibile (C), la portata è costante ed è data dalla pressione e dal diametro delle tubature.

L'acqua lato motore è raffreddata con uno scambiatore acqua-acqua (B); la portata di acqua refrigerata viene regolata attraverso valvole. La centralina Honeywell acquisisce la temperatura dell'acqua lato motore e un controllore PID regola l'attuatore pneumatico in modo che la temperatura si mantenga al valore impostato dall'utente.



11-1 impianto acqua di raffreddamento

## 11.4. Impianto di alimentazione benzina

L'impianto di alimentazione della benzina è alimentato a 12V sotto chiave.

Il combustibile viene prelevato da un serbatoio all'esterno della sala prove attraverso una pompa volumetrica ad ingranaggi che innalza la pressione fino a circa 3 bar. Alla mandata è collegata una valvola di sfiato a scarico automatico che riporta la benzina in eccesso all'aspirazione facendola passare attraverso uno scambiatore.

## 11.5. Impianto di spirazione dei gas di scarico

I gas di scarico vengono aspirati dalla marmitta attraverso un aspiratore che li espelle fuori dalla sala prove. Questa configurazione è stata scelta perché trattandosi di un motore per utilizzo racing il silenziatore posizionato sulla linea di scarico della sala prove creerebbe una contropressione che non presente sugli scarichi usati in gara.

## 11.6. Ventilatore centrifugo

Il ventilatore per il raffreddamento dei collettori è comandato da un inverter che ne comanda l'accensione e la velocità di rotazione.

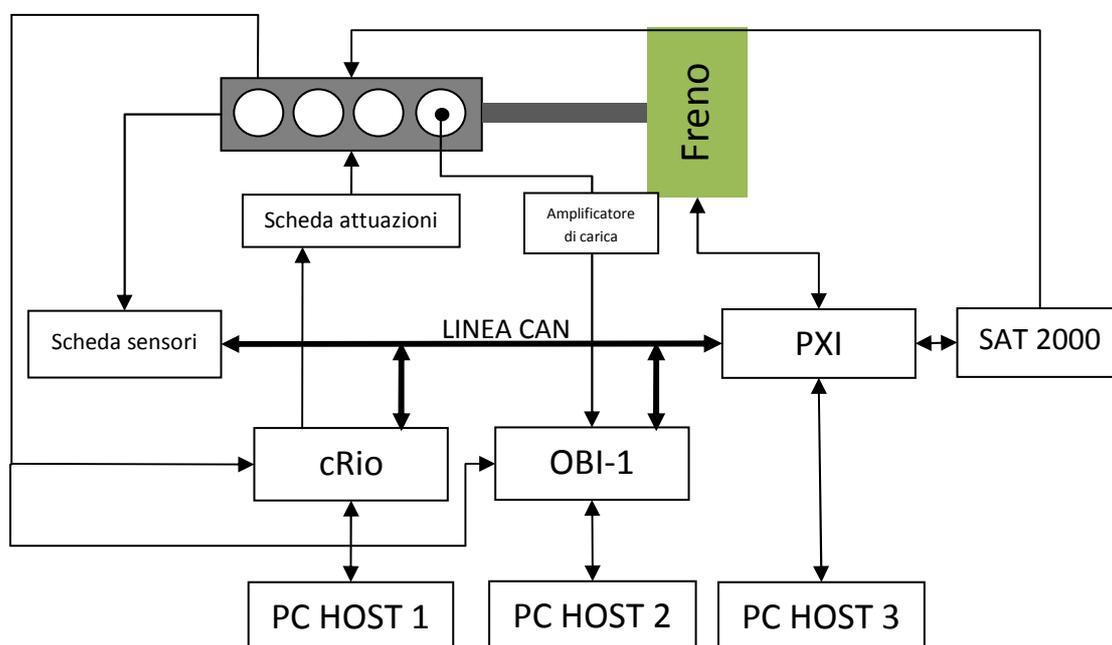
L'inverter utilizzato è stato un Danfoss MicroDrive VLT FC51. In base alle caratteristiche del motore elettrico, tra la vasta gamma di modelli, è stato scelto il 132F-0007. Oltre ad essere molto compatto e quindi facilmente installabile sulla struttura del ventilatore, è caratterizzato da una potenza di 2,2 kW e una corrente massima di assorbimento pari 9,6 A.

L'alimentazione del motore elettrico è stata modificata da 380 V a 220 V agendo sullo schema stella/triangolo.

L'inverter viene comandato attraverso il PXI, la sua attivazione viene comandata quando viene superata una certa temperatura dentro l'aspiratore dei gas di scarico.

## 11.6. Controllo banco

### 11.6.1. Schema concettuale



11-2 rete sala prove

La comunicazione tra i vari apparati per il controllo della sala prove si basa su protocollo CAN (Controller Area Network). La scheda sensori converte segnali di apertura farfalla, marcia inserita, pressione airbox e le quattro sonde Lambda in segnali digitali compatibili

con il protocollo CAN; la generazione dei pacchetti CAN viene fatta alla frequenza di 1 kHz. Alla rete CAN sono collegati il cRio (esegue il controllo motore), OBI-1 (fa analisi indicating Real Time) e il PXI (esegue il controllo banco).

Il PC HOST1 comunica con il cRio attraverso cavo Ethernet, su di esso vengono visualizzati tutti i parametri di funzionamento del motore (AFR, anticipo, rpm, ecc) e attraverso il quale è possibile variarli manualmente.

Il PC HOST2 comunica con OBI-1 attraverso cavo Ethernet, su di esso vengono visualizzati in tempo reale le grandezze indicating del motore (PMI, MFB50, Pmax, ecc).

Il PC HOST3 comunica con il PXI attraverso cavo Ethernet, su di esso vengono visualizzati i parametri del banco (coppia e potenza erogata, Tscarico, Tamb, %farfalla, ecc) e attraverso il quale è possibile controllare manualmente il banco prove.

Il cRio acquisendo anche i segnali di ruota fonica e fase calcola i tempi delle attuazioni, la scheda attuazioni comanda bobine e iniettori attraverso segnali in potenza.

Il PXI monitora costantemente i parametri del banco e lo controlla in coppia e rpm. Si possono impostare manualmente dei valori di allarme per le grandezze banco in modo che l'utente si possa accorgere di anomalie nel funzionamento. Il PXI regola l'apertura della farfalla attraverso un motore passo-passo (SAT-2000).

### **11.6.2. Compact-RIO**

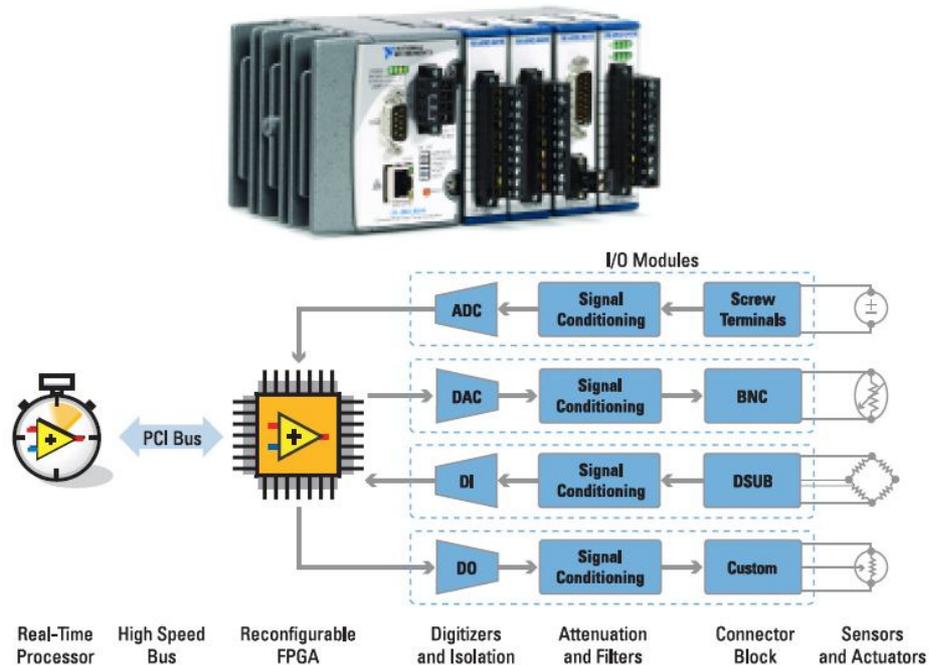
L'unicità di questo motore impiegato nel campionato Formula SAE sta nel sistema di controllo motore. Infatti la centralina di serie è stata sostituita da una piattaforma della National Instruments, il Compact-RIO (cRIO) piattaforma compatta alimentata in corrente continua tra 9 e 35 Volt, quindi facilmente impiegabile per applicazioni on board. Il cRIO è costituito da una parte a basso livello dotata di FPGA (Field Programmable Gate Array) su cui vengono installati tutti i moduli di input e output analogico e digitali, quindi tutta l'acquisizione e la generazione dei segnali passa attraverso questa scheda. Il cervello del sistema è costituito invece dal controller: esso è dotato di un motore real-time in grado di dialogare con la scheda FPGA tramite bus.

I chip FPGA sfruttano per la loro programmazione la tecnologia RIO (Reconfigurable I/O). Essi sono costituiti da una serie di celle e di gate che, opportunamente settati, consentono di eseguire operazioni semplici ma in tempi molto brevi.

Per il controllo motore viene utilizzato un cRIO dotato dei seguenti componenti:

- controller 9024 con processore da 800 MHz, memoria non volatile da 4 GB, memoria DDR2 da 512 MB

- FPGA 9103 nel backlane da 3 Mgate, 196KB di RAM
- 2 moduli da 8 canali I/O digitali 9401 a 10MHz
- 1 modulo CAN ad alta velocità fino a 1 Mbit/s



11-3 cRio National Instruments [12]

Il controller è dotato di un sistema operativo real time che è in grado di eseguire in automatico degli applicativi realizzati dall'utente all'avvio del sistema. Il cervello del sistema può scambiare dati con un PC chiamato HOST attraverso porta USB, Ethernet e una seriale. Esso a differenza del modulo FPGA può eseguire loop di calcolo con variabili a virgola mobile con determinismo temporale e consentendo di impostare diversi gradi di priorità tra un loop di calcolo e l'altro.

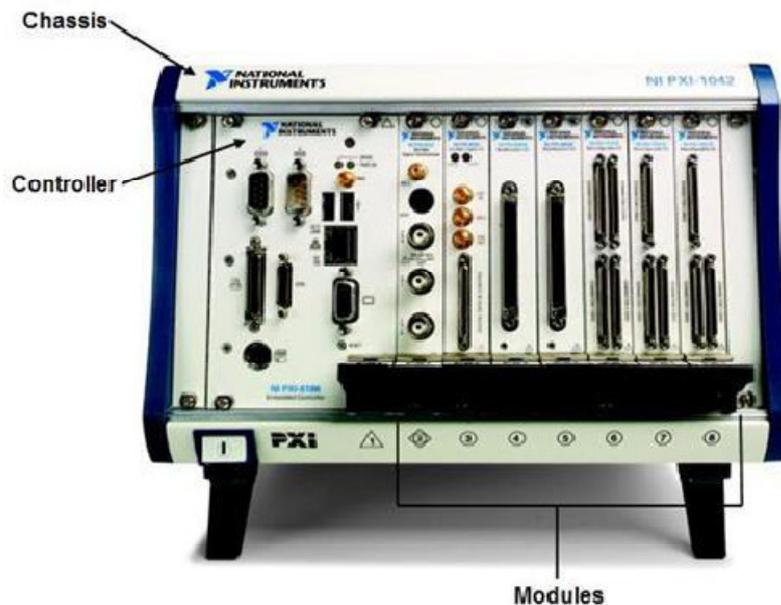
La scheda FPGA invece può compiere una iterazione di calcolo con frequenza fino a 40 MHz con la limitazione dell'uso di variabili intere con o senza segno al massimo di 64 bit. Inoltre la complessità delle operazioni algebriche implementabili diminuisce rispetto l'ambiente RT.

### 11.6.3. PXI-8186

A questo componente è demandato il controllo degli apparati della sala prove: freno, il SAT200, il ventilatore e le valvole pneumatiche del circuito di raffreddamento dell'acqua. E' composto da diversi moduli che assolvono a specifiche funzioni tra cui l'acquisizione dati e la comunicazione verso l'esterno, il tutto racchiuso dentro uno chassis industriale.

Il sistema utilizzato è dotato dei seguenti componenti:

- Chassis NI PXI 1042
- Controller NI PXI 8186
- Scheda I/O riconfigurabile NI-PXI 7831R da 1 Mega-Gates
- Scheda I/O riconfigurabile NI-PXI 7833 R da 3 Mega-Gates
- Linea CAN NI PXI 8464
- Scheda di I/O temporizzata NI-PXI 6602
- Scheda di Multi-I/O NI-PXI 6133
- Scheda NI-PXI 6259 Multi-function DAQ
- Scheda di uscita analogica NI-PXI 6713



11-4 PXI National Instruments [12]

Sullo chassis possono essere montate 8 schede PXI o CompactPCI. I bus PXI presentano uno standard maturo ed elevate prestazioni in campo sia scientifico che industriale, con la possibilità di scegliere tra due diversi clock, 1 KHz e 1 MHz. Questo consente di ottenere una risoluzione massima di 1  $\mu$ s e di eseguire software con frequenza di ciclo fino 1 MHz. Inoltre, sono presenti 8 linee di interrupt hardware disponibili su tutte le schede collegate al bus, necessarie per sincronizzare tutte quelle attività che, come le acquisizioni e le attuazioni, richiedono l'intervento coordinato di più moduli, con sfasamenti inferiori al microsecondo.

Il controller PXI-8186 incorpora un processore Intel Pentium 4 a 2.2 GHz di frequenza, con 1 MB di DDR RAM e 40 GB di disco fisso e può essere usato in qualsiasi sistema PXI o CompactPCI.

Il modulo incorpora tutte le periferiche di I/O standard: Ethernet 10/100 Base TX, tastiera, mouse e video. Inoltre dispone di una connessione GPIB (General Purpose Interface Bus, IEEE 488.2) che permette la connessione di strumentazione esterna. Due porte USB 2.0 permettono la connessione di lettori e masterizzatori CD/DVD, stampanti, dischi di memoria, ecc. completano la configurazione una porta parallela ECP/EPP (Extended Capabilities Port/Enhanced Parallel Port) e due porte seriali RS232. Il controller include una connessione 5MB esterna utilizzabile come input/output trigger o watchdog timer attraverso cui è possibile trasferire i segnali di interrupt presenti sul bus PXI all'esterno o fornire segnali di triggering al bus stesso. L'interfaccia video integrata è basata sul chipset Intel Extreme Graphics ed è capace di buone prestazioni sia in 3D che in 2D. La configurazione base prevede 256Mb di RAM espandibili a 1024Mb.

Il cervello di tutto il sistema di controllo è rappresentato dall'elaboratore NI PXI-8186 dotato di sistema operativo Phar Lap che consente di utilizzare il modulo Real-Time di LabVIEW.

Il processore real-time comunica con la scheda FPGA la quale ha il compito di eseguire le operazioni a basso livello e comunicare con l'ambiente esterno.

Il controller può comunicare con il PC HOST attraverso 2 porte USB, una Ethernet e 2 seriali.

#### **11.6.4. OBI-1**

OBI-1 è un sofisticato sistema per l'analisi indicating prodotto da Alma Automotive. La parte hardware comprende:

- Single-Board RIO della National Instruments
- ADC con buffer della Alma Automotive

La Single-Board RIO è una singola scheda che integra modulo I/O digitale con 96 linee FPGA e un processore Real Time. Concettualmente l'architettura è simile a quella di cRIO, solamente che in questo caso il tutto è compattato in una scheda di piccole dimensioni (9.66 cm x 11.43 cm). E' dotata di porta USB, Ethernet, seriale e CAN



# 12. Campagna acquisizione dati

## 12.1. Punti motore

La procedura di controllo ottimo si è voluta testare anche sui dati reali del motore in laboratorio. E' stata organizzata una campagna di acquisizione dati delle grandezze indicanti e della temperatura dei gas di scarico prima del catalizzatore per 80 punti motore.

Le acquisizioni sono state fatte a 7000rpm e apertura farfalla 22% facendo variare AFR e anticipo per un totale di 80 punti motore.

	AFR 11.7	AFR 12.0	AFR 12.4	AFR 12.7	AFR 13.0	AFR 13.4	AFR 13.7	AFR 14.0
SA (°)	44.4	44.4	44.4	44.4	44.4	44.4	44.4	44.4
	48.4	48.4	48.4	48.4	48.4	48.4	48.4	48.4
	52.4	52.4	52.4	52.4	52.4	52.4	52.4	52.4
	56.4	56.4	56.4	56.4	56.4	56.4	56.4	56.4
	60.4	60.4	60.4	60.4	60.4	60.4	60.4	60.4
	62.4	62.4	62.4	62.4	62.4	62.4	62.4	62.4
	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4
	66.4	66.4	66.4	66.4	66.4	66.4	66.4	66.4
	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4
	70	70	70	70	70	70	70	70

Tabella 12-1 griglia punti motore

L'AFR massimo è limitato superiormente dalla strozzatura all'aspirazione la quale fa sì che il motore respiri male, questo comporta poca turbolenza nel cilindro, perciò combustioni lente e con gli anticipi attuati il funzionamento del motore è instabile al limite dello spegnimento.

OBI-1 genera file .txt e .bin (processabili dal software HeatIT). I file di testo contengono i valori delle seguenti grandezze:

- Tempo di acquisizione

- Numero ciclo motore
- Rpm
- MAP (Mainfold Air Pressure)
- PMI
- Valore pressione massima in camera
- Angolo picco di pressione
- Massimo del calore rilasciato
- MFB50
- MAPO
- TDC
- %farfalla
- AFR misurato dalle sonde

L'eseguibile TestIT (che gira su PC HOST3) per il controllo banco genera anch'esso un file .txt il quale contiene la media su 4 secondi delle seguenti grandezze

- Tempo di acquisizione
- Temperatura acqua di raffreddamento in ingresso e in uscita dal motore
- Temperatura ambiente
- Temperatura aria collettore aspirazione
- Temperatura olio
- Temperatura gas di scarico
- Coppia freno
- Potenza erogata in CV e kW
- Pressione collettore aspirazione
- Marcia inserita
- % farfalla
- AFR per ogni cilindro
- Pressione massima in camera
- MFB50
- PMI
- MAPO
- Angolo del picco di pressione

## 12.2. Generazione delle mappe

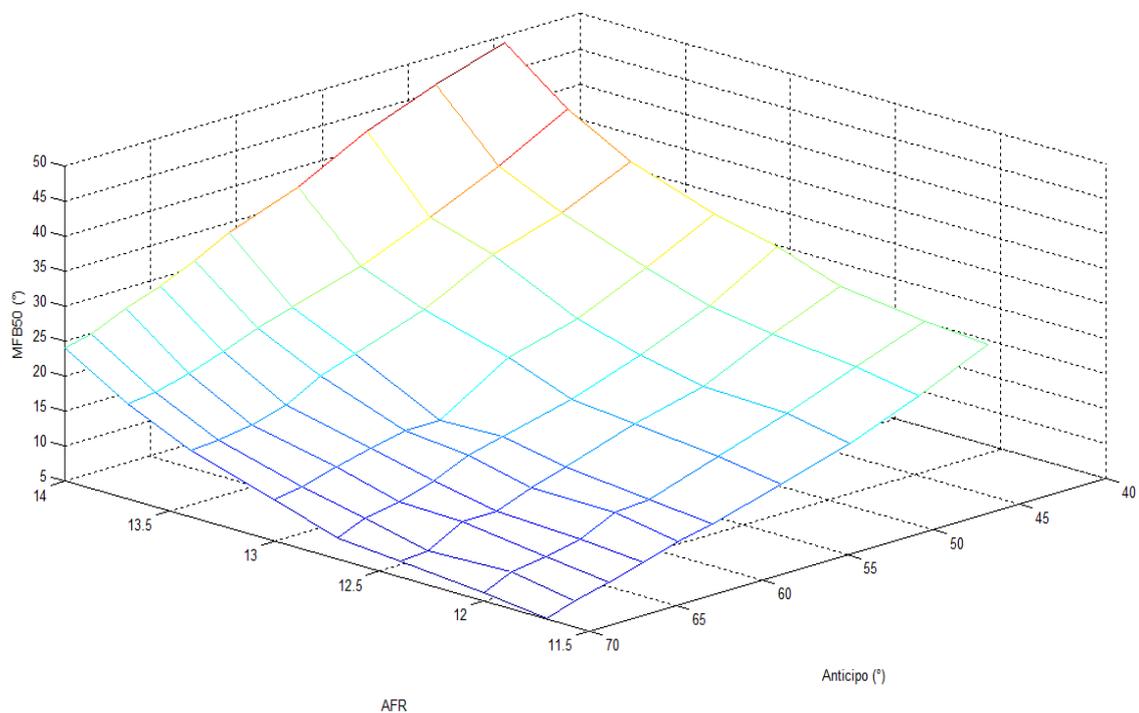
Le mappe sono state generate interpolando i dati sperimentali con delle superfici polinomiali di secondo grado

$$f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2$$

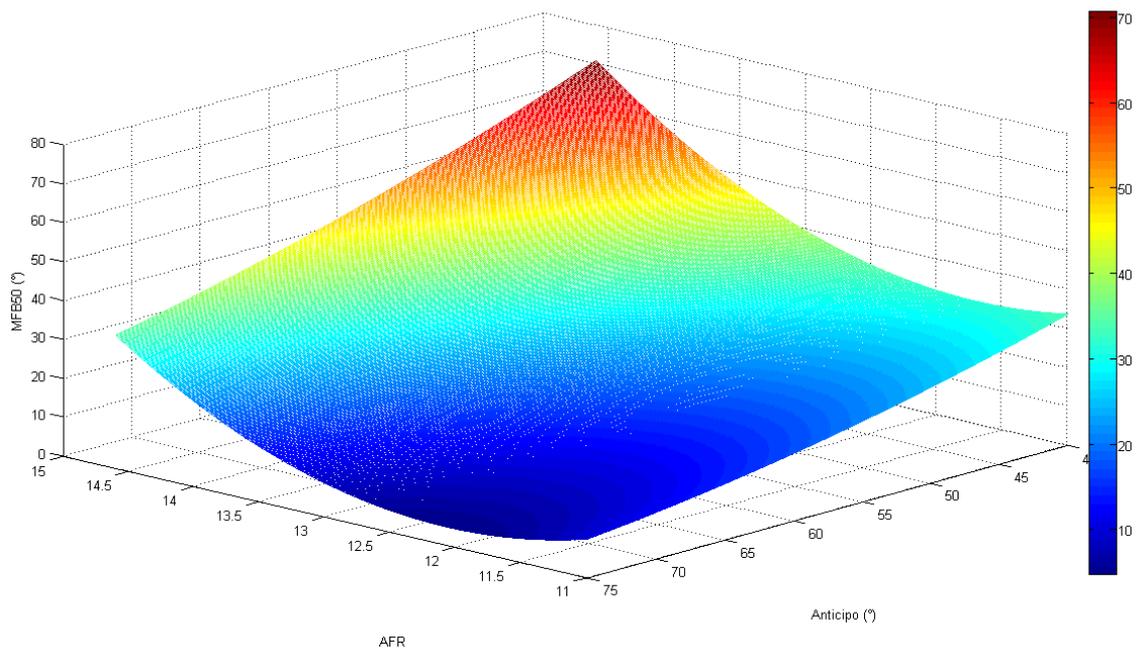
I coefficienti del polinomio sono stati calcolati attraverso Curve Fitting Tool di Matlab.

Le mappe generate sono quelle di PMI, MFB50 e sua deviazione standard, parametri della distribuzione Weibull per la generazione di MAPO e temperatura gas di scarico in funzione di anticipo e composizione miscela.

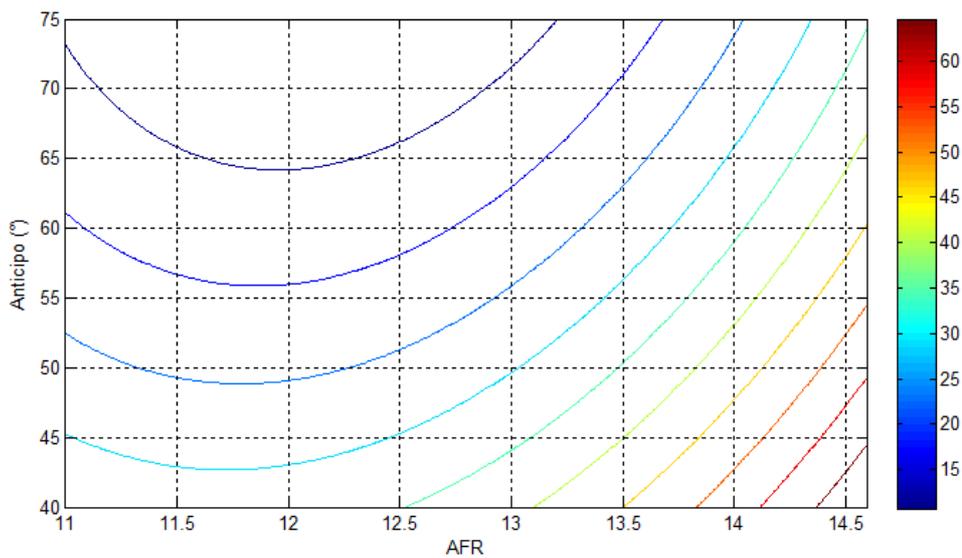
## 12.3. Mappa MFB50 medio e sua deviazione standard



AFR  
**Figura 12-1 superficie MFB50 medio**



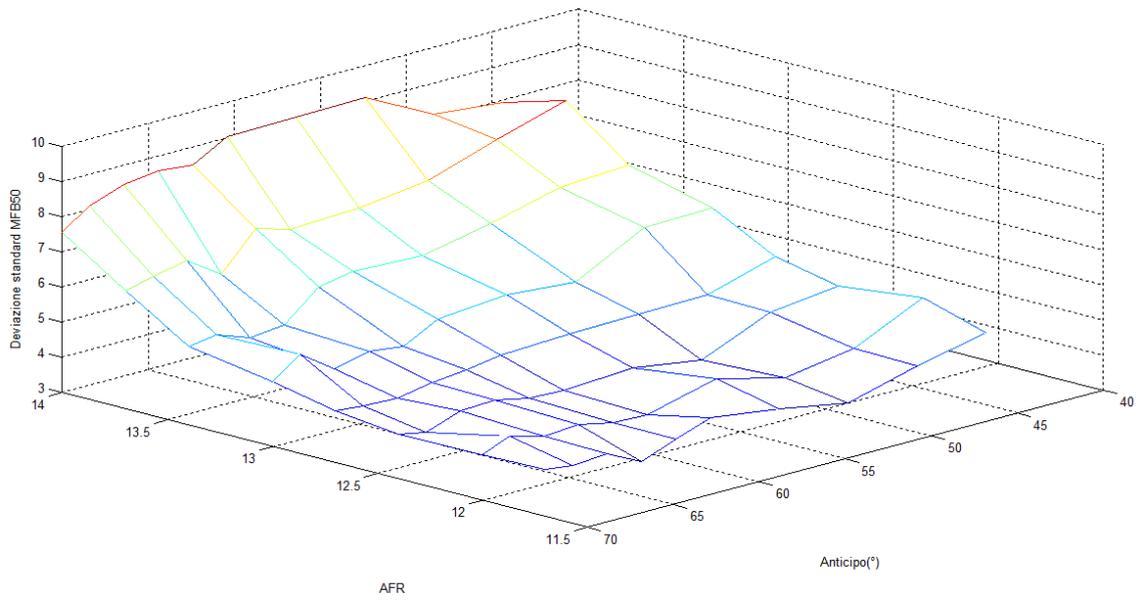
**Figura 12-2 mappa MFB50**



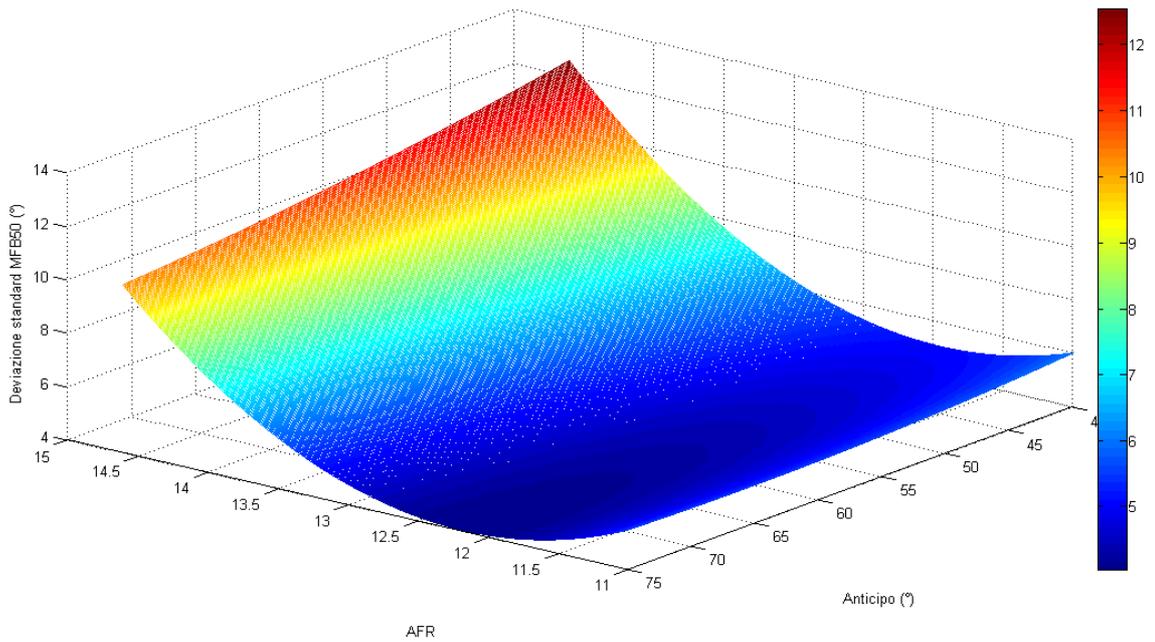
**Figura 12-3 curve iso-MFB50**

L'errore quadratico medio RMSE vale 0.9455.

L'ipotesi fatta nel capitolo 5.1 sulla deviazione standard di MFB50, cioè che dipende solo da AFR è confermata; infatti come si vede nella figura seguente non si nota dipendenza dall'anticipo.



**Figura 12-4 superficie deviazione standard MFB50**



**Figura 12-5 mappa deviazione standard MFB50**

L'errore quadratico medio RMSE vale 0.3953

## 12.4. Mappa PMI

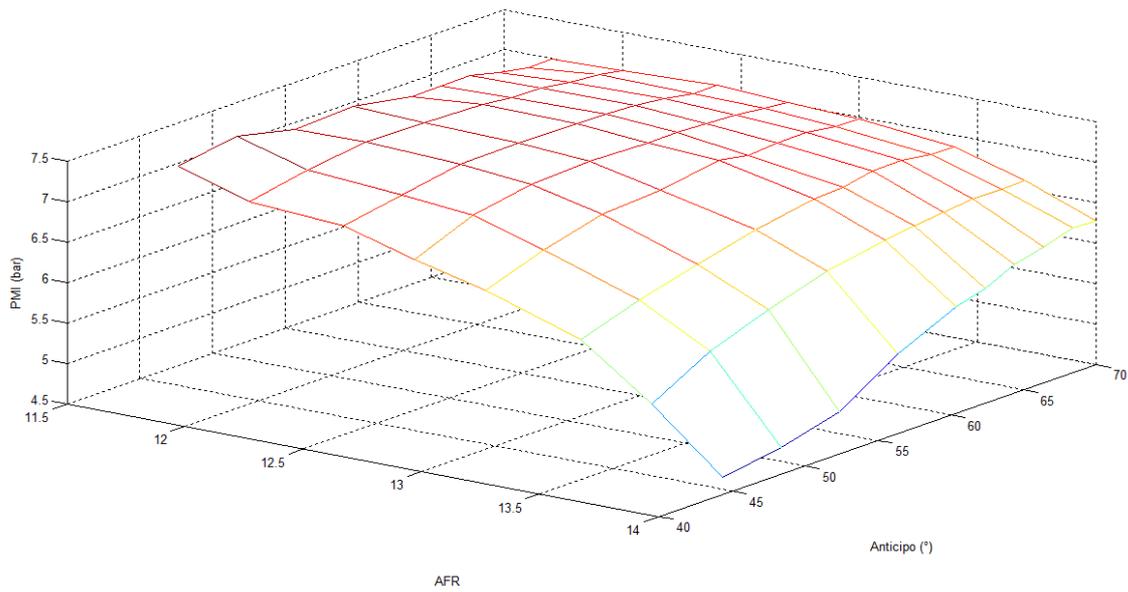


Figura 12-6 superficie pressione media indicata

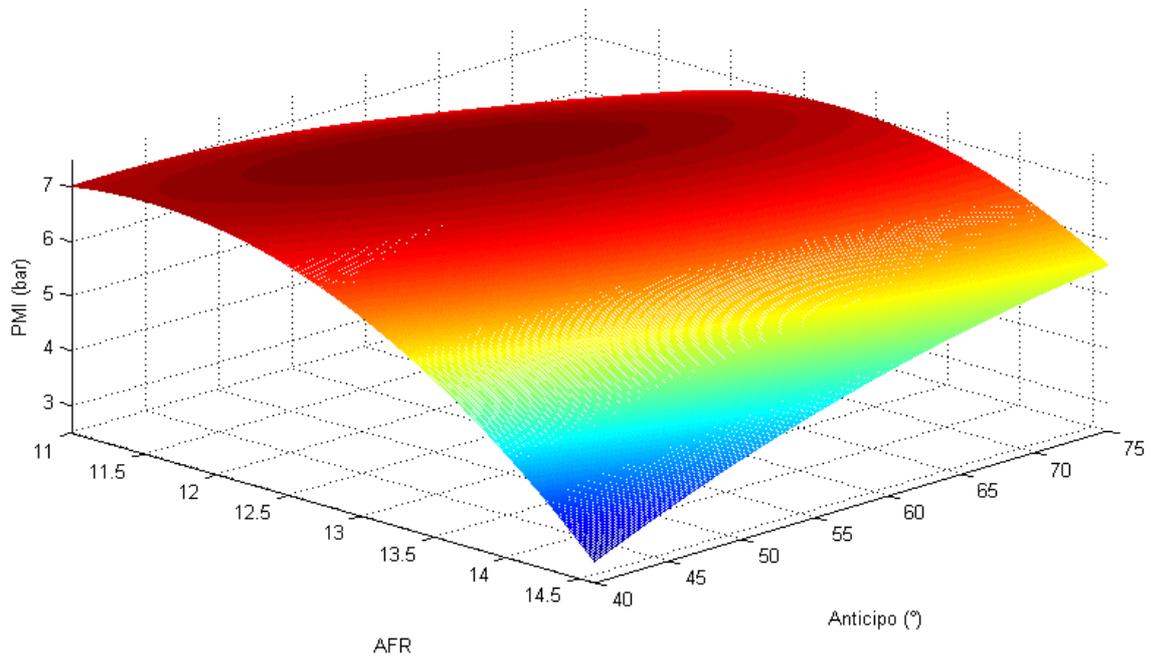


Figura 12-7 mappa pressione media indicata

L'errore quadratico medio RMSE vale 0.1142

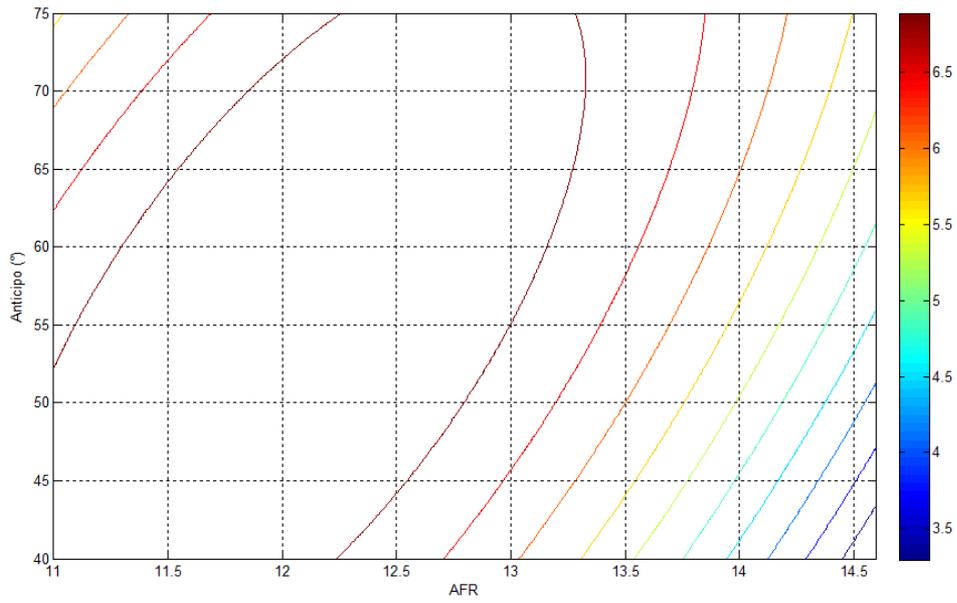


Figura 12-8 curve iso-PMI

## 12.5. Mappa temperatura gas di scarico

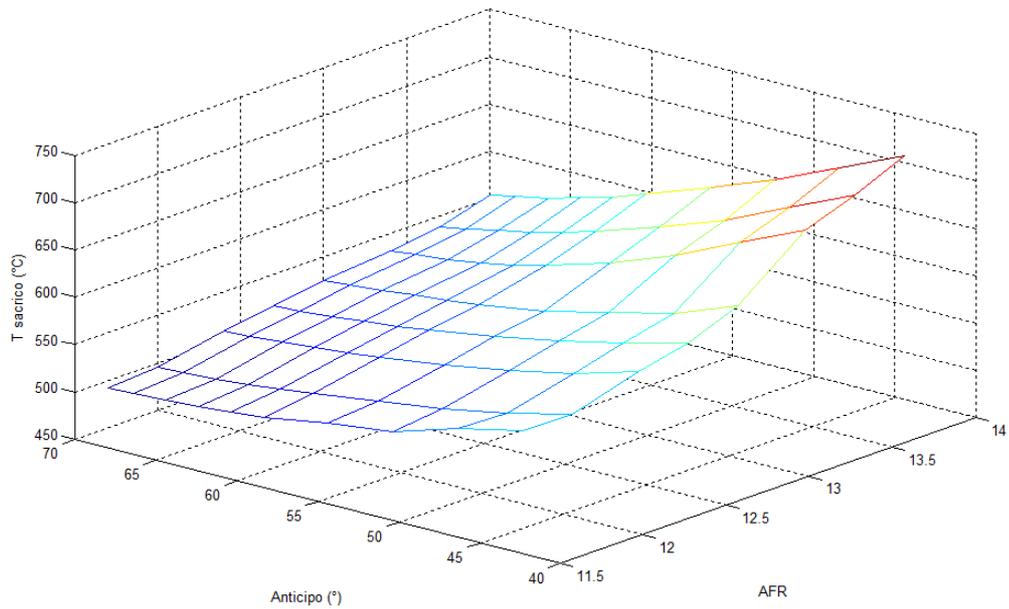


Figura 12-9 superficie temperatura gas di scarico

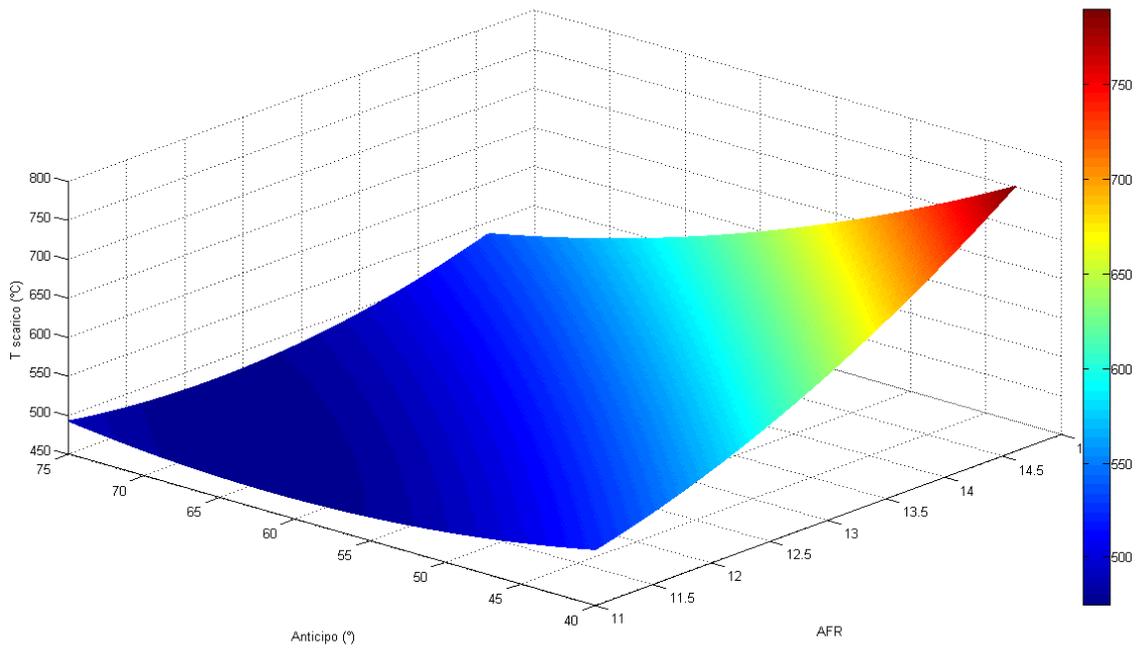


Figura 12-10 mappa temperatura gas di scarico

L'errore quadratico medio RMSE vale 5.310

## 12.6. Mappe per la generazione di MAPO

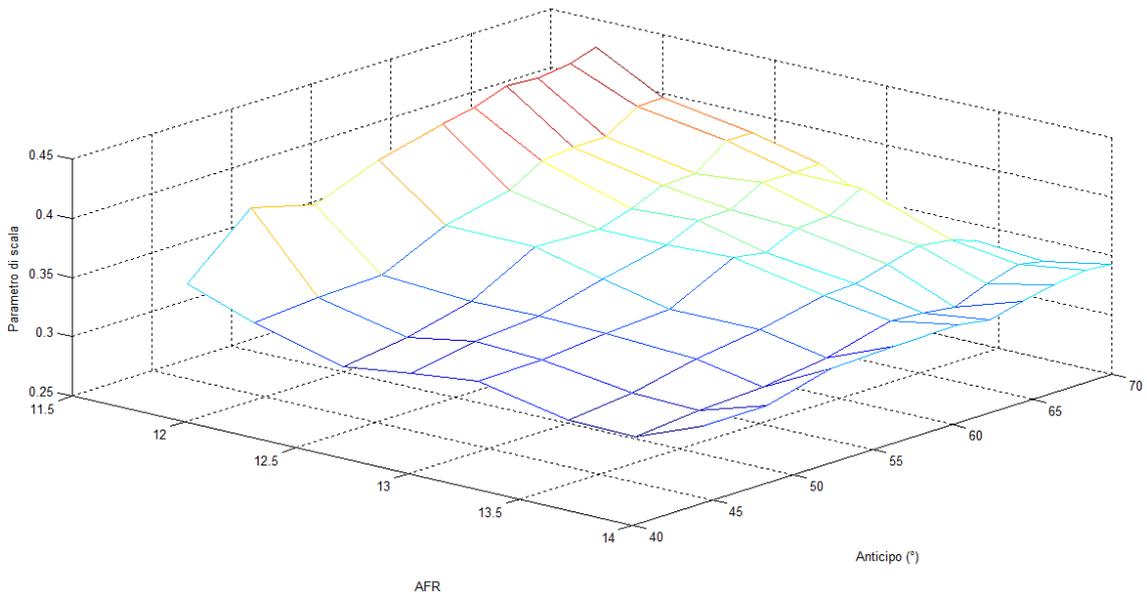
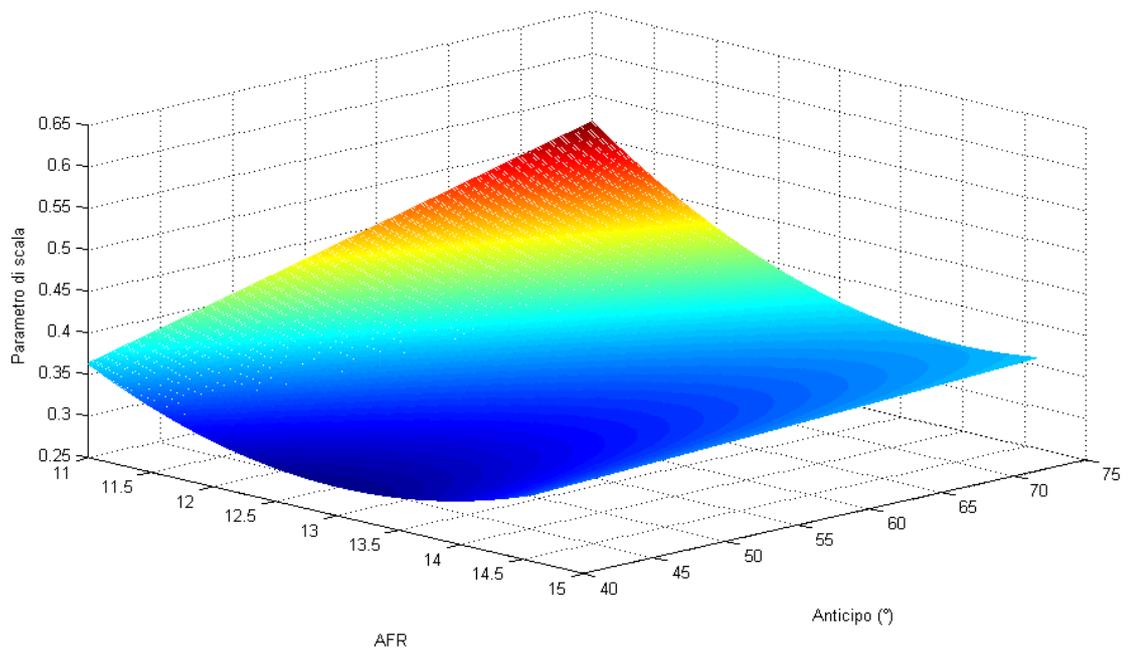
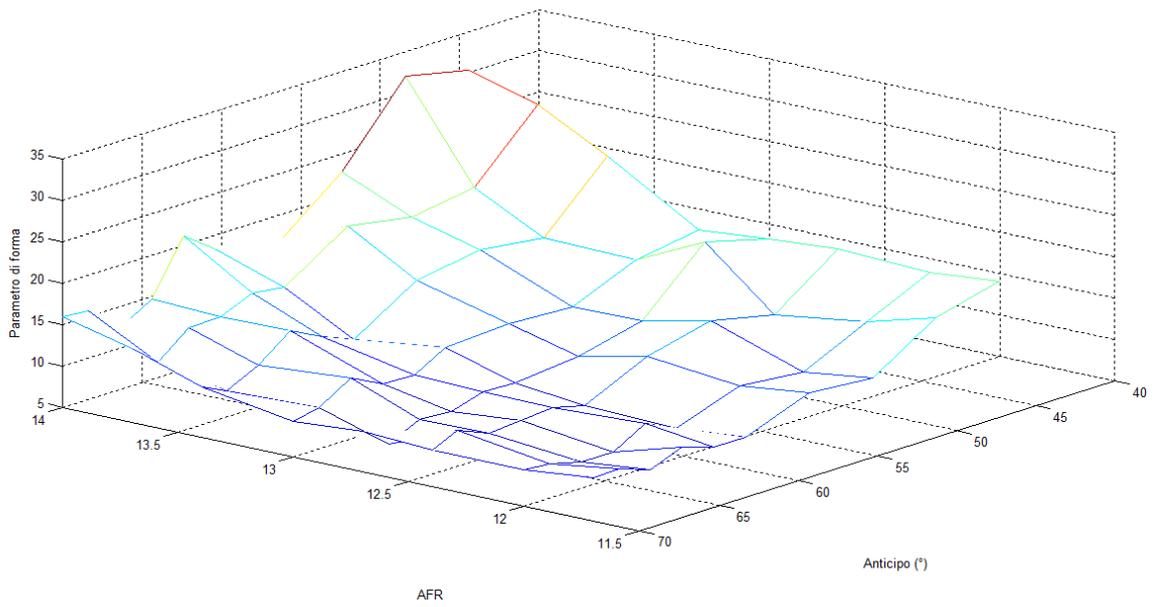


Figura 12-11 superficie parametro di scala

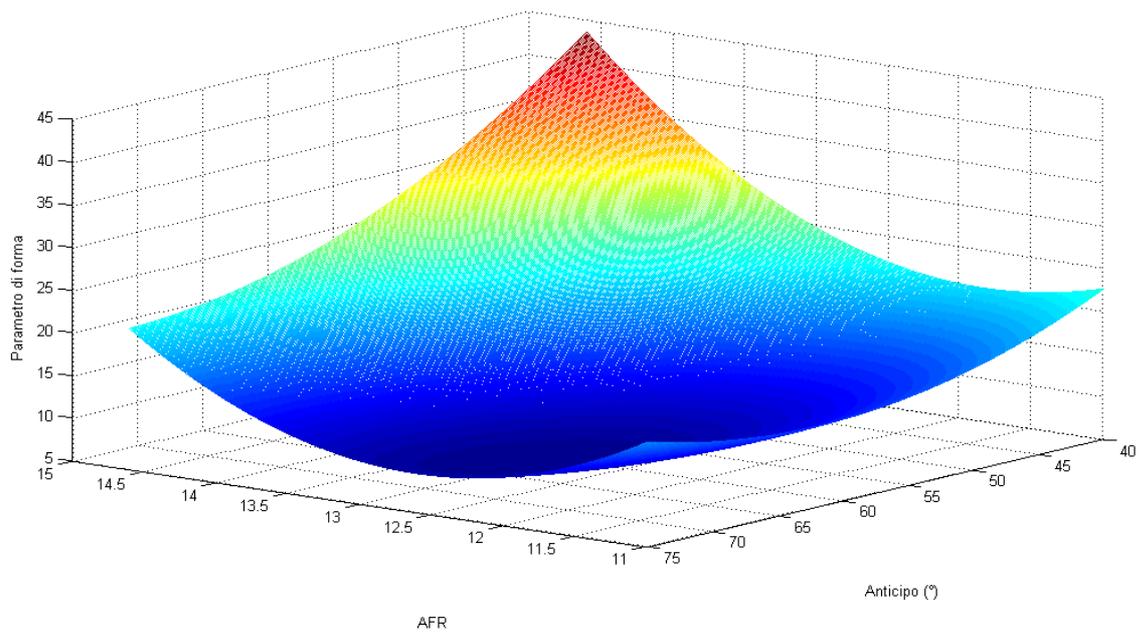


**Figura 12-12 mappa parametro di scala**

L'errore quadratico medio RMSE vale 0.0096



**Figura 12-13 superficie parametro di forma**



**Figura 12-14 mappa parametro di forma**

L'errore quadratico medio RMSE vale 1.7448

# 13. Simulazioni controllore 1.0 dati GSXR

## 13.1. Prova 1: delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto

La simulazione viene inizializzata con anticipo  $47^{\circ} \pm 2^{\circ}$  e AFR  $13.4 \pm 0.2$

Di seguito vengono riportati gli andamenti di delta anticipo e AFR comandati, temperatura scarico, PMI e *merit*.

L'anticipo e AFR convergono rispettivamente dopo 1000 e 900 cicli a  $56^{\circ}$  e 12.3

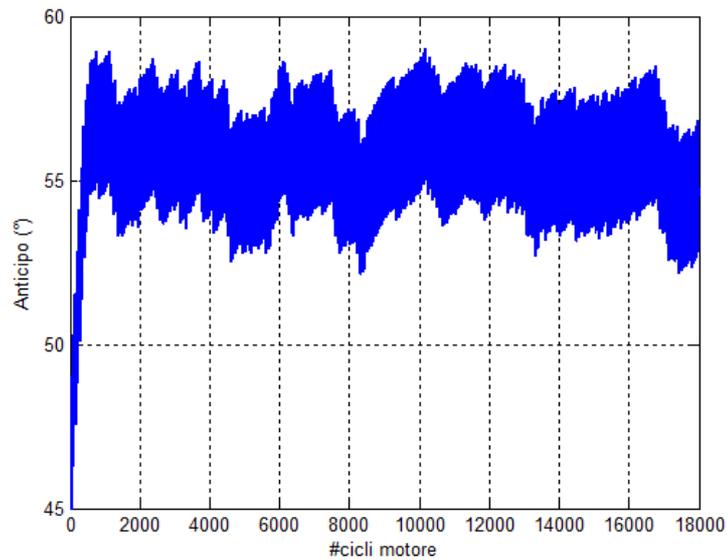


Figura 13-1 anticipo attuato

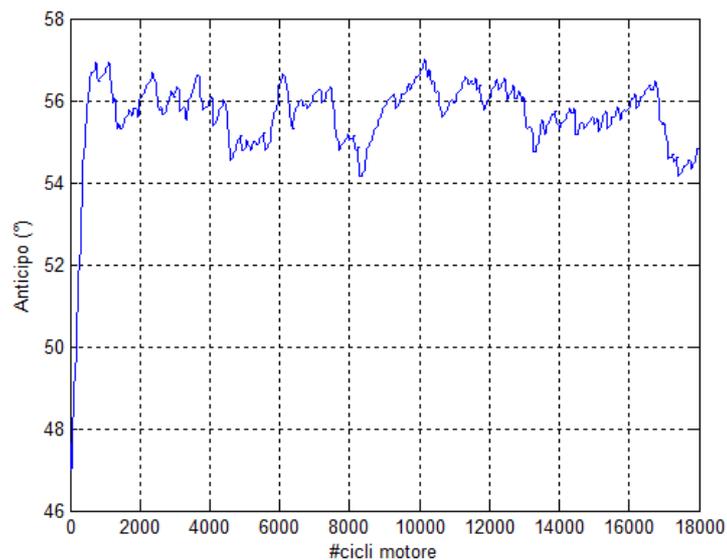
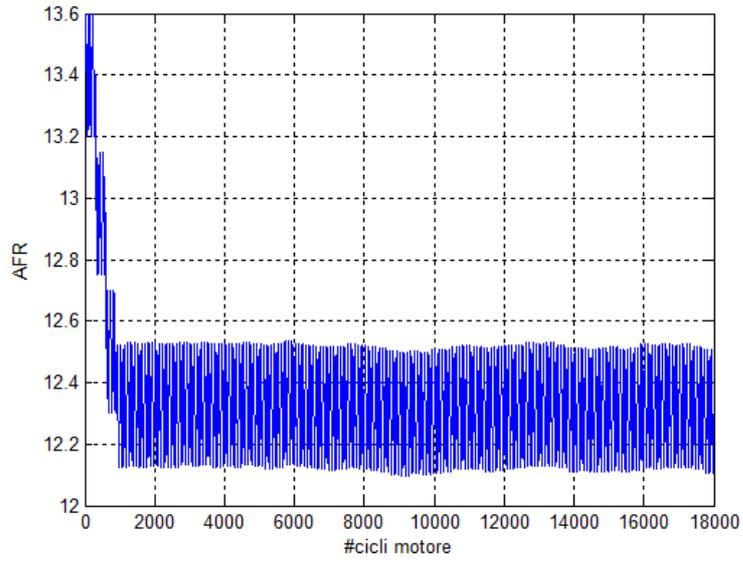
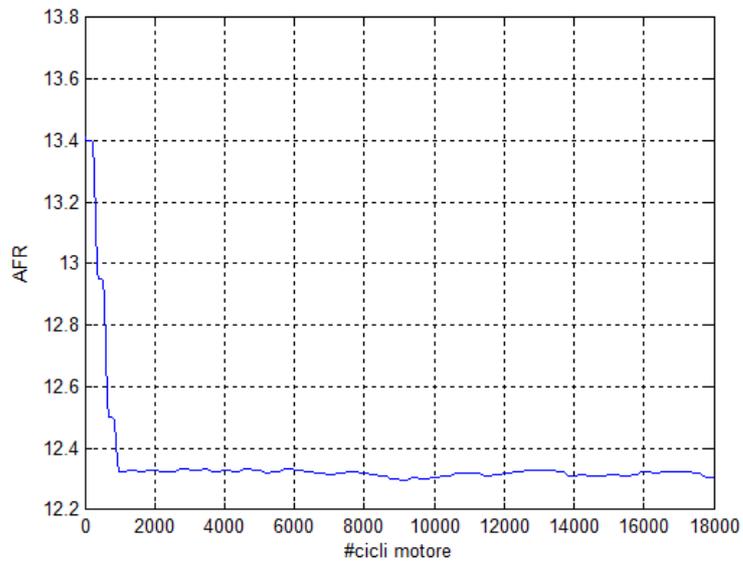


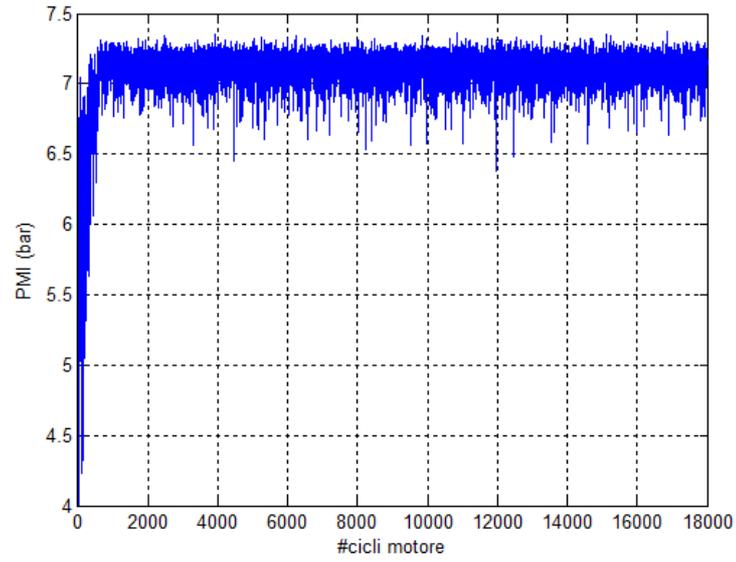
Figura 13-2 anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)



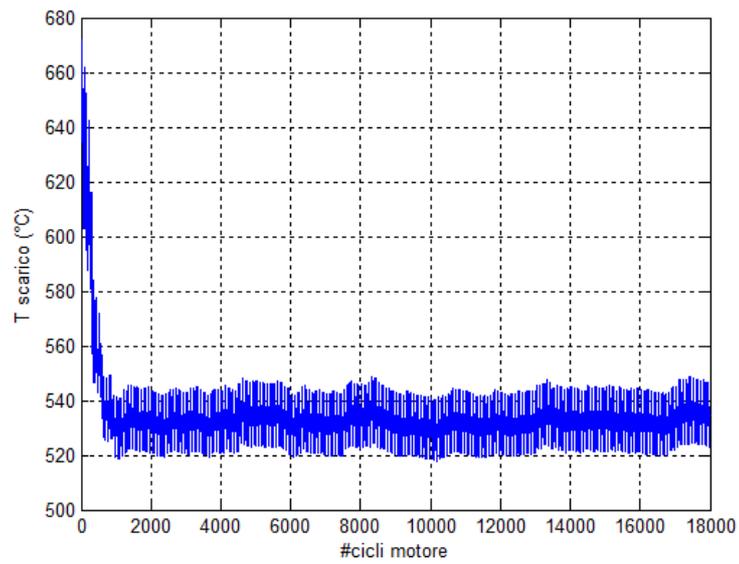
**Figura 13-3 AFR attuato**



**Figura 13-4 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**



**Figura 13-5 pressione media indicata**



**Figura 13-6 temperatura gas di scarico**

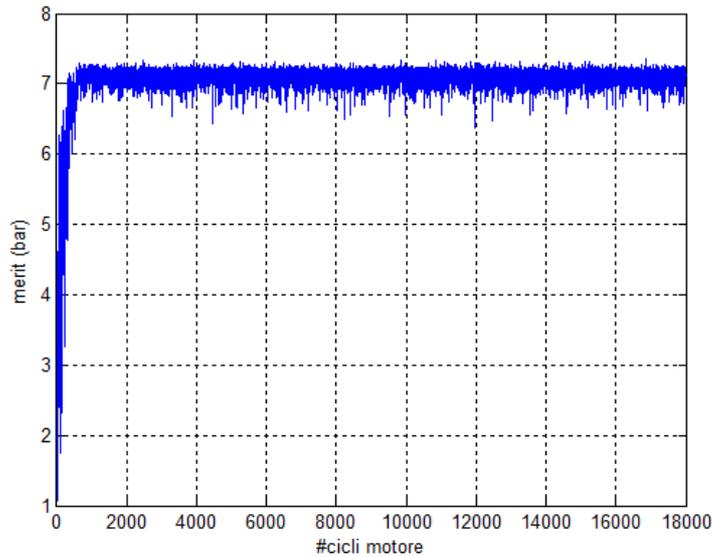


Figura 13-7 funzione di merito

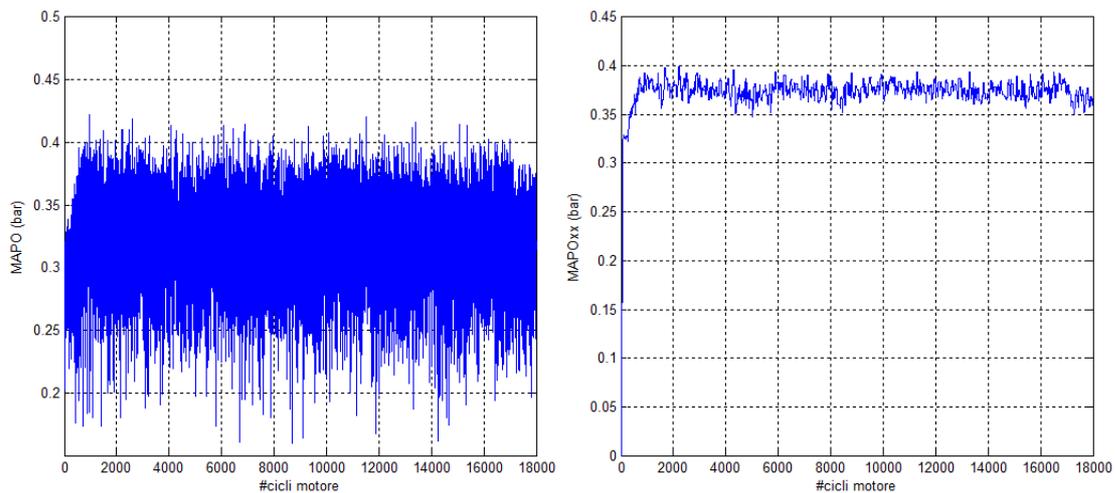


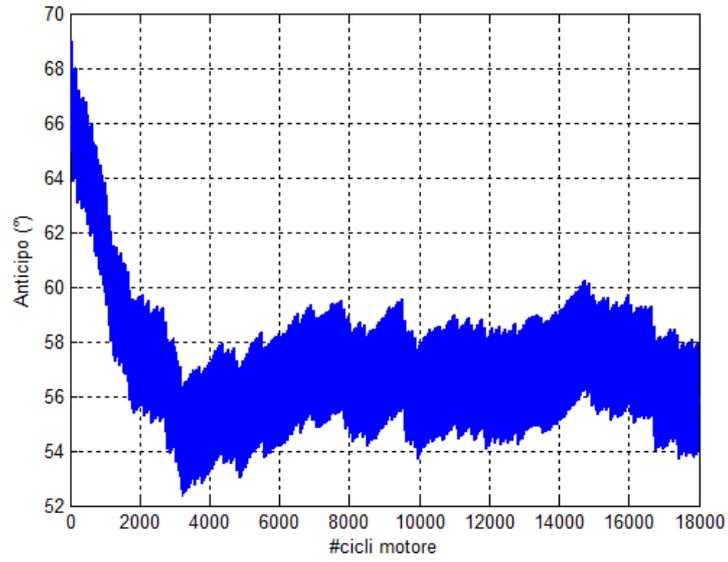
Figura 13-8 MAPO e MAPOxx limite

### 13.2. Prova 2: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto

La simulazione viene inizializzata con anticipo  $64^{\circ} \pm 2^{\circ}$  e AFR  $13.4 \pm 0.2$ .

Di seguito vengono riportati gli andamenti di delta anticipo e AFR comandati, temperatura scarico, PMI e *merit*.

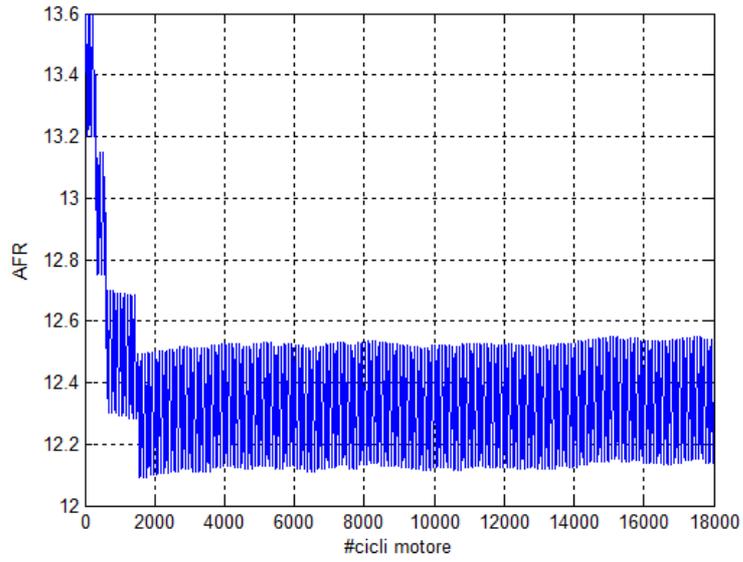
L'anticipo e AFR convergono rispettivamente dopo 3000 e 1500 cicli circa a  $56^{\circ}$  e 12.3



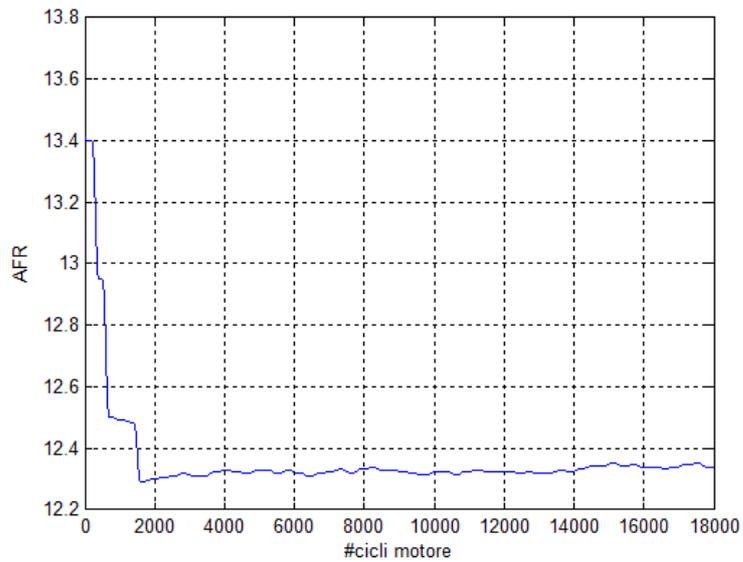
**Figura 13-9 anticipo attuato**



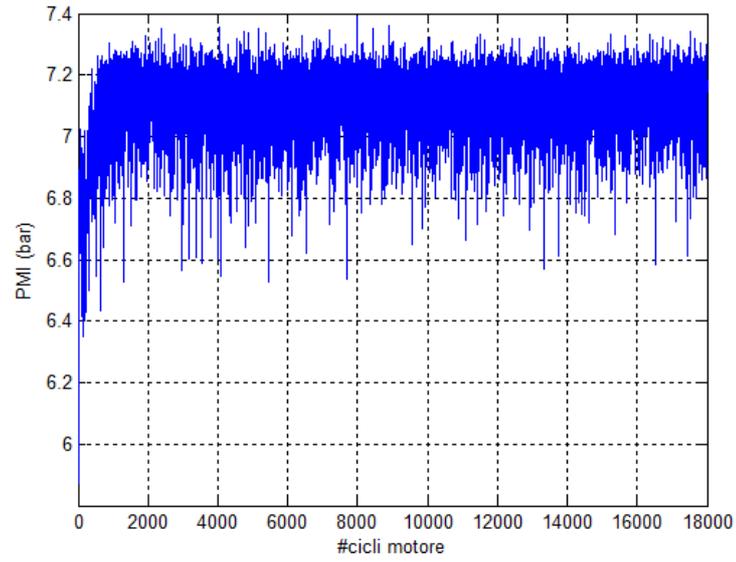
**Figura 13-10 anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**



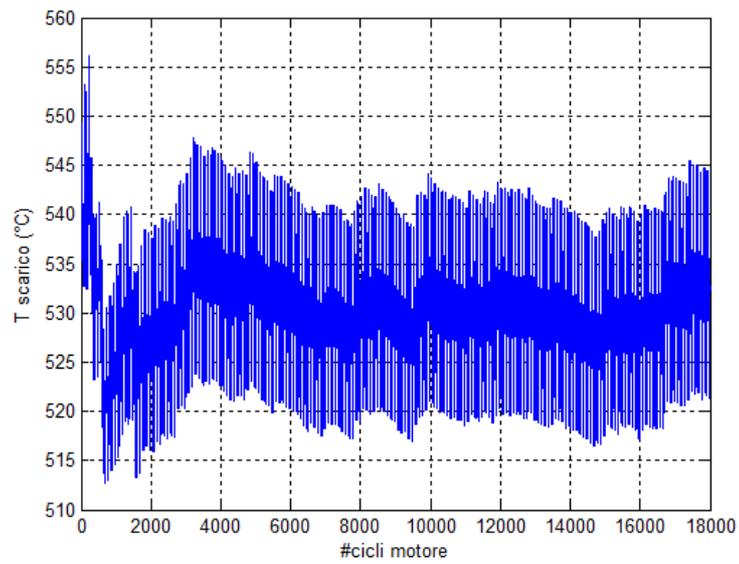
**Figura 13-11 AFR attuato**



**Figura 13-12 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**



**Figura 13-13 pressione media indicata**



**Figura 13-14 temperatura gas di scarico**

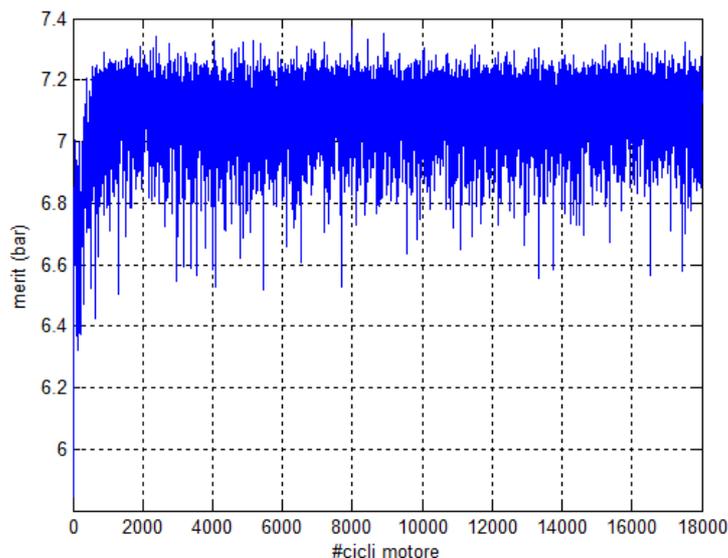


Figura 13-15 funzione di merito

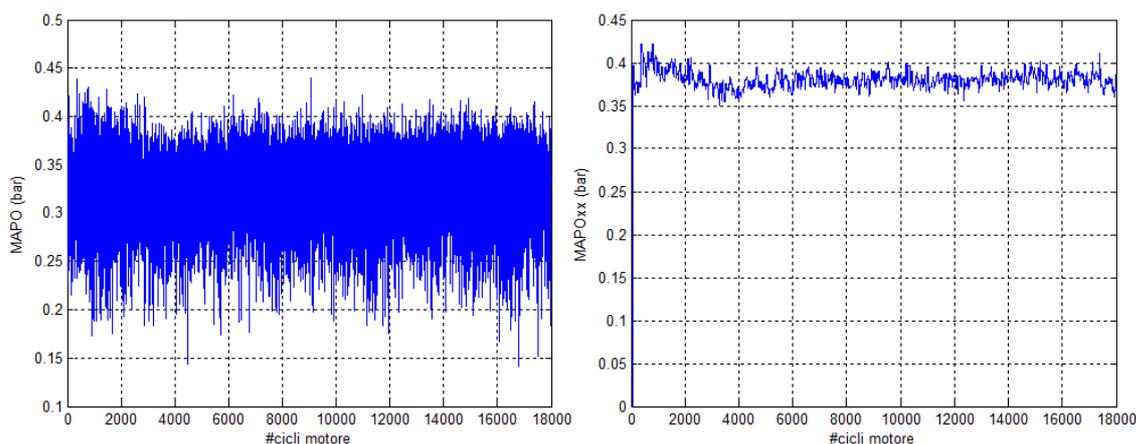


Figura 13-16 MAPO e MAPOxx limite

### 13.3. Considerazioni finali

Per tutte e due le prove il controllore corregge bene fin dai primi passi di calcolo. La prima prova va a regime in pochi cicli e l'oscillazione del valor medio dell'anticipo attuato a regime rimane in un range 2°.

Nella seconda prova l'anticipo converge più lentamente perché il punto iniziale in cui viene inizializzata la procedura presenta un gradiente basso di *merit* in funzione di SA; perciò l'algoritmo richiede più tempo.

Le oscillazioni di SA a regime sono da imputare al gradiente locale di *merit* in corrispondenza dell'ottimo; essendo piccolo, il controllore non individua chiaramente il massimo e tende a far oscillare il valor medio dell'anticipo più vistosamente rispetto alle prove fatte con i dati estrapolati del motore FIRE.

## 14. Simulazioni controllore 1.1 dati GSXR

Le simulazioni vengono eseguite con la seconda versione del controllore, cioè quello in cui nei primi ZZ cicli valuta la dipendenza di MFB50 da AFR ed esegue una correzione che nei successivi zz cicli mantiene costante l'anticipo calcola un valor medio di MFB50 e attua una correzione proporzionale alla distanza della media appena calcolata da un MFB50 "ottimo" (in bibliografia) di  $8^\circ$ .

### 14.1. Prova 1: delta anticipo iniziale basso e AFR iniziale alto

La simulazione viene inizializzata con anticipo  $46^\circ \pm 2^\circ$  e AFR  $13.4 \pm 0.2$ .

Di seguito vengono riportati gli andamenti di delta anticipo e AFR comandati, temperatura scarico, PMI e *merit*.

L'anticipo e AFR convergono rispettivamente dopo 2000 e 1400 cicli a  $56^\circ$  e 12.3

Al ciclo 300 viene comandato un delta AFR di -1, al ciclo 360 viene comandato un delta anticipo di  $+6^\circ$ .

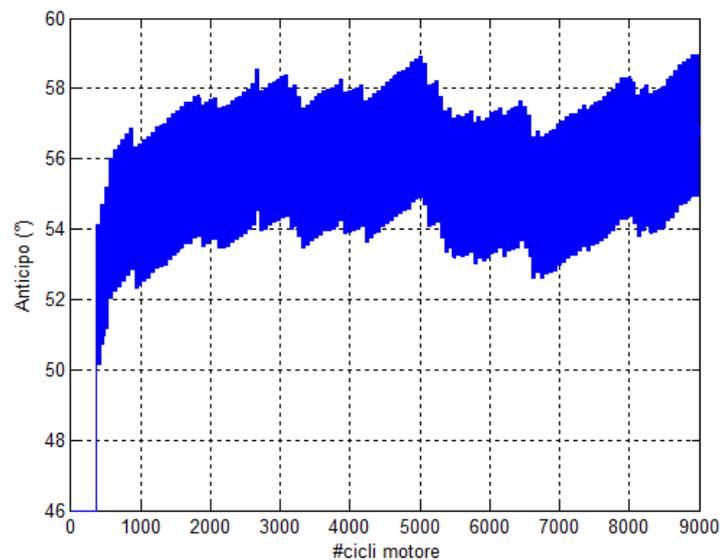
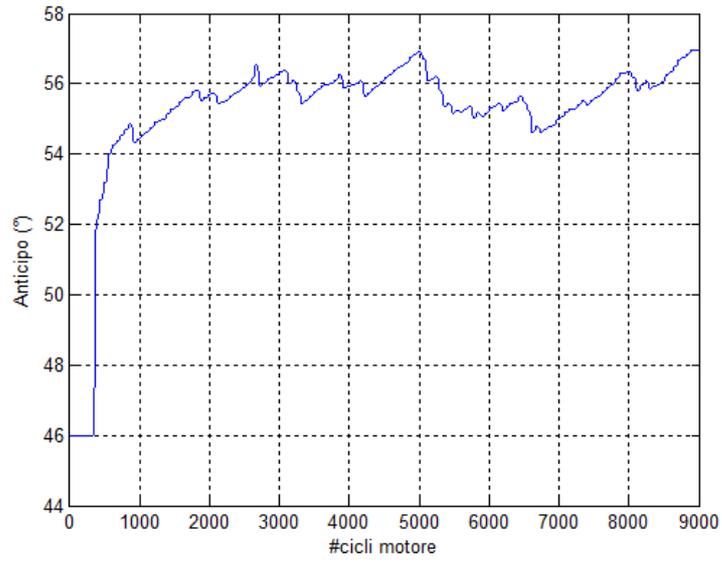
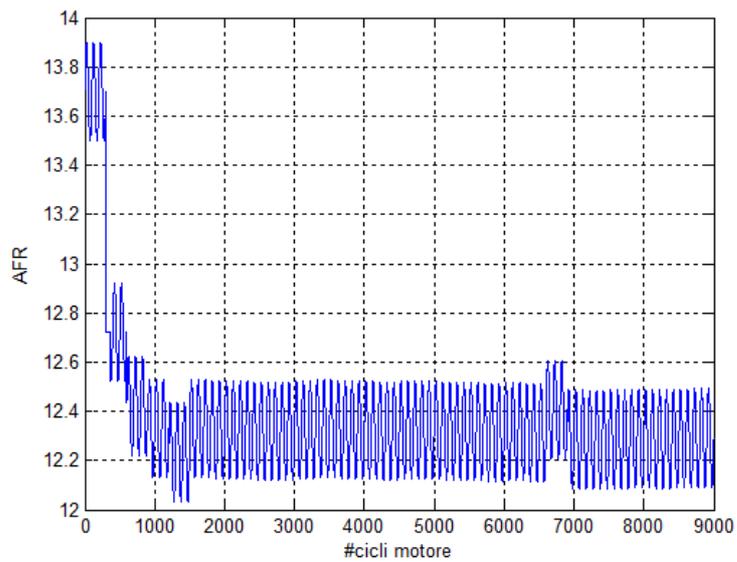


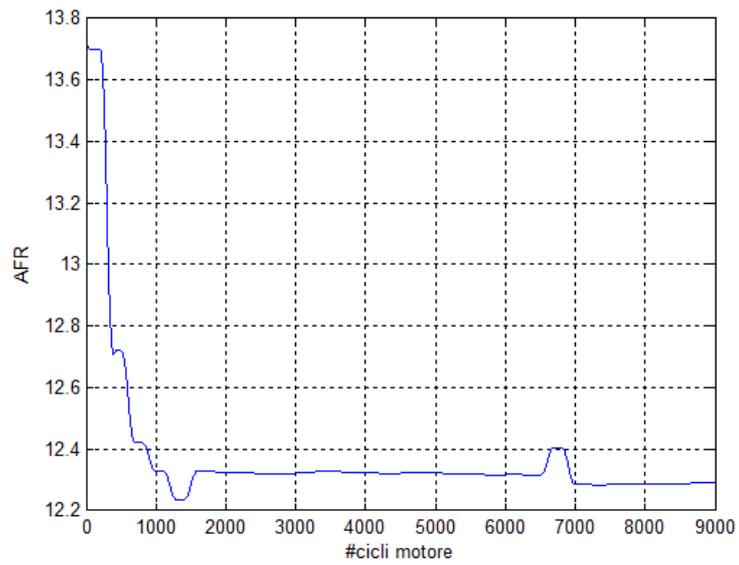
Figura 14-1 anticipo attuato



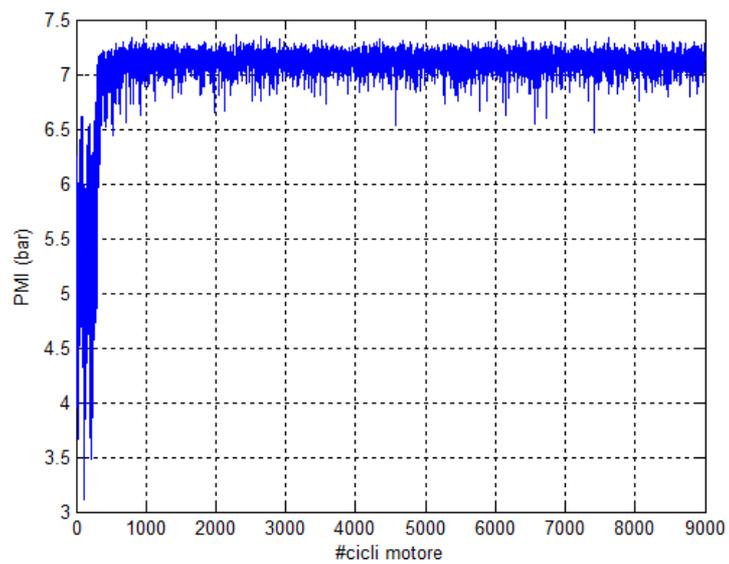
**Figura 14-2 anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**



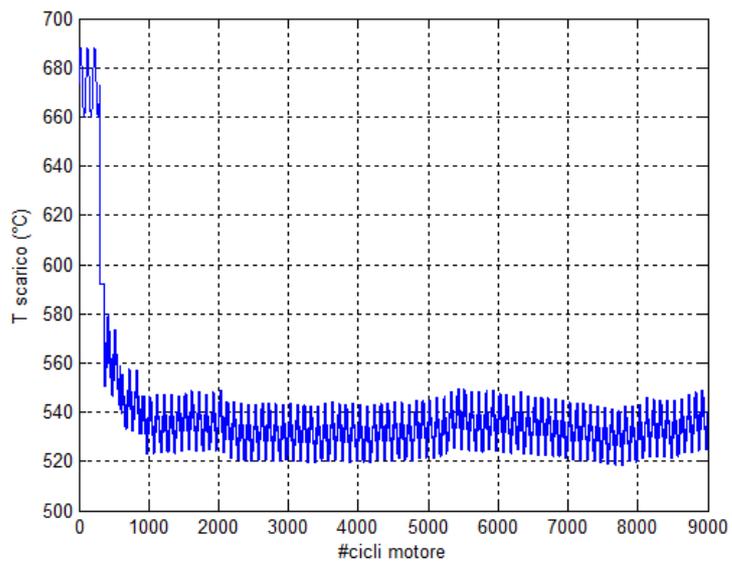
**Figura 14-3 AFR attuato**



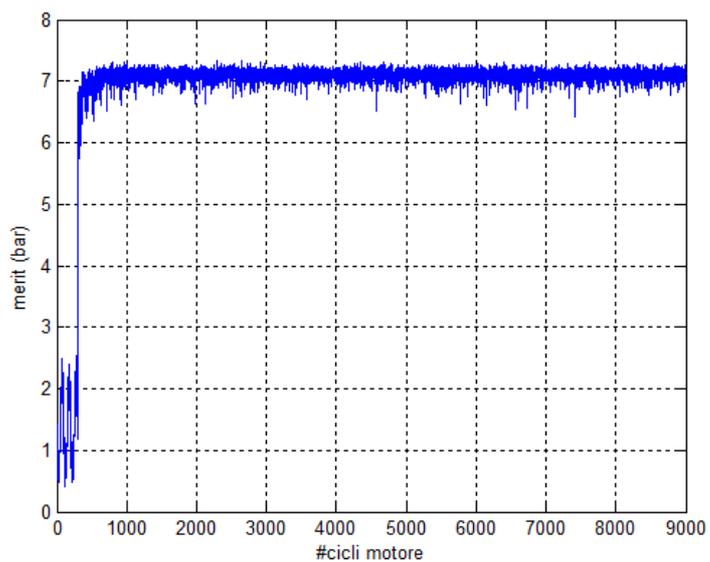
**Figura 14-4 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**



**Figura 14-5 pressione media indicata**



**Figura 14-6 temperatura gas di scarico**



**Figura 14-7 funzione di merito**

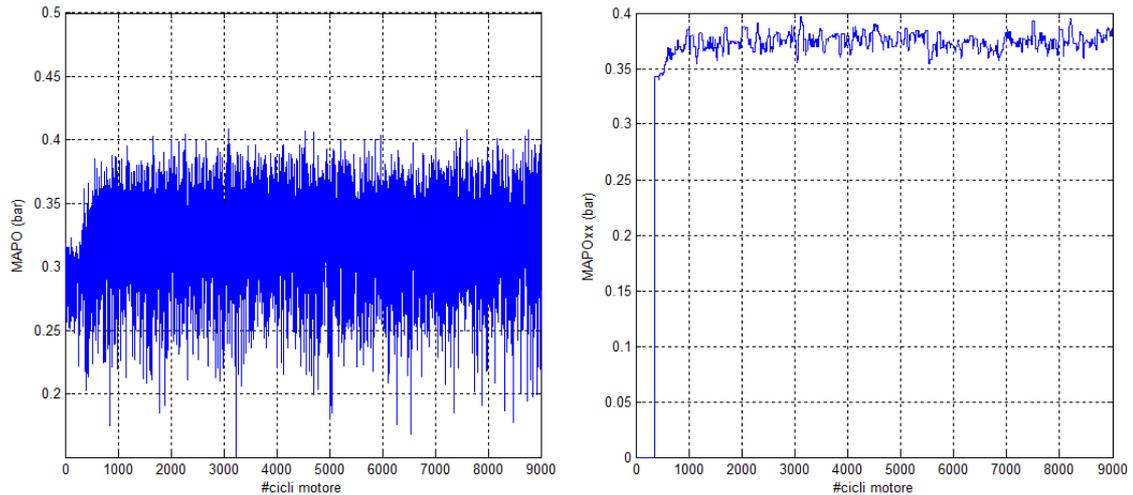


Figura 14-8 MAPO e MAPOxx limite

## 14.2. Prova 2: delta anticipo iniziale alto e AFR iniziale alto

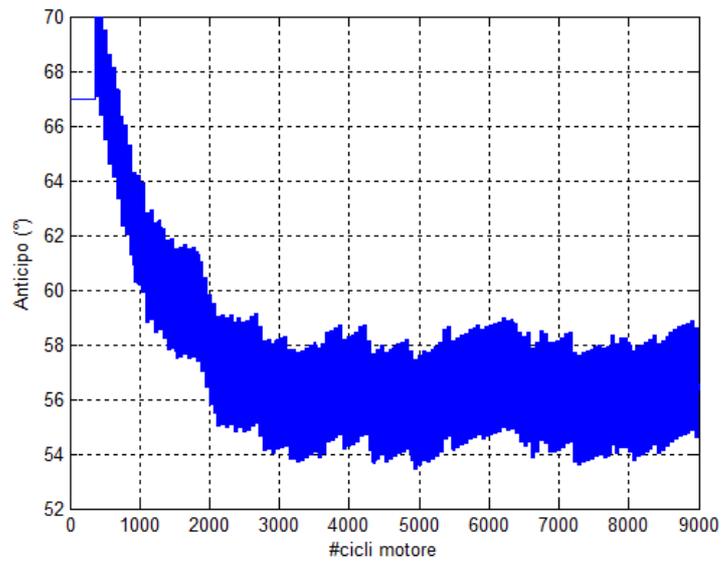
La simulazione viene inizializzata con anticipo  $64^{\circ} \pm 2^{\circ}$  e AFR  $13.4 \pm 0.2$ .

Di seguito vengono riportati gli andamenti di delta anticipo e AFR comandati, temperatura scarico, PMI e *merit*.

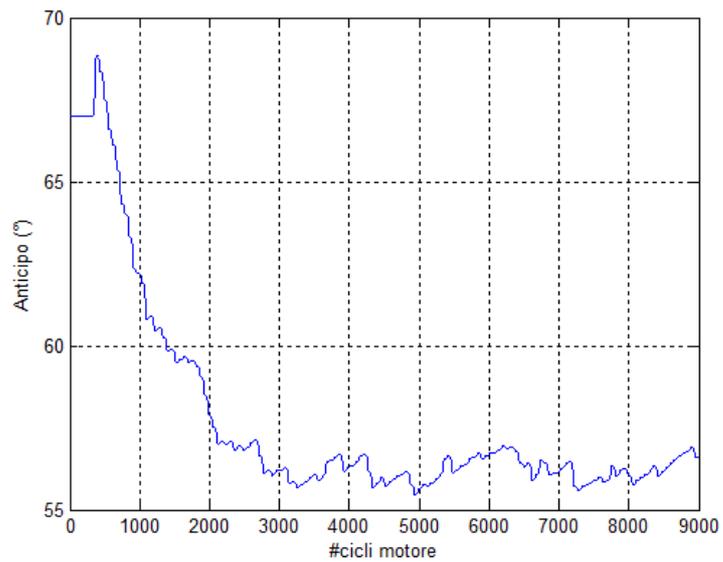
L'anticipo e AFR convergono rispettivamente dopo 2500 e 2000 cicli circa a  $56^{\circ}$  e 12.3

Al ciclo 300 viene comandato un delta AFR di -1.1, al ciclo 360 viene comandato un delta anticipo di  $+2^{\circ}$ .

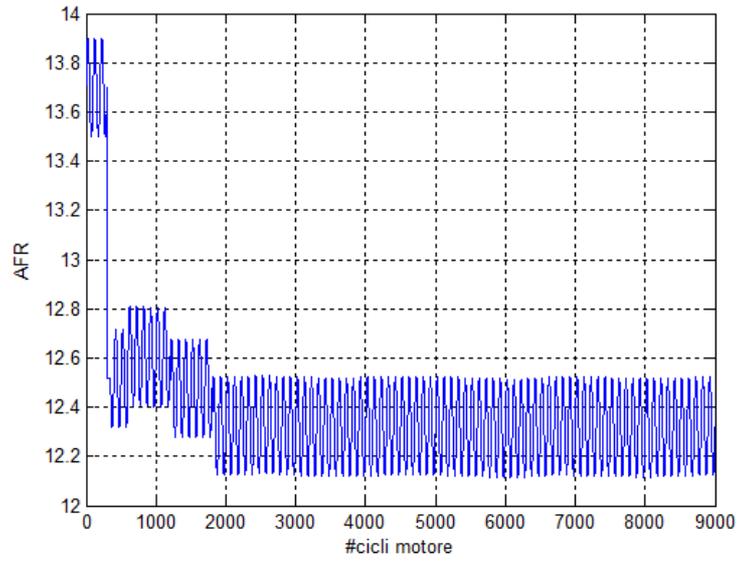
La prima correzione è positiva perché nei zz cicli in cui ad viene mantenuto costante  $MFB50_{medio}$  vale  $9.2^{\circ}$ , per cui la differenza  $(MFB50_{medio} - 8^{\circ}) = 1.2^{\circ}$  cioè secondo la logica del controllore bisogna aumentare l'anticipo per spostare indietro la fase di combustione. L'anticipo viene portato alla condizione di ottimo con la seconda parte del controllo.



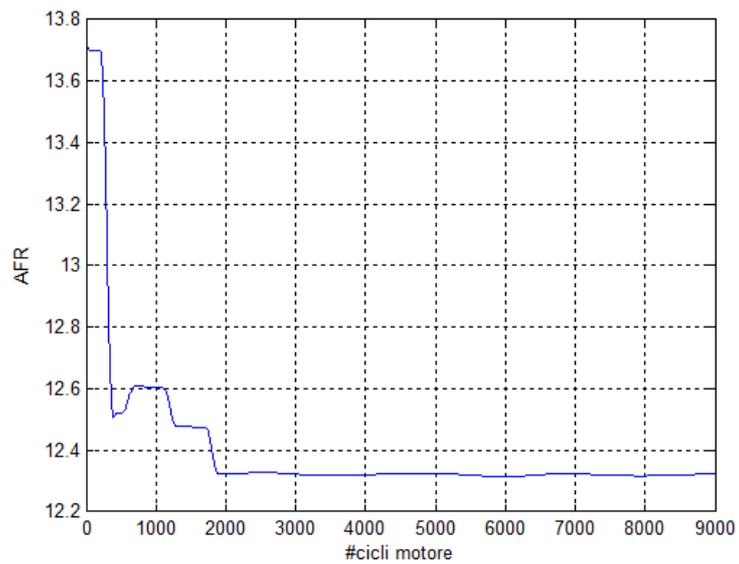
**Figura 14-9 anticipo attuato**



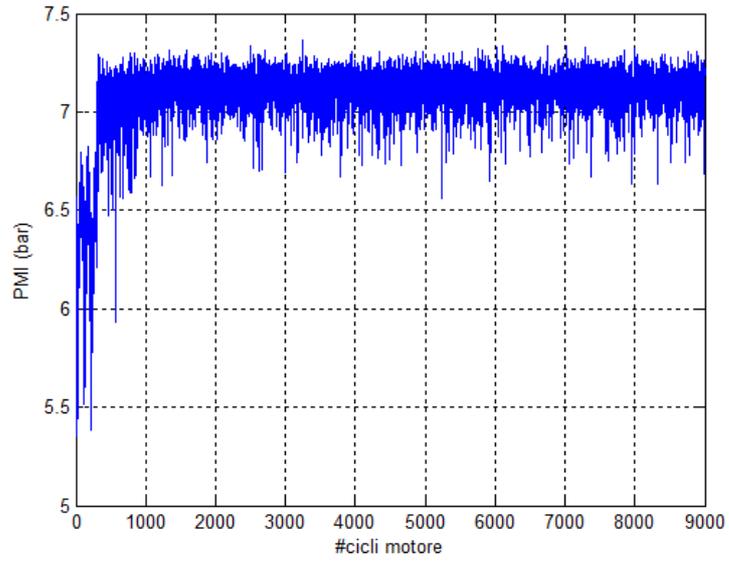
**Figura 14-10 anticipo filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/20 campioni)**



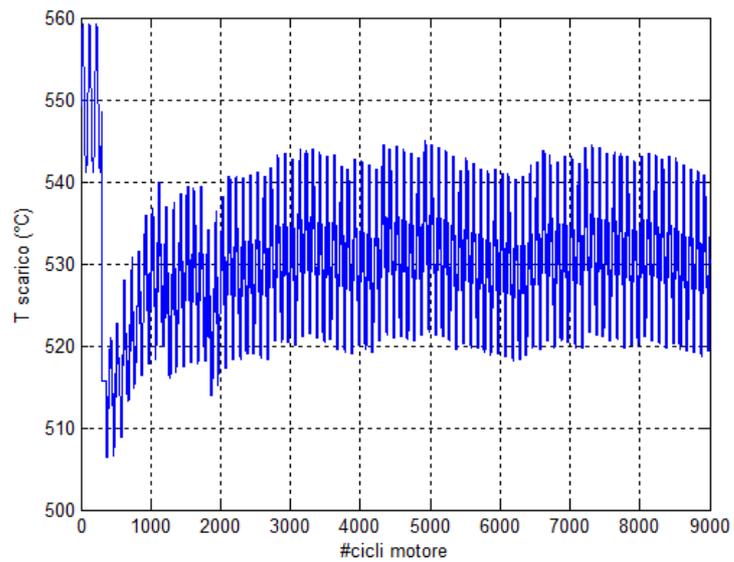
**Figura 14-11 AFR attuato**



**Figura 14-12 AFR filtrato passa basso (frequenza di taglio 1/100 campioni)**



**Figura 14-13 pressione media indicata**



**Figura 14-14 temperatura gas di scarico**

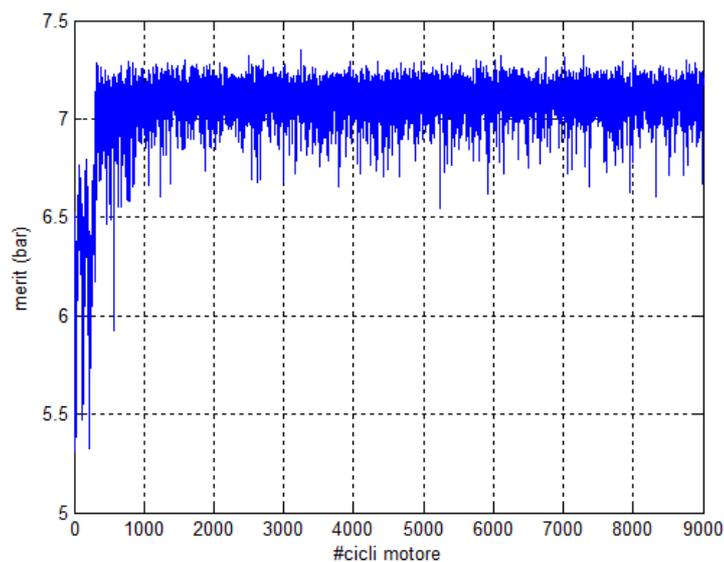


Figura 14-15 funzione di merito

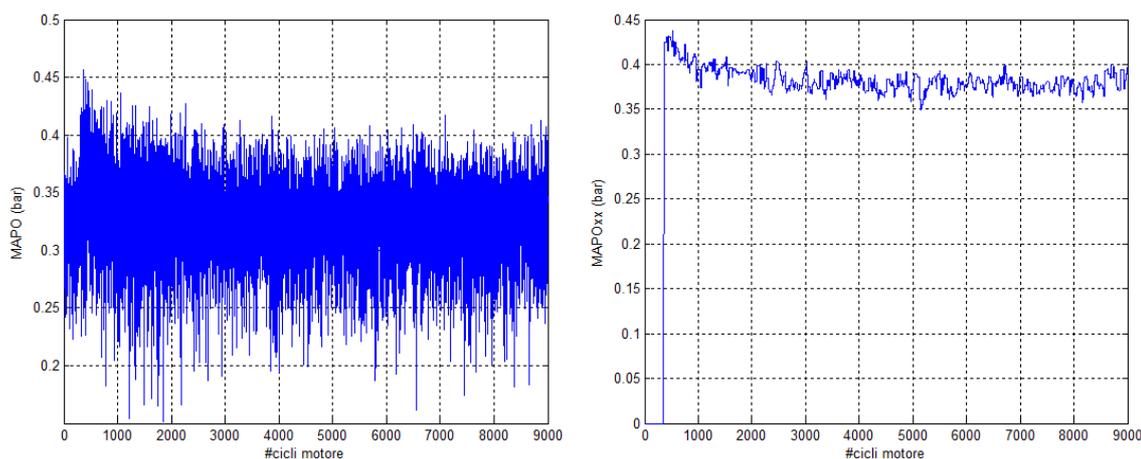


Figura 14-16 MAPO e MAPOxx limite

### 14.3. Considerazioni finali

Le oscillazioni di SA a regime sono da imputare al gradiente locale di *merit* in corrispondenza dell'ottimo; essendo piccolo, il controllore non individua chiaramente il massimo e tende a far oscillare il valor medio dell'anticipo più vistosamente rispetto alle prove fatte con i dati estrapolati del motore FIRE.

La seconda versione del controllore, oltre a non migliorare le prestazioni, non garantisce il giusto grado di affidabilità. Può succedere che, se la procedura viene inizializzata con valori vicini a quelli ottimi, le prime correzioni che vengono comandate portano l'algoritmo in instabilità e di fatto rendono impossibile la convergenza all'ottimo.



## 15. Conclusioni

Le simulazioni hanno messo in evidenza che anticipo di accensione e composizione miscela convergono al valore ottimo indipendentemente dai punti iniziali di partenza dell'algoritmo.

Le prove inizializzate con valori di anticipo elevati necessitano, per convergere, di un numero di cicli maggiore rispetto alle prove inizializzate con anticipi bassi. Il motivo è da ricercare nella forma della curva ad ombrello: a sinistra del vertice (cioè poco anticipato) la pendenza è maggiore rispetto alla destra del vertice. Siccome le correzioni sono proporzionali al gradiente della funzione di merito che a sua volta dipende dalla pressione media indicata, nelle zone a pendenza maggiore i delta anticipo comandati sono maggiori.

In futuro la procedura di calcolo proposta potrà essere implementata in real-time su di un sistema per il controllo motore ed essere testata in tutto l'arco di funzionamento del motore. Quando verrà implementato bisognerà predisporre costanti di guadagno proporzionali alla velocità del motore e trovare dei criteri automatici per lo spegnimento delle perturbazioni sinusoidali quando si arriva a regime.

Nell'ottica di incrementarne le potenzialità, la procedura proposta potrà essere applicata al controllo di altre variabili come EGR e VVT per massimizzare funzioni di merito che tengano in considerazione, per esempio, gli inquinanti e il consumo medio specifico.



## A. Appendice 1: trasformata finita di Fourier

Introduciamo ora la **trasformata discreta di Fourier**, un argomento di grande interesse pratico, poiché è ciò che viene in effetti normalmente calcolato col computer. Per far ciò poniamo che la  $\{ x_i \}$  non sia di lunghezza infinita, ma lunga  $N$  (ovvero che sia nulla per  $i < 0$  e per  $i > N-1$ ).

Definiamo trasformata discreta di Fourier (**DFT**) la seguente successione:

$$X_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i W_N^{k \cdot i}$$

dove

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} = \cos \frac{2\pi}{N} - j \sin \frac{2\pi}{N}$$

$X_k$  è una quantità complessa e si possono calcolare modulo e fase.

Il calcolo puntuale della trasformata discreta è conveniente quando non interessa analizzare tutto lo spettro, si ha un minore carico computazionale.

L'implementazione in Matlab può essere fatta con il seguente codice:

```
W=exp(-1i*2*pi/60*k.*[0:zz-1]);      %N=zz=60 numero di campioni
                                       %k ordine armonica
fft1=sum(x(1:60).*W)                 %x segnale campionato di 60 punti
```

Nell'implementazione real-time si definiscono all'inizio della procedura due vettori costanti, il primo di lunghezza  $zz$  e il secondo di lunghezza  $ZZ$ ; la trasformata discreta di Fourier si riduce ad una sommatoria di prodotti tra il segnale campionato e i vettori precedentemente definiti. Si evita di dover richiamare di volta in volta la function di Matlab `fft`.



## B. Appendice 2: script Matlab

### a) Controllore 1.0 dati 1200 FIRE

```
clc
clear all
close all
load mappamfb50
load mappaPar_forma
load mappaPar_scala
load mappaTscarico
load sa_afr
load 2400220146
load deviazione_pmi
% Valori pmi massima per AFR variabile
A=[5.08271989966556,5.11676086956522,5.09806187290970,5.08158946488294,5
.02039632107023,4.93926588628762,4.75293311036789];
B=[13.2 13.4 13.7 14 14.3 14.6 14.9];
Tlim=max(max(mappaT_scarico))-min(min(mappaT_scarico));
% Approssima le nuvole di punti sul piano mfb-pmi con una cubica
% e la divide per il massimo valore della cubica per ottenere una pmi
% normalizzata
p=polyfit(mfb1,pmi1/5.0143,3);

% Valori iniziali di anticipo e composizione miscela
afr0=12
adv0=5

% Inizializza le varie grandezze con vettori di zeri
y=zeros(1,18000);
r=zeros(1,18000);
imepnorm=zeros(1,18000);
scala=zeros(1,18000);
imep=zeros(1,18000);
scale=zeros(1,18000);
shape=zeros(1,18000);
mapo=zeros(1,18000);
mapoxx=zeros(1,18000);
T=zeros(1,18000);
merit=zeros(1,18000);
amp1=zeros(1,18000);
fase_merit_sa=zeros(1,18000);
fase_merit_afr=zeros(1,18000);
faseecc_sa=zeros(1,18000);
delta_sa=zeros(1,18000);
amp2=zeros(1,18000);
faseecc_afr=zeros(1,18000);
delta_afr=zeros(1,18000);
a=zeros(1,18000);

% Definisce le frequenze dei disturbi come inverso di numero di cicli
% motore
freq_sa=1/20;
freq_afr=1/100;

% Definisce l'ampiezza delle finestre di osservazione della funzione di
% merito per la correzione di AFR e anticipo
```

```

ZZ=300;
zz=60;

% Definisce le costanti di guadagno del controllo sull'anticipo e del
% controllo su AFR
kadv=2.125;
kafr=0.3;

% Definisce due vettori di 18000 elementi, il primo con i valori di
% anticipo, il secondo con i valori di AFR
ad=zeros(18000,1)+adv0;
afr=zeros(18000,1)+afr0;

% definisce l'ampiezza del disturbo sull'anticipo e su AFR
amp_sa=2;
amp_afr=0.2;

% Definisce i disturbi sinusoidali dell'anticipo e di AFR come somma di
una
% componente media ed una sinusoidale
ecc_sa(1:18000)=amp_sa*sin(2*pi*freq_sa*rem([1:18000],1/freq_sa));
ad(1:zz)=ecc_sa(1:zz)'+ad(1:zz);
ecc_afr(1:18000)=amp_afr*sin(2*pi*freq_afr*rem([1:18000],1/freq_afr));
afr(1:ZZ)=ecc_afr(1:ZZ)'+afr(1:ZZ);
advlim=zeros(1,701)+30;

% Simulazione dei primi zz cicli motore: attraverso anticipo e AFR
% vengono selezionati MFB50 medio, Tscarico e i
% parametri che descrivono la distribuzione weibull del MAPO.
% Si calcola un valore della funzione di merito.
% La deviazione standard di MFB50 dipende solo da AFR e viene calcolata
% con la function []=regressione()
for gg=1:1:zz
    X=fix(((afr(gg)-11)*100)+1);
    [Y,I] = min(abs([0:0.1:30]-ad(gg)));
    y(gg)=regressione(afr(gg));
    MFB50=mappa_mfb50(I,X);
    r(gg) = MFB50 + y(gg)*randn;
    imepnorm(gg)=polyval(p,r(gg));
    scala(gg)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(gg));
    imep(gg)=imepnorm(gg)*scala(gg)+0.055*randn;
    scale(gg)=par_scala(I,X)+0.3;
    shape(gg)=par_forma(I,X)+0.5;
    mapo(gg)=random('wbl',scale(gg),shape(gg));
    T(gg)=mappaT_scarico(I,X)-min(min(mappaT_scarico));
    merit(gg)=imep(gg)*(1-1/(1+exp(0.05*(200-T(gg)))));
    a(gg)=1-1/(1+exp(0.05*(200-T(gg))));
end
inc=zz;

% Ciclo for del controllo su anticipo e AFR
% Esegue la FFT di merit e dell'anticipo degli ultimi zz campioni alla
% frequenza del disturbo sull'anticipo, si ricavano ampiezza e fase
% dell'armonica. Se sono contro-fase la costante di guadagno viene
% raddoppiata, se l'ampiezza dell'armonica di merit è maggiore di 0.025
% kadv non viene modificata, altrimenti viene dimezzata
for hh=zz+1:inc:18000
    fft_merit=fft(merit(hh-zz:hh-1)/zz);
    amp1(hh)=abs(fft_merit(zz*freq_sa+1));
    fase_merit_sa(hh)=angle(fft_merit(zz*freq_sa+1));

```

```

fft_ecc_sa=fft(ad(hh-zz:hh-1));
faseecc_sa(hh)=angle(fft_ecc_sa(zz*freq_sa+1));
if sign(fase_merit_sa(hh)/faseecc_sa(hh))<0
    k_adv=kadv*2;
else if amp1(hh)>0.025
    k_adv=kadv*1;
else k_adv=0.5*kadv;
end
end
% delta anticipo per ogni passo di calcolo viene limitato al massimo a
% zz*0.01*kadv=60*0.01*4.25=2.55°
delta_sa(hh)=k_adv*min(amp1(hh)/mean(merit(hh-zz:hh-
1)),0.01)*sign(fase_merit_sa(hh)/faseecc_sa(hh))*zz;
ad(hh:hh+inc-1)=min(adv0+ecc_sa(hh:hh+inc-
1)+sum(delta_sa),advlim(X));
ad(hh:hh+inc-1)=max(ad(hh:hh+inc-1),0);

% Esegue la FFT di merit e di AFR degli ultimi ZZ campioni alla frequenza
% del disturbo su AFR, si ricavano ampiezza e fase dell'armonica. La
% costante di guadagno viene scalata di un fattore 10 quando l'ampiezza
% dell'armonica è minore di 0.01, in altre parole quando merit non è più
% sensibile ad AFR la correzione deve essere quasi nulla
if rem(hh-1,ZZ)==0
    fft_merit=fft(merit(hh-ZZ:hh-1)/ZZ);
    amp2(hh)=abs(fft_merit(ZZ*freq_afr+1));
    fase_merit_afr(hh)=angle(fft_merit(ZZ*freq_afr+1));
    fft_ecc_afr=fft(ecc_afr(hh-ZZ:hh-1));
    faseecc_afr(hh)=angle(fft_ecc_afr(ZZ*freq_afr+1));
    if amp2(hh)>0.01
        k_afr=1*kafr;
    else k_afr=0.1*kafr;
    end
% delta AFR per ogni passo di calcolo viene limitato al massimo a
% ZZ*0.005*kafr=300*0.005*0.3=0.45
delta_afr(hh)=k_afr*min(amp2(hh)/mean(merit(hh-ZZ:hh-
1)),0.005)*sign(fase_merit_afr(hh)/faseecc_afr(hh))*ZZ;
afr(hh:hh+ZZ-1)=min(afr0+ecc_afr(hh:hh+ZZ-1)+sum(delta_afr),18);
afr(hh:hh+ZZ-1)=max(afr(hh:hh+ZZ-1),11);
end

% Simulazione di inc=zz cicli motore: attraverso anticipo e AFR
% vengono selezionati MFB50 medio, Tscarico e i
% parametri che descrivono la distribuzione weibull del MAPO.
% Si calcola un valore della funzione di merito.
% La deviazione standard di MFB50 dipende solo da AFR e viene calcolata
% con la function []=regressione()
for tt=1:inc
    X=fix(((afr(hh+tt-1)-11)*100)+1);
    [Y,I] = min(abs([0:0.1:30]-ad(hh+tt-1)));
    y(hh+tt-1)=regressione(afr(hh+tt-1));
    MFB50=mappa_mfb50(I,X);
    r(hh+tt-1) = MFB50 + y(hh+tt-1)*randn;
    imepnorm(hh+tt-1)=polyval(p,r(hh+tt-1));
    scala(hh+tt-1)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(hh+tt-1));
    imep(hh+tt-1)=imepnorm(hh+tt-1)*scala(hh+tt-1)+0.055*randn;
    scale(hh+tt-1)=par_scala(I,X)+0.3;
    shape(hh+tt-1)=par_forma(I,X)+0.5;
    mapo(hh+tt-1)=random('wbl',scale(hh+tt-1),shape(hh+tt-1));
    afr_min=min(afr(hh+tt-inc:hh+tt-1));
    afr_max=max(afr(hh+tt-inc:hh+tt-1));
end

```

```

        mapoxx(hh+tt-1)=interp1([1:inc]/inc*100,sort(mapo(hh+tt-
inc:hh+tt-1)),97);
        indmin=fix((afr_min-11)*100+1);
        indmax=fix((afr_max-11)*100+1);

%         if mapoxx(hh+tt-1)>0.9
%             advlim(indmin:indmax)=min(ad);
%         else advlim(indmin:indmax)=min(advlim);
%         end
        T(hh+tt-1)=mappaT_scarico(I,X)-min(min(mappaT_scarico));
        merit(hh+tt-1)=imep(hh+tt-1)*(1-1/(1+exp(0.05*(200-T(hh+tt-
1)))));
        a(hh+tt-1)=1-1/(1+exp(0.05*(200-T(hh+tt-1))));
    end
end

```

## b) Controllore 1.1 dati 1200 FIRE

```
clear all
close all
tic
load mappamfb50
load mappaPar_forma
load mappaPar_scala
load mappaTscarico
load sa_afr
load 2400220146
load deviazione_pmi
% Valori pmi massima per AFR variabile
A=[5.08271989966556,5.11676086956522,5.09806187290970,5.08158946488294,5
.02039632107023,4.93926588628762,4.75293311036789];
B=[13.2 13.4 13.7 14 14.3 14.6 14.9];
Tlim=max(max(mappaT_scarico))-min(min(mappaT_scarico));
% Approssima le nuvole di punti sul piano mfb-pmi con una cubica
% e la divide per il massimo valore della cubica per ottenere una pmi
% normalizzata
p=polyfit(mfb1,pmi1/5.0143,3);

% Valori iniziali di anticipo e composizione miscela
afr0=15
adv0=8

% Inizializza le varie grandezze con vettori di zeri
y=zeros(1,18000);
r=zeros(1,18000);
imepnorm=zeros(1,18000);
scala=zeros(1,18000);
imep=zeros(1,18000);
scale=zeros(1,18000);
shape=zeros(1,18000);
mapo=zeros(1,18000);
mapoxx=zeros(1,18000);
T=zeros(1,18000);
merit=zeros(1,18000);
amp1=zeros(1,18000);
fase_merit=zeros(1,18000);
faseecc_sa=zeros(1,18000);
delta_sa=zeros(1,18000);
amp2=zeros(1,18000);
faseecc_afr=zeros(1,18000);
delta_afr=zeros(1,18000);
a=zeros(1,18000);
amp2=0;

% Definisce le frequenze dei disturbi come inverso di numero di cicli
% motore
freq_sa=1/20;
freq_afr=1/100;

% Definisce l'ampiezza delle finestre di osservazione della funzione di
% merito per la correzione di AFR e anticipo
ZZ=300;
zz=60;

% Definisce le costanti di guadagno del controllo sull'anticipo e del
% controllo su AFR
```

```

kadv=1.5;
kafr=0.2;

% Definisce due vettori di 18000 elementi, il primo con i valori di
% anticipo, il secondo con i valori di AFR
ad=zeros(18000,1)+adv0;
afr=zeros(18000,1)+afr0;

% definisce l'ampiezza del disturbo sull'anticipo e su AFR
amp_sa=2;
amp_afr=0.2;

% Definisce i disturbi sinusoidali dell'anticipo come somma di una
% componente media ed una sinusoidale
ecc_sa(1:18000)=amp_sa*sin(2*pi*freq_sa*rem([1:18000],1/freq_sa));
ecc_afr(1:18000)=amp_afr*sin(2*pi*freq_afr*rem([1:18000],1/freq_afr));
afr(1:ZZ)=ecc_afr(1:ZZ)+afr(1:ZZ);
advlim=zeros(1,701)+30;

% Simulazione dei primi ZZ cicli motore: attraverso anticipo (costante)
% e
% AFR vengono selezionati MFB50 medio, Tscarico e i parametri che
% descrivono la distribuzione weibull del MAPO.
% Si calcola un valore della funzione di merito.
% La deviazione standard di MFB50 dipende solo da AFR e viene calcolata
% con la function []=regressione()
for gg=1:1:ZZ
    X=fix(((afr(gg)-11)*100)+1);
    [Y,I] = min(abs([0:0.1:30]-ad(gg)));
    y(gg)=regressione(afr(gg));
    MFB50=mappa_mfb50(I,X);
    r(gg) = MFB50 + y(gg)*randn;
    imepnorm(gg)=polyval(p,r(gg));
    scala(gg)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(gg));
    imep(gg)=imepnorm(gg)*scala(gg)+0.055*randn;
    scale(gg)=par_scala(I,X)+0.3;
    shape(gg)=par_forma(I,X)+0.5;
    mapo(gg)=random('wbl',scale(gg),shape(gg));
    T(gg)=mappaT_scarico(I,X)-min(min(mappaT_scarico));
    merit(gg)=imep(gg)*(1-1/(1+exp(0.05*(200-T(gg)))));
    a(gg)=1-1/(1+exp(0.05*(200-T(gg))));
end

% Esegue la FFT di MFB50 (r) e di AFR degli ultimi ZZ campioni alla
% frequenza del disturbo su AFR, si ricavano ampiezza e fase
% dell'armonica.
% Se l'ampiezza dell'armonica in MFB50 è maggiore di 0.7, cioè c'è forte
% correlazione tra MFB50 e AFR, kafr viene molto amplificato.
fft_r=fft(r(1:gg)/ZZ);
amp_r=abs(fft_r(ZZ*freq_afr+1));
fase_r=angle(fft_r(ZZ*freq_afr+1));
fft_ecc_afr=fft(ecc_afr(1:gg)/ZZ);
amp_ecc_afr=abs(fft_ecc_afr(ZZ*freq_afr+1));
faseecc_afr=angle(fft_ecc_afr(ZZ*freq_afr+1));
if amp_r>0.7
    k_afr=kafr*abs(amp_ecc_afr/amp_r)*150;
else
k_afr=kafr*abs(amp_ecc_afr/amp_r)*20;
end

```

```

% Delta AFR per il primo passo di calcolo viene è proporzionale a kafr
% precedentemente definito e "-" il segno del rapporto tra le fasi.
% AFR viene mantenuto costante per i successivi zz cicli
delta_afr(gg)=-k_afr*sign(fase_r/faseecc_afr);
afr(gg+1:gg+zz)=min(afr0+delta_afr(gg),18);
afr(gg+1:gg+zz)=max(afr0+delta_afr(gg),11);

% Simulazione di zz cicli motore: attraverso anticipo (oscillante) e AFR
% vengono selezionati MFB50 medio, Tscarico e i
% parametri che descrivono la distribuzione weibull del MAPO.
% Si calcola un valore della funzione di merito.
% La deviazione standard di MFB50 dipende solo da AFR e viene calcolata
% con la function []=regressione()
for jj=gg+1:1:gg+zz
    X=fix(((afr(jj)-11)*100)+1);
    [Y,I] = min(abs([0:0.1:30]-ad(jj)));
    y(jj)=regressione(afr(jj));
    MFB50=mappa_mfb50(I,X);
    r(jj) = MFB50 + y(jj)*randn;
    imepnorm(jj)=polyval(p,r(jj));
    scala(jj)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(jj));
    imep(jj)=imepnorm(jj)*scala(jj)+0.055*randn;
    scale(jj)=par_scala(I,X)+0.3;
    shape(jj)=par_forma(I,X)+0.5;
    mapo(jj)=random('wbl',scale(jj),shape(jj));
    T(jj)=mappaT_scarico(I,X)-min(min(mappaT_scarico));
    merit(jj)=imep(jj)*(1-1/(1+exp(0.05*(200-T(jj)))));
    a(jj)=1-1/(1+exp(0.05*(200-T(jj)))));
end

% Calcola la media di MFB50 (r) degli ultimi zz cicli e comanda un delta
% anticipo proporzionale a al valore assoluto della differenza tra la
media
% e un MFB50 "ottimo" di 8° e il segno della differenza. Il delta
anticipo
% viene limitato al massimo a +/- 7°
medio=mean(r(ZZ+1:jj));
delta_sa(jj+2*zz)=min(abs((medio-8))*sign(medio-8),7);
ad(jj+1:jj+zz)=min(adv0+ecc_sa(jj+1:jj+zz)+sum(delta_sa),advlim(X));
ad(jj+1:jj+zz)=max(ad(jj+1:jj+zz),0);
afr(jj+1:jj+ZZ)=afr0+delta_afr(gg)+ecc_afr(jj+1:jj+ZZ)';

inc=zz;
% Controllo su anticipo e AFR come illustrato nel codice
% controllore_SA_AFR_step10_BUONO
for hh=jj+1:inc:18000
    fft_merit=fft(merit(hh-zz:hh-1)/zz); %FFT degli ultimi zz campioni
    ampl(hh)=abs(fft_merit(zz*freq_sa+1)); %ampiezza armonica merit a
frequenza di ecc_sa
    fase_merit(hh)=angle(fft_merit(zz*freq_sa+1)); %fase armonica imep a
frequenza di ecc_sa
    fft_ecc_sa=fft(ad(hh-zz:hh-1));
    faseecc_sa(hh)=angle(fft_ecc_sa(zz*freq_sa+1));
    if sign(fase_merit(hh)/faseecc_sa(hh))<0
        k_adv=kadv*2;
    else if ampl(hh)>0.025
        k_adv=kadv*1;
    else k_adv=0.5*kadv;
    end
end
end

```

```

    delta_sa(hh)=k_adv*min(amp1(hh)/mean(merit(hh-zz:hh-
1)),0.01)*sign(fase_merit(hh)/faseecc_sa(hh))*zz;
    ad(hh:hh+inc-1)=min(adv0+ecc_sa(hh:hh+inc-
1)+sum(delta_sa),advlim(X));
    ad(hh:hh+inc-1)=max(ad(hh:hh+inc-1),0);
    if rem(hh-1,ZZ)==0
        fft_merit=fft(merit(hh-ZZ:hh-1)/ZZ);
        amp2(hh)=abs(fft_merit(ZZ*freq_afr+1));
        fase_merit(hh)=angle(fft_merit(ZZ*freq_afr+1));%fase imep
armonica a frequenza di ecc_afr
        fft_ecc_afr=fft(ecc_afr(hh-ZZ:hh-1));
        faseecc_afr(hh)=angle(fft_ecc_afr(ZZ*freq_afr+1));
        if amp2(hh)>0.01
            k_afr=2*kafr;
        else k_afr=0.1*kafr;
        end
        delta_afr(hh)=k_afr*min(amp2(hh)/mean(merit(hh-ZZ:hh-
1)),0.005)*sign(fase_merit(hh)/faseecc_afr(hh))*ZZ;
        afr(hh:hh+ZZ-1)=min(afr0+ecc_afr(hh:hh+ZZ-1)+sum(delta_afr),18);
        afr(hh:hh+ZZ-1)=max(afr(hh:hh+ZZ-1),11);
    end
    for tt=1:inc
        X=fix(((afr(hh+tt-1)-11)*100)+1);
        [Y,I] = min(abs([0:0.1:30]-ad(hh+tt-1)));
        y(hh+tt-1)=regressione(afr(hh+tt-1));
        MFB50=mappa_mfb50(I,X);
        r(hh+tt-1) = MFB50 + y(hh+tt-1)*randn;
        imepnorm(hh+tt-1)=polyval(p,r(hh+tt-1));
        scala(hh+tt-1)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(hh+tt-1));
        imep(hh+tt-1)=imepnorm(hh+tt-1)*scala(hh+tt-1)+0.055*randn;
        scale(hh+tt-1)=par_scala(I,X)+0.3;
        shape(hh+tt-1)=par_forma(I,X)+0.5;
        mapo(hh+tt-1)=random('wbl',scale(hh+tt-1),shape(hh+tt-1));
        afr_min=min(afr(hh+tt-inc:hh+tt-1));
        afr_max=max(afr(hh+tt-inc:hh+tt-1));
        mapoxx(hh+tt-1)=interp1([1:inc]/inc*100,sort(mapo(hh+tt-
inc:hh+tt-1)),97);
        indmin=fix((afr_min-11)*100+1);
        indmax=fix((afr_max-11)*100+1);

        if mapoxx(hh+tt-1)>0.9
            advlim(indmin:indmax)=min(ad);
        else advlim(indmin:indmax)=min(advlim);
        end
        T(hh+tt-1)=mappaT_scarico(I,X)-min(min(mappaT_scarico));
        merit(hh+tt-1)=imep(hh+tt-1)*(1-1/(1+exp(0.05*(200-T(hh+tt-
1)))));%*(1-1/(1+exp(-2-7*(mapoxx(hh+tt-1)-1.2)*2)))
        a(hh+tt-1)=1-1/(1+exp(0.05*(200-T(hh+tt-1))));
    end

end
end

```

### c) Controllore 1.0 dati GSXR

```
clc
clear all
close all
load mappa_dev_std
load mappa_mfb_pmi
load mappa_parametri_wbl
load mappa_T_exh

% valori pmi massima per AFR variabile
A=PMI(8,:);
B=AFR;
% approssima le nuvole di punti sul piano mfb-pmi con una cubica e
ladivide
% per il massimo valore della cubica per ottenere una pmi normalizzata
p=polyfit(MFB50(:,3),PMI(:,3)/7.2102,3);

% Valori iniziali di anticipo e composizione miscela
afr0=13.4
adv0=68

% Inizializza le varie grandezze con vettori di zeri
y=zeros(1,18000);
r=zeros(1,18000);
imepnorm=zeros(1,18000);
scala=zeros(1,18000);
imep=zeros(1,18000);
scale=zeros(1,18000);
shape=zeros(1,18000);
mapo=zeros(1,18000);
mapoxx=zeros(1,18000);
T=zeros(1,18000);
merit=zeros(1,18000);
amp1=zeros(1,18000);
fase_merit_sa=zeros(1,18000);
fase_merit_afr=zeros(1,18000);
faseecc_sa=zeros(1,18000);
delta_sa=zeros(1,18000);
amp2=zeros(1,18000);
faseecc_afr=zeros(1,18000);
delta_afr=zeros(1,18000);
a=zeros(1,18000);

% Definisce le frequenze dei disturbi come inverso di numero di cicli
% motore
freq_sa=1/20;
freq_afr=1/100;

% Definisce l'ampiezza delle finestre di osservazione della funzione di
% merito per la correzione di AFR e anticipo
ZZ=300;
zz=60;

% Definisce le costanti di guadagno del controllo sull'anticipo e del
% controllo su AFR
kadv=2.125;
kafr=0.3;
```

```

% Definisce due vettori di 18000 elementi, il primo con i valori di
% anticipo, il secondo con i valori di AFR
ad=zeros(18000,1)+adv0;
afr=zeros(18000,1)+afr0;

% definisce l'ampiezza del disturbo sull'anticipo e su AFR
amp_sa=2;
amp_afr=0.2;

% Definisce i disturbi sinusoidali dell'anticipo e di AFR come somma di
una
% componente media ed una sinusoidale
ecc_sa(1:18000)=amp_sa*sin(2*pi*freq_sa*rem([1:18000],1/freq_sa));
ad(1:zz)=ecc_sa(1:zz)'+ad(1:zz);
ecc_afr(1:18000)=amp_afr*sin(2*pi*freq_afr*rem([1:18000],1/freq_afr));
afr(1:ZZ)=ecc_afr(1:ZZ)'+afr(1:ZZ);
advlim=75;

% Simulazione dei primi zz cicli motore: attraverso anticipo e AFR
% vengono selezionati MFB50 medio e sua deviazione, Tscarico e i
% parametri che descrivono la distribuzione weibull del MAPO.
% Si calcola un valore della funzione di merito.
for gg=1:1:zz
    X=fix(((afr(gg)-11)*100)+1);
    [Y,I] = min(abs([40:0.1:75]-ad(gg)));
    mfb50=mfb(I,X);
    r(gg) = mfb50 + dev_mfb50(I,X)*randn;
    imepnorm(gg)=polyval(p,r(gg));
    scala(gg)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(gg));
    imep(gg)=imepnorm(gg)*scala(gg)+0.055*randn;
    scale(gg)=scalaL(I,X);
    shape(gg)=forma(I,X);
    mapo(gg)=random('wbl',scale(gg),shape(gg));
    T(gg)=t_exh(I,X);
    merit(gg)=imep(gg)*(1-1/(1+exp(0.05*(650-T(gg)))));
    a(gg)=1-1/(1+exp(0.05*(650-T(gg))));
end
inc=zz;

% Ciclo for del controllo su anticipo e AFR
% Esegue la FFT di merit e dell'anticipo degli ultimi zz campioni alla
% frequenza del disturbo sull'anticipo, si ricavano ampiezza e fase
% dell'armonica. Se sono contro-fase la costante di guadagno viene
% raddoppiata, se l'ampiezza dell'armonica di merit è maggiore di 0.025
% kadv non viene modificata, altrimenti viene dimezzata
for hh=zz+1:inc:18000
    fft_merit=fft(merit(hh-zz:hh-1)/zz); %FFT degli ultimi zz campioni
    amp1(hh)=abs(fft_merit(zz*freq_sa+1)); %ampiezza armonica merit a
frequenza di ecc_sa
    fase_merit_sa(hh)=angle(fft_merit(zz*freq_sa+1)); %fase armonica
imep a frequenza di ecc_sa
    fft_ecc_sa=fft(ad(hh-zz:hh-1));
    faseecc_sa(hh)=angle(fft_ecc_sa(zz*freq_sa+1));
    if sign(fase_merit_sa(hh)/faseecc_sa(hh))<0
        k_adv=kadv*2;
    else if amp1(hh)>0.025
        k_adv=kadv*1;
    else k_adv=0.5*kadv;
    end
end
end

```

```

% delta anticipo per ogni passo di calcolo viene limitato al massimo a
% zz*0.01*kadv=60*0.01*4.25=2.55°
    delta_sa(hh)=k_adv*min(amp1(hh)/mean(merit(hh-zz:hh-
1)),0.01)*sign(fase_merit_sa(hh)/faseecc_sa(hh))*zz;
    ad(hh:hh+inc-1)=min(adv0+ecc_sa(hh:hh+inc-1)+sum(delta_sa),advlim);
    ad(hh:hh+inc-1)=max(ad(hh:hh+inc-1),40);

% Esegue la FFT di merit e di AFR degli ultimi ZZ campioni alla frequenza
% del disturbo su AFR, si ricavano ampiezza e fase dell'armonica. La
% costante di guadagno viene scalata di un fattore 10 quando l'ampiezza
% dell'armonica è minore di 0.01, in altre parole quando merit non è più
% sensibile ad AFR la correzione deve essere quasi nulla
    if rem(hh-1,ZZ)==0
        fft_merit=fft(merit(hh-ZZ:hh-1)/ZZ);
        amp2(hh)=abs(fft_merit(ZZ*freq_afr+1));
        fase_merit_afr(hh)=angle(fft_merit(ZZ*freq_afr+1));%fase imep
armonica a frequenza di ecc_afr
        fft_ecc_afr=fft(ecc_afr(hh-ZZ:hh-1));
        faseecc_afr(hh)=angle(fft_ecc_afr(ZZ*freq_afr+1));
        if amp2(hh)>0.01
            k_afr=1*kafr;
        else k_afr=0.1*kafr;
        end
% delta AFR per ogni passo di calcolo viene limitato al massimo a
% ZZ*0.005*kafr=300*0.005*0.3=0.45
    delta_afr(hh)=k_afr*min(amp2(hh)/mean(merit(hh-ZZ:hh-
1)),0.005)*sign(fase_merit_afr(hh)/faseecc_afr(hh))*ZZ;
    afr(hh:hh+ZZ-1)=min(afr0+ecc_afr(hh:hh+ZZ-
1)+sum(delta_afr),14.6);
    afr(hh:hh+ZZ-1)=max(afr(hh:hh+ZZ-1),11);
    end

% Simulazione di inc=zz cicli motore: attraverso anticipo e AFR
% vengono selezionati MFB50 medio e sua deviazione, Tscarico e i
% parametri che descrivono la distribuzione weibull del MAPO.
% Si calcola un valore della funzione di merito.
    for tt=1:inc
        X=fix(((afr(hh+tt-1)-11)*100)+1);
        [Y,I] = min(abs([40:0.1:75]-ad(hh+tt-1)));
        mfb50=mfb(I,X);
        r(hh+tt-1) = mfb50 + dev_mfb50(I,X)*randn;
        imepnorm(hh+tt-1)=polyval(p,r(hh+tt-1));
        scala(hh+tt-1)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(hh+tt-1));
        imep(hh+tt-1)=imepnorm(hh+tt-1)*scala(hh+tt-1)+0.055*randn;
        scale(hh+tt-1)=scalaL(I,X);
        shape(hh+tt-1)=forma(I,X);
        mapo(hh+tt-1)=random('wbl',scale(hh+tt-1),shape(hh+tt-1));
%         afr_min=min(afr(hh+tt-inc:hh+tt-1));
%         afr_max=max(afr(hh+tt-inc:hh+tt-1));
        mapoxx(hh+tt-1)=interp1([1:inc]/inc*100,sort(mapo(hh+tt-
inc:hh+tt-1)),97);
%         indmin=fix((afr_min-11)*100+1);
%         indmax=fix((afr_max-11)*100+1);

%         if mapoxx(hh+tt-1)>0.9
%             advlim(indmin:indmax)=min(ad);
%         else advlim(indmin:indmax)=min(advlim);
%         end
        T(hh+tt-1)=t_exh(I,X);
        merit(hh+tt-1)=imep(hh+tt-1)*(1-1/(1+exp(0.05*(650-T(hh+tt-
1)))));

```

```
a(hh+tt-1)=1-1/(1+exp(0.05*(650-T(hh+tt-1))));
```

```
end
```

```
end
```

## d) Controllore 1.1 dati GSXR

```
clc
clear all
close all
load mappa_mfb_pmi
load mappa_dev_std
load mappa_T_exh
load mappa_parametri_wbl

% valori pmi massima per AFR variabile
A=PMI(8,:);
B=AFR;
% Approssima le nuvole di punti sul piano mfb-pmi con una cubica e la
% divide per il massimo valore della cubica per ottenere una pmi
% normalizzata
p=polyfit(MFB50(:,3),PMI(:,3)/7.2102,3);

% Valori iniziali di anticipo e composizione miscela
afr0=12.9
adv0=67

% Inizializza le varie grandezze con vettori di zeri
y=zeros(1,9000);
r=zeros(1,9000);
imepnorm=zeros(1,9000);
scala=zeros(1,9000);
imep=zeros(1,9000);
scale=zeros(1,9000);
shape=zeros(1,9000);
mapo=zeros(1,9000);
mapoxx=zeros(1,9000);
T=zeros(1,9000);
merit=zeros(1,9000);
amp1=zeros(1,9000);
fase_merit_sa=zeros(1,9000);
fase_merit_afr=zeros(1,9000);
faseecc_sa=zeros(1,9000);
delta_sa=zeros(1,9000);
amp2=zeros(1,9000);
faseecc_afr=zeros(1,9000);
delta_afr=zeros(1,9000);
a=zeros(1,9000);

% Definisce le frequenze dei disturbi come inverso di numero di cicli
% motore
freq_sa=1/20;
freq_afr=1/100;

% Definisce l'ampiezza delle finestre di osservazione della funzione di
% merito per la correzione di AFR e anticipo
ZZ=300;
zz=60;

% Definisce le costanti di guadagno del controllo sull'anticipo e del
% controllo su AFR
kadv=2;
kafr=0.2;
```

```

% Definisce due vettori di 18000 elementi, il primo con i valori di
% anticipo, il secondo con i valori di AFR
ad=zeros(9000,1)+adv0;
afr=zeros(9000,1)+afr0;

% definisce l'ampiezza del disturbo sull'anticipo e su AFR
amp_sa=2;
amp_afr=0.2;

% Definisce i disturbi sinusoidali dell'anticipo come somma di una
% componente media ed una sinusoidale
ecc_sa(1:9000)=amp_sa*sin(2*pi*freq_sa*rem([1:9000],1/freq_sa));
ecc_afr(1:9000)=amp_afr*sin(2*pi*freq_afr*rem([1:9000],1/freq_afr));
afr(1:ZZ)=ecc_afr(1:ZZ)'+afr(1:ZZ);
advlim=70;

% Simulazione dei primi ZZ cicli motore: attraverso anticipo e AFR
% vengono selezionati MFB50 medio e sua deviazione, Tscarico e i
% parametri che descrivono la distribuzione weibull del MAPO.
% Si calcola un valore della funzione di merito.
for gg=1:1:ZZ
    mfb50=interp2(AFR,SA,MFB50,afr(gg),ad(gg));
    r(gg) = mfb50 + interp2(AFR,SA,dev_std,afr(gg),ad(gg))*randn;
    imepnorm(gg)=polyval(p,r(gg));
    scala(gg)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(gg));
    imep(gg)=imepnorm(gg)*scala(gg)+0.055*randn;
    scale(gg)=interp2(AFR,SA,Scala,afr(gg),ad(gg));
    shape(gg)=interp2(AFR,SA,Forma,afr(gg),ad(gg));
    mapo(gg)=random('wbl',scale(gg),shape(gg));
    T(gg)=interp2(AFR,SA,T_exh,afr(gg),ad(gg));
    merit(gg)=imep(gg)*(1-1/(1+exp(0.05*(650-T(gg)))));
    a(gg)=1-1/(1+exp(0.05*(650-T(gg))));
end

% Esegue la FFT di MFB50 (r) e di AFR degli ultimi ZZ campioni alla
% frequenza del disturbo su AFR, si ricavano ampiezza e fase
dell'armonica.
% Se l'ampiezza dell'armonica in MFB50 è maggiore di 0.7, cioè c'è forte
% correlazione tra MFB50 e AFR, kafr viene molto amplificato.
fft_r=fft(r(1:gg)/ZZ);
amp_r=abs(fft_r(ZZ*freq_afr+1));
fase_r=angle(fft_r(ZZ*freq_afr+1));
fft_ecc_afr=fft(ecc_afr(1:gg)/ZZ);
amp_ecc_afr=abs(fft_ecc_afr(ZZ*freq_afr+1));
faseecc_afr=angle(fft_ecc_afr(ZZ*freq_afr+1));
if amp_r>0.7
    k_afr=kafr*abs(amp_ecc_afr/amp_r)*100;
else
k_afr=kafr*abs(amp_ecc_afr/amp_r)*20;
end

% Delta AFR per il primo passo di calcolo viene è proporzionale a kafr
% precedentemente definito e "-" il segno del rapporto tra le fasi.
% AFR viene mantenuto costante per i successivi zz cicli
delta_afr(gg)=max(-k_afr*sign(fase_r/faseecc_afr),-1);
afr(gg+1:gg+zz)=min(afr0+delta_afr(gg),14);
afr(gg+1:gg+zz)=max(afr0+delta_afr(gg),11.7);

% Simulazione di zz cicli motore: attraverso anticipo (oscillante) e AFR
% vengono selezionati MFB50 medio e sua deviazione, Tscarico e i

```

```

% parametri che descrivono la distribuzione weibull del MAPO.
% Si calcola un valore della funzione di merito.
for jj=gg+1:1:gg+zz
    mfb50=interp2(AFR,SA,MFB50,afr(jj),ad(jj));
    r(jj) = mfb50 + interp2(AFR,SA,dev_std,afr(jj),ad(jj))*randn;
    imepnorm(jj)=polyval(p,r(jj));
    scala(jj)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(jj));
    imep(jj)=imepnorm(jj)*scala(jj)+0.055*randn;
    scale(jj)=interp2(AFR,SA,Scala,afr(jj),ad(jj));
    shape(jj)=interp2(AFR,SA,Forma,afr(jj),ad(jj));
    mapo(jj)=random('wbl',scale(jj),shape(jj));
    T(jj)=interp2(AFR,SA,T_exh,afr(jj),ad(jj));
    merit(jj)=imep(jj)*(1-1/(1+exp(0.05*(650-T(jj)))));
    a(jj)=1-1/(1+exp(0.05*(650-T(jj))));
end

% Calcola la media di MFB50 (r) degli ultimi zz cicli e comanda un delta
% anticipo proporzionale a al valore assoluto della differenza tra la
media
% e un MFB50 "ottimo" di 8° e il segno della differenza. Il delta
anticipo
% viene limitato al massimo a +/- 7°
medio=mean(r(ZZ+1:jj));
delta_sa(jj+2*zz)=min(abs((medio-8))*sign(medio-8),7);
ad(jj+1:jj+zz)=min(adv0+ecc_sa(jj+1:jj+zz)+sum(delta_sa),adlim);
ad(jj+1:jj+zz)=max(ad(jj+1:jj+zz),44);
afr(jj+1:jj+ZZ)=max(afr0+delta_afr(gg)+ecc_afr(jj+1:jj+ZZ)',11.7);

inc=zz;

% Controllo su anticipo e AFR come illustrato nel codice
% controllore_SA_AFR
for hh=jj+1:inc:9000
    fft_merit=fft(merit(hh-zz:hh-1)/zz);
    amp1(hh)=abs(fft_merit(zz*freq_sa+1));
    fase_merit_sa(hh)=angle(fft_merit(zz*freq_sa+1));
    fft_ecc_sa=fft(ad(hh-zz:hh-1));
    faseecc_sa(hh)=angle(fft_ecc_sa(zz*freq_sa+1));
    if sign(fase_merit_sa(hh)/faseecc_sa(hh))<0
        k_adv=kadv*2;
    else if amp1(hh)>0.025
        k_adv=kadv*1;
    else k_adv=0.5*kadv;
    end
    end
    delta_sa(hh)=k_adv*min(amp1(hh)/mean(merit(hh-zz:hh-
1)),0.01)*sign(fase_merit_sa(hh)/faseecc_sa(hh))*zz;
    ad(hh:hh+inc-1)=min(adv0+ecc_sa(hh:hh+inc-1)+sum(delta_sa),adlim);
    ad(hh:hh+inc-1)=max(ad(hh:hh+inc-1),44);
    if rem(hh-1,ZZ)==0
        fft_merit=fft(merit(hh-ZZ:hh-1)/ZZ);
        amp2(hh)=abs(fft_merit(ZZ*freq_afr+1));
        fase_merit_afr(hh)=angle(fft_merit(ZZ*freq_afr+1));
        fft_ecc_afr=fft(ecc_afr(hh-ZZ:hh-1));
        faseecc_afr(hh)=angle(fft_ecc_afr(ZZ*freq_afr+1));
        if amp2(hh)>0.01
            k_afr=1*kafr;
        else k_afr=0.1*kafr;
        end
        delta_afr(hh)=k_afr*min(amp2(hh)/mean(merit(hh-ZZ:hh-
1)),0.005)*sign(fase_merit_afr(hh)/faseecc_afr(hh))*ZZ;

```

```

afr(hh:hh+ZZ-1)=min(afr0+ecc_afr(hh:hh+ZZ-1)+sum(delta_afr),14);
afr(hh:hh+ZZ-1)=max(afr(hh:hh+ZZ-1),11.7);
end
for tt=1:inc
mfb50=interp2(AFR,SA,MFB50,afr(hh+tt-1),ad(hh+tt-1));
r(hh+tt-1) = mfb50 + interp2(AFR,SA,dev_std,afr(hh+tt-
1),ad(hh+tt-1))*randn;
imepnorm(hh+tt-1)=polyval(p,r(hh+tt-1));
scala(hh+tt-1)=polyval(polyfit(B,A,2),afr(hh+tt-1));
imep(hh+tt-1)=imepnorm(hh+tt-1)*scala(hh+tt-1)+0.055*randn;
scale(hh+tt-1)=interp2(AFR,SA,Scala,afr(hh+tt-1),ad(hh+tt-1));
shape(hh+tt-1)=interp2(AFR,SA,Forma,afr(hh+tt-1),ad(hh+tt-1));
mapo(hh+tt-1)=random('wbl',scale(hh+tt-1),shape(hh+tt-1));
%   afr_min=min(afr(hh+tt-inc:hh+tt-1));
%   afr_max=max(afr(hh+tt-inc:hh+tt-1));
mapoxx(hh+tt-1)=interp1([1:inc]/inc*100,sort(mapo(hh+tt-
inc:hh+tt-1)),97);
%   indmin=fix((afr_min-11)*100+1);
%   indmax=fix((afr_max-11)*100+1);

%   if mapoxx(hh+tt-1)>0.9
%       advlim(indmin:indmax)=min(ad);
%   else advlim(indmin:indmax)=min(advlim);
%   end
T(hh+tt-1)=interp2(AFR,SA,T_exh,afr(hh+tt-1),ad(hh+tt-1));
merit(hh+tt-1)=imep(hh+tt-1)*(1-1/(1+exp(0.05*(650-T(hh+tt-
1)))));
a(hh+tt-1)=1-1/(1+exp(0.05*(650-T(hh+tt-1))));

end

end

```

# Bibliografia

1. Ferrari Giancarlo (1996), Motori a combustione Interna, edizioni il capitello, Torino
2. Corti Enrico, Forte Claudio (2011), Real-Time Combustion Phase Optimization of a PFI Gasoline Engine, SAE International
3. Corti Enrico, dispense lezione del corso di "Controllo dei motori a combustione interna LM", Università degli Studi di Bologna
4. Lee Donghoon (2011), Closed-Loop Combustion Control of Advanced Internal Combustion Engines, University of Michigan
5. Gelbert Gregor, P. Moeck Jonas, O. Paschereit Christian, King Rudibert (2010), Advanced algorithms for gradient estimation in one- and two-parameter extremum seeking controllers, Journal of Process Control
6. Foster Tim (2008), Calibration Scenario Editor Enables Higher Calibration Efficiencies, SAE Technical Paper Series
7. Pirello Giuseppe (2004), Analisi della pressione all'interno del cilindro per la regolazione in retroazione dell'anticipo di accensione, Università degli Studi di Palermo
8. Rinaldi Matteo (2010), Sviluppo di algoritmi di RCP per la stima della coppia indicata erogata da un motore a combustione interna, Università degli Studi di Bologna
9. I sensori di pressione, Università degli Studi di Firenze- Dipartimento di Energetica "S. Stecco"
10. GSX-R600 Service Manual, Suzuki
11. Manuali Kistler
12. Manuali National Instrument
13. Frasca Sergio, Analisi dei segnali, Università di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Fisica