

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA**

DIEM - Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari,  
Aeronautiche e di Metallurgia

*Protocolli di Gestione dei Motori a Combustione Interna L-S*

**SVILUPPO E VALIDAZIONE SPERIMENTALE  
DI STRATEGIE DI PREVISIONE E CONTROLLO  
DEL FENOMENO DELLA PREACCENSIONE  
(MEGA-KNOCK)**

*Tesi di Laurea di:*  
CRISTIAN NIGRO

*Relatore:*  
Chiar.mo Prof. Ing. NICOLÒ CAVINA

*Correlatori:*  
Ing. STEFANO SGATTI  
Ing. NICOLA GARAGNANI  
Ing. ENRICO CORTI  
Chiar.mo Prof. Ing. DAVIDE MORO  
Chiar.mo Prof. Ing. FABRIZIO PONTI

Sessione III

---

Anno Accademico 2010-2011



*Prediction is very difficult, especially about the future.*  
*Niels Bohr*



## **5 PAROLE CHIAVE**

MEGA-KNOCK

PREACCENSIONE

RAPPORTO DI MISCELA

PREVISIONE

CONTROLLO



---

# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Presentazione – Tema della dissertazione di laurea . . . . .</b>    | <b>11</b> |
| <br>   |           |
| <b>Capitolo 1 – Il motore ad accensione comandata . . . . .</b>        | <b>13</b> |
| 1.1 – Sistemi di iniezione   | 13        |
| 1.2 – La fasatura di distribuzione e di accensione                     | 21        |
| 1.3 – La combustione   | 26        |
| 1.3.1 – Combustione anomala: detonazione e<br>preaccensione            | 28        |
| 1.3.1.1 – La detonazione   | 28        |
| 1.3.1.2 – La preaccensione   | 32        |
| 1.4 – La centralina elettronica  | 36        |
| <br>   |           |
| <b>Capitolo 2 – Relazione empirica di Douaud &amp; Eyzat . . . . .</b> | <b>39</b> |
| 2.1 – Coefficienti della relazione empirica                            | 40        |
| 2.2 – Parametri di input: ON, p, T                                     | 41        |
| <br>   |           |
| <b>Capitolo 3 – Elaborazione del modello di previsione . . . . .</b>   | <b>47</b> |
| 3.1 – Calcolo del lambda base  | 52        |
| 3.1.1 – Lambda da mappatura  | 53        |
| 3.1.2 – Lambda magro   | 56        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 3.2 – Previsione della preaccensione (Mega-Knock)                  | 56         |
| 3.2.1 – Anticipo minimo attuato                                    | 58         |
| 3.2.2 – Devettorizzazione della temperatura                        | 60         |
| 3.2.3 – Convertitore CAD – ms                                      | 61         |
| 3.2.4 – Calcolo del tempo di autoaccensione                        | 62         |
| 3.2.4.1 – Tabella di correzione temperatura                        | 66         |
| 3.2.4.2 – Filtro inerzia temperatura                               | 70         |
| 3.2.4.3 – Correzione per dipendenza NO                             | 73         |
| 3.2.5 – Confronto grandezze e strategia contatore                  | 76         |
| 3.2.5.1 – Strategia contatore “zona critica”                       | 80         |
| 3.2.5.2 – Strategia contatore “zona non critica”                   | 82         |
| 3.2.6 – Contatore e Flag di Mega-Knock                             | 87         |
| <br>   |            |
| <b>Capitolo 4 – Calibrazione del modello e simulazioni . . . .</b> | <b>91</b>  |
| 4.1 – Caratterizzazione tempo di autoaccensione                    | 92         |
| 4.2 – Validazione del contatore Mega-Knock                         | 93         |
| 4.3 – Calibrazione coefficienti della relazione empirica           | 98         |
| 4.4 – Validazione algoritmo  | 106        |
| <br>   |            |
| <b>Capitolo 5 – Conclusioni e sviluppi futuri . . . . .</b>        | <b>139</b> |
| <br>   |            |
| <b>Bibliografia . . . . .</b>                                      | <b>141</b> |

## **Definizioni, Acronimi, Abbreviazioni**

ATDC – After Top Dead Centre

BTC – Bottom dead Centre

BTDC – Before Top Dead Centre

CAD – Crank Angle Degree

CO – Carbon Monoxide

CR – Compression Ratio

EGR – Exhaust Gas Recirculation

EVC – Exhaust Valve Closure

EVO – Exhaust Valve Open

GDI – Gasoline Direct Injection

HC – HydroCarbons

IVC – Inlet Valve Closure

IVO – Inlet Valve Open

NO<sub>x</sub> – Ossidi di Azoto

ON – Octane Number

PFI – Port Fuel Injection

PMI – Punto Morto Inferiore

PMS – Punto Morto Superiore

RON – Research Octane Number

SI – Spark Igniton

TDC – Top Dead Centre

WOT – Wide Open Throttle



# *Presentazione*

## *Tema della dissertazione di laurea*

La presente tesi, sviluppata presso la **Magneti Marelli S.p.A. Powertrain**, tratterà il problema del monitoraggio e della diagnosi preventiva del fenomeno di *preaccensione* (*Mega-Knock* in lingua anglosassone) nei motori ad accensione comandata (comunemente detti a benzina) di ultima generazione.

L'interesse della ricerca verso questo ambito è suscitato dalla pratica comune di monitorare il fenomeno al fine di assicurare:

- Elevate coppie indicate;
- Motori affidabili;
- Motori efficienti e non inquinanti.

In particolare si tratterà la possibilità di utilizzare una relazione empirica per cercare di arrivare alla previsione dell'insorgere della preaccensione, per poi ricorrere ad opportune strategie motore per evitare il verificarsi del fenomeno.

L'idea è quindi quella di sviluppare un nuovo algoritmo, più "raffinato" di quello attualmente presente in centralina, che risulti più efficiente e flessibile.

L'attività è stata condotta partendo da una ricerca bibliografica sul fenomeno della preaccensione e sulla relazione empirica utilizzata più

comunemente. Le informazioni alle quali si farà riferimento in bibliografia sono state ricavate da articoli tratti da importanti case editrici tecniche internazionali (SAE, ASME, Science Direct, IEEE,...), da libri universitari e da lavori precedentemente compiuti anche presso istituti di ricerca stranieri.

Successivamente si è passati all'implementazione della relazione empirica all'interno del modello attraverso il linguaggio di modellazione Simulink<sup>®</sup> e il linguaggio di programmazione MatLab<sup>®</sup>. A seguire è stata fatta la calibrazione di tutte le grandezze che entrano in gioco nell'algoritmo di previsione e poi ne è stato verificato il corretto funzionamento attraverso simulazione offline, a partire da acquisizioni mirate realizzate al banco prova.

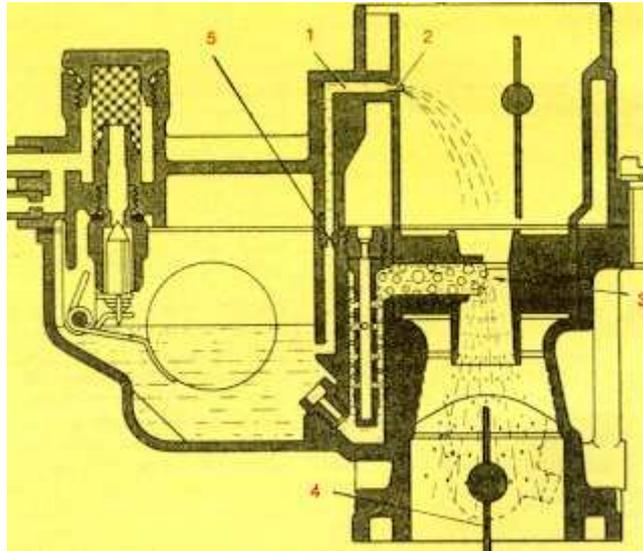
# Capitolo 1

## ***Il motore ad accensione comandata (S.I.)***

Si definisce *motore ad accensione comandata* un motore endotermico alternativo in cui la combustione è innescata fornendo energia dall'esterno attraverso un apposito dispositivo. Spesso è indicato come motore a ciclo Otto, dal nome di chi per primo è riuscito a realizzare tale soluzione, o anche motore ad accensione per scintilla (in inglese *Spark Ignition*, S.I.), per il fatto che l'unico sistema ad oggi adottato per attivare la reazione è la scintilla prodotta da una scarica ad alta tensione, emessa da un dispositivo detto *candela*.

### *1.1 Sistemi d' iniezione*

Fino a qualche anno fa la preparazione della miscela era affidata al *carburettore*, un organo totalmente meccanico. Vista la sua obsolescenza, viene evitata la trattazione di tale dispositivo in questa trattazione ma per dare a chi legge un'idea di quali cambiamenti ha introdotto l'elettronica all'interno del sistema "motore" si fornisce una foto di un sistema con organi di compensazione.



**Figura 1.1 – Carburatore: dispositivi di compensazione. (Fonte Internet)**

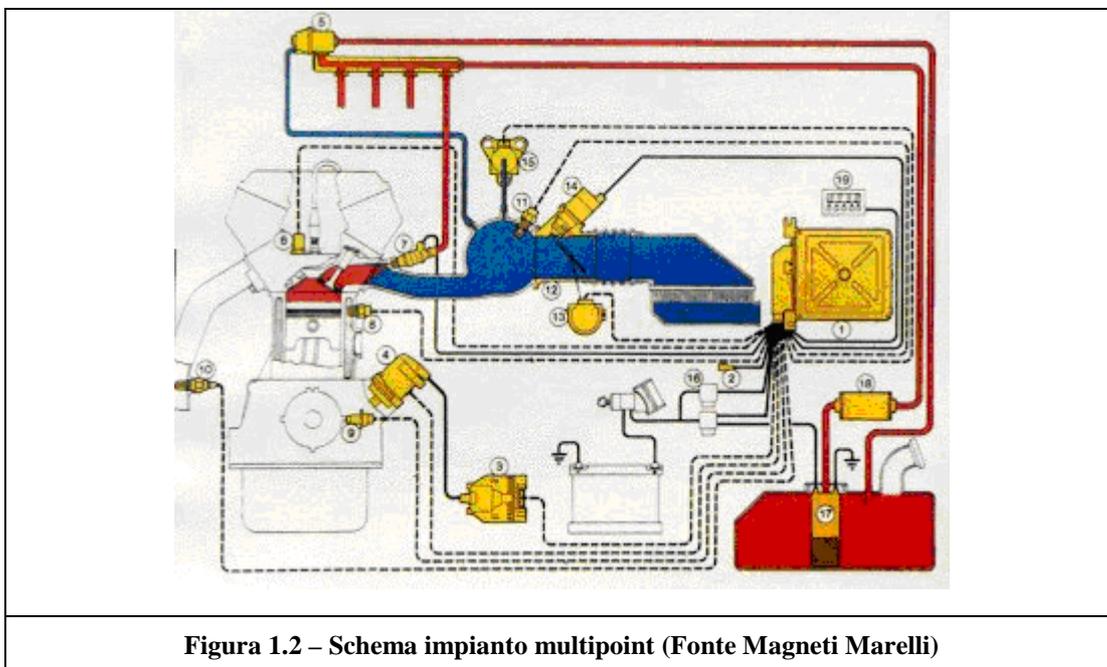
Per ridurre i consumi e far fronte alle più recenti norme antinquinamento, da qualche decennio sono stati sviluppati e adottati sistemi molto più accurati rispetto al carburatore meccanico, quali i moderni apparati ad iniezione elettronica. I vantaggi che questi dispositivi introducono sono:

- Potenze elevate;
- Riduzione del consumo di carburante;
- Risposta rapida alla variazione di carico;
- Riduzione delle emissioni inquinanti;
- Estrema flessibilità e possibilità di integrare vari sistemi accessori, di sicurezza e non (ESP -*Electronic Stability Program*-, *Cruise Control*, etc.)

Ogni variabile del sistema di controllo iniezione è gestita da una centralina elettronica, nella quale confluiscono i segnali delle variabili misurate e dalla quale partono i segnali di uscita verso gli attuatori.

Sempre più spesso la farfalla non è controllata meccanicamente tramite il comando dell'acceleratore, ma tramite un attuatore elettrico comandato anch'esso dalla centralina che riceve in ingresso il segnale di tensione di un potenziometro accoppiato con l'acceleratore.

Con l'uscita di scena del carburatore, ecco quindi che il carburante viene introdotto attraverso il controllo di uno o più iniettori, nei condotti di aspirazione o direttamente in camera, nel caso di motori ad iniezione diretta. Nel seguito si farà riferimento a sistemi di iniezione con iniettori a solenoide montati nel sistema di aspirazione, a controllo elettronico e collegati ad un unico rail. La polverizzazione del carburante è assicurata dalla pressione relativamente elevata con cui esso viene iniettato, per questo tipo d'iniezione denominata *Port Fuel Injection* (PFI) si parla di circa 4 bar.

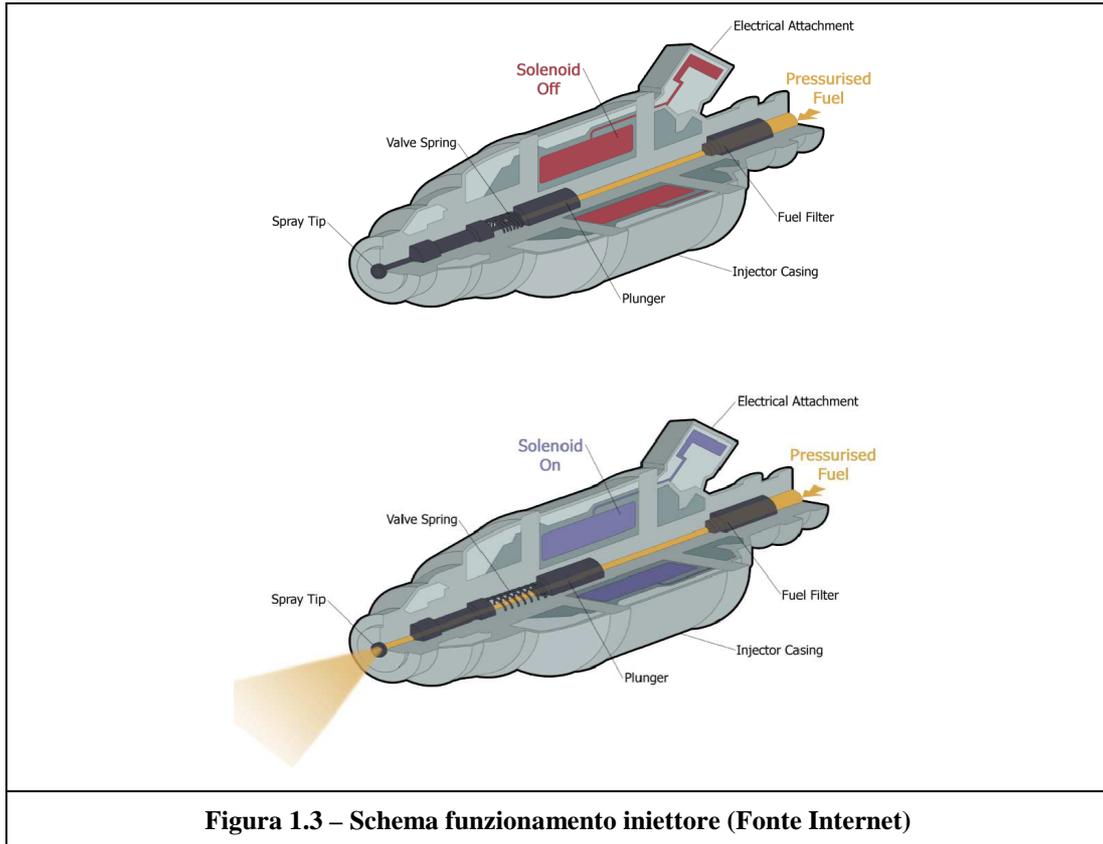


Esiste comunque una varietà di sistemi di iniezione, se ne citano due di particolare importanza:

- *Single-point*, sistema ormai superato dove c'era un unico iniettore nel sistema d'aspirazione, in ingresso al collettore;
- *Multi-point*, dove abbiamo un iniettore per cilindro, collocato nel corrispondente condotto di aspirazione, con conseguente aumento del controllo e precisione del processo di iniezione (Figura 1.2).

Nell'ambito del sistema di iniezione non c'è dubbio che l'iniettore sia l'attuatore per eccellenza, infatti, è proprio grazie al tempo e alla fasatura d'iniezione, cioè il tempo in cui l'ugello rimane aperto, che la centralina modifica la quantità di combustibile introdotta al variare del carico.

Questo risultato è raggiungibile con opportuni sistemi, meccanici od elettronici, che mantengono costante il salto di pressione tra interno ed esterno dell'iniettore. Ma più spesso oggi il sistema funziona a delta-p variabile, per evitare il riflusso di grandi portate di benzina dal rail al serbatoio. Il funzionamento è relativamente semplice: una forza magnetica generata da un impulso elettrico solleva l'equipaggio mobile lasciando aperta una luce dalla quale fuoriesce il combustibile opportunamente nebulizzato (Figura 1.3).



**Figura 1.3 – Schema funzionamento iniettore (Fonte Internet)**

Per rendere accurati i risultati si compiono, in fase di programmazione della centralina, meticolose sperimentazioni per determinare a specifici valori del carico e del regime di rotazione i tempi d’iniezione che permettono il “miglior” funzionamento del motore.

Resta il fatto che, nonostante l’introduzione dell’iniezione elettronica, permanga la farfalla, vera e propria fonte di perdita per il motore S.I., la quale porta i consumi specifici di un motore ad accensione comandata ben lontani da quelli dei Diesel, specialmente ai bassi carichi; ma se da un lato è fonte di perdite, dall’altro conferisce un’estrema guidabilità propria di questo tipo di motore.

I principali dati in ingresso elaborati dalla centralina, oltre a quello della posizione del pedale dell'acceleratore, sono:

- Portata massica dell'aria (esistono vari sistemi per tale misurazione: *speed-density*, *α-speed*, MAF,..)
- Numero di giri del motore;
- Posizione angolare dell'albero motore;
- Temperatura del liquido refrigerante;
- Titolo dell'ossigeno allo scarico.

Quest'ultimo segnale ha un'importanza strategica in un impianto di questo tipo perché permette di controllare in catena chiusa il corretto quantitativo di combustibile da iniettare. Il sensore che permette il controllo del titolo prende il nome di *sonda lambda* (*HEGO* o *UEGO*), dall'omonimo rapporto

$$\lambda = \frac{\frac{m_{aria}}{m_{fuel}}}{\left(\frac{m_{aria}}{m_{fuel}}\right)_{STECIO}} = \frac{A/F}{\left(\frac{A}{F}\right)_S}$$

Questo sensore è costituito da un bulbo cavo che viene inserito nel condotto di scarico: la parte esterna è lambita dai gas di scarico, mentre la parte interna è in comunicazione con l'atmosfera. In condizioni termiche di regime, il bulbo ceramico emette un segnale elettrico poco inferiore al Volt in presenza di una minore concentrazione di ossigeno dei gas di scarico rispetto all'atmosfera, segno di una miscela grassa. La centralina legge tale segnale e smagrisce la miscela riducendo il tempo d'iniezione. La miscela in questo modo diventa magra, il bulbo emette un segnale bassissimo e la centralina aumenta il

tempo d'iniezione. Si compone così un ciclo continuo in cui la miscela passa da grassa a magra e viceversa (Figura 1.4).

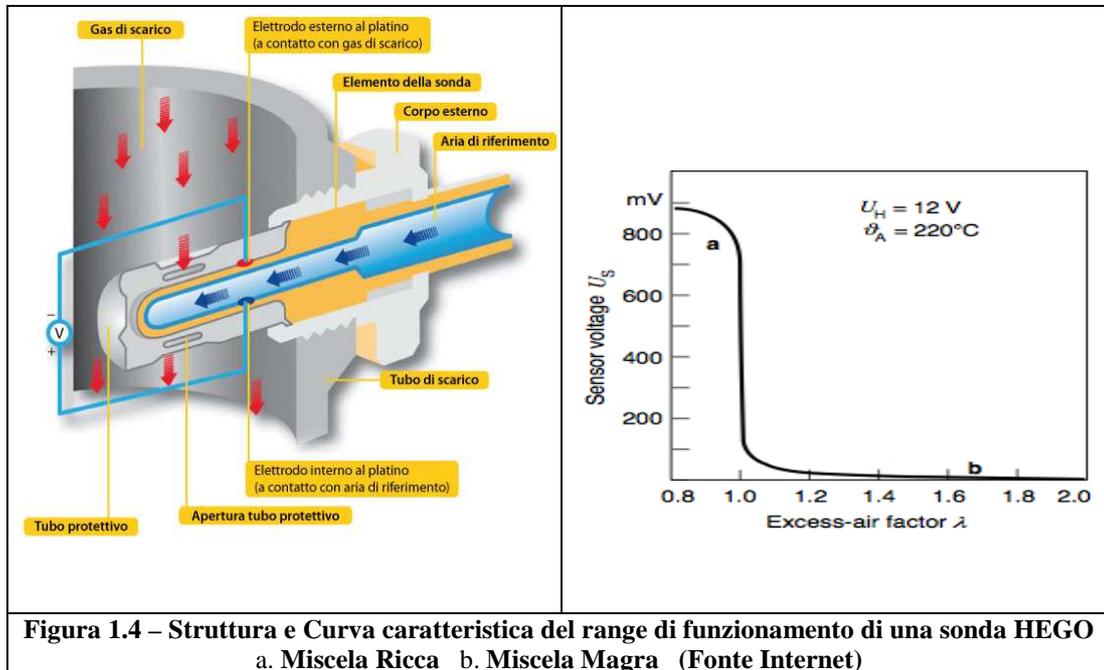
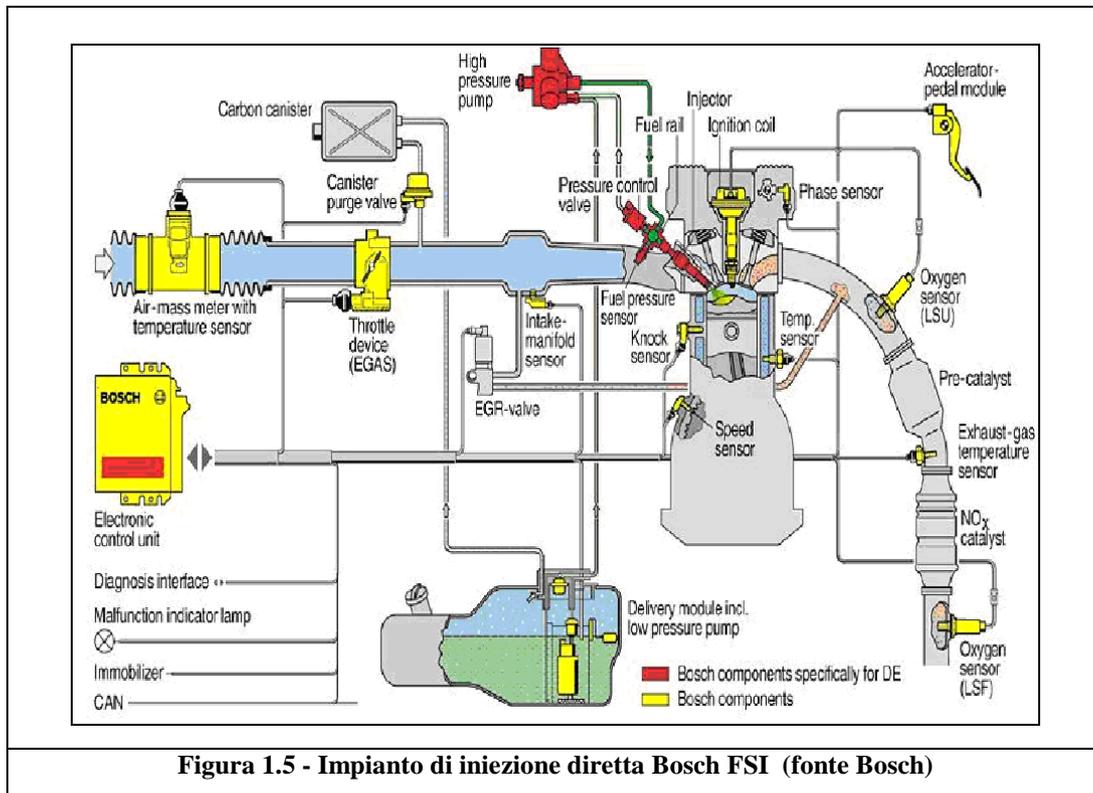


Figura 1.4 – Struttura e Curva caratteristica del range di funzionamento di una sonda HEGO  
 a. Miscela Ricca b. Miscela Magra (Fonte Internet)

Questo sistema porta alla riduzione di emissioni inquinanti in termini di HC (idrocarburi incombusti), CO (monossido di carbonio),  $\text{NO}_x$  (ossidi di azoto), perché, grazie alla variazione del tipo di miscela, si ha un ottimo rendimento globale del catalizzatore trivalente usato nei motori S.I.

Sempre più spesso, a monte del catalizzatore, vengono usate sonde *UEGO* che emettono un segnale in tensione lineare sempre con la concentrazione d'ossigeno presente nei gas di scarico. In questo modo è possibile inseguire più rapidamente variazioni di titolo e controllare sistemi che operano in condizioni non stechiometriche per ogni punto di funzionamento motore (tipo G.D.I.).

Negli ultimi anni ha preso piede, come detto, l'iniezione diretta di combustibile in camera di combustione, il cosiddetto G.D.I. (*Gasoline Direct Injection*).



In questo tipo di alimentazione il processo d'iniezione è diversificato a seconda dei carichi:

- Agli alti carichi la miscela è stechiometrica ed il controllo viene fatto normalmente con la farfalla;
- Ai bassi e medi carichi si realizza una carica stratificata, ovvero una concentrazione diversa di combustibile all'interno della camera. Questo tipo di controllo permette di essere indipendenti dalla valvola a farfalla che rimane aperta con la conseguente riduzione delle perdite di pompaggio. Per questo aspetto tale propulsore sembra somigliare più ad un Diesel che ad un motore

ad accensione comandata, dato il controllo per qualità e non per quantità di combustibile. Ne risulta una miscela più ricca nei pressi della candela e più magra in periferia. Si allontana in questo modo il pericolo della detonazione.

I vantaggi di questa soluzione rispetto a quella descritta prima, denominata *Port Injection*, sono sicuramente una riduzione in termini di consumi, una riduzione delle emissioni inquinanti e una risposta più rapida del sistema. Il problema cruciale, che ha però fino ad ora impedito una massiccia diffusione di questa modalità di combustione (carica stratificata) sta nella riduzione degli  $\text{NO}_x$  prodotti in un ambiente complessivamente magro.

## *1.2 La fasatura di distribuzione e di accensione*

La fasatura (o fase) viene intesa come il punto di ottimale apertura delle varie valvole di un motore 4T e si ottiene con la sincronia dell'albero a camme all'albero motore tramite catena, cinghia o con ingranaggi. La fasatura di distribuzione, può essere di due tipi:

- *Fasatura di distribuzione fissa*, caratterizzata da un albero a camme di tipo semplice che ha un'altezza fissa; inoltre non posticipa o anticipa né l'apertura né la chiusura delle valvole a seconda del regime motore (quindi con questo tipo di fasatura si ha un motore con una distribuzione classica);
- *Fasatura di distribuzione variabile*, nella quale lo schema di distribuzione varia al variare del regime motore; generalmente vengono utilizzati speciali alberi a camme che in determinate

condizioni o modificano la fasatura o il numero di valvole che lavorano, consentendo di ottimizzare le prestazioni e i consumi (riducendo quindi anche le emissioni inquinanti).

- *Fasatura con sistema “quasi camless”*, nella quale il sistema di apertura delle valvole di aspirazione risulta essere di tipo elettroidraulico, consentendo di aprirle e chiuderle indipendentemente dalla posizione delle camme in modo da non vincolare il flusso d’aria alle leggi meccaniche; il sistema di controllo delle valvole lato scarico invece viene gestito ancora tramite albero a camme.
- *Fasatura con sistemi “camless”*, nella quale il sistema di controllo prevede gruppi di attuazione in cui le valvole sono gestite direttamente da due elettromagneti, uno che si occupa della corsa di apertura e uno che si occupa della corsa di chiusura, accompagnati da un corredo di sensori di posizione. In linea di principio il funzionamento è semplicissimo, in realtà, però, richiede un modello matematico estremamente sofisticato che sia in grado di controllare ogni valvola in modo continuo e indipendente in spostamento, velocità e accelerazione, e ciò ne fa crescere la complessità in modo esponenziale, per questo sono ancora in fase di sviluppo.

Il diagramma di distribuzione fornisce la posizione della manovella al compiersi del ciclo ( $\alpha = 0^\circ-720^\circ$ ) e i punti di apertura e chiusura delle valvole, nel caso ideale, coincidono con le posizioni di PMS e PMI.

Poiché l'azionamento delle valvole non è istantaneo il diagramma di distribuzione, in un possibile caso reale (vedi esempio in Figura 1.6), subisce le seguenti modifiche:

- 1) la valvola di aspirazione si apre in anticipo di circa  $10^\circ$  in modo da essere completamente aperta quando il pistone, esaurita la fase di scarico, passa per il PMS; questo per lasciar passare la massima quantità di fluido possibile ed evitare perdite di carico eccessive dovute ad un'eventuale laminazione del fluido;
- 2) la valvola di aspirazione si chiude in ritardo di circa  $40^\circ$  oltre il PMI perché l'inerzia posseduta dalla miscela entrante le permette di entrare nel cilindro anche durante l'inizio della fase di compressione: ciò consente di aumentare la quantità di miscela che entra ad ogni ciclo e comporta contemporaneamente vantaggi fluidodinamici (minori perdite di carico). I vantaggi risiedono in un incremento del coefficiente di riempimento, che si traduce in un aumento di lavoro e, quindi, di potenza. Lo svantaggio è la minore corsa disponibile per la compressione.
- 3) inizia quindi la fase di compressione, fino all'accensione che è anticipata rispetto al PMS (dall'accensione al PMS si riesce a bruciare solo una piccola parte del combustibile). L'anticipo si attua per due motivi:
  - per dar modo al fronte di fiamma di interessare tutta la miscela senza andare a modificare, con la presenza di ritardi di combustione, la fase di espansione;
  - per tener conto del fatto che la reazione di combustione ha bisogno di un certo periodo di incubazione (qualche millisecondo).

- 4) L'anticipo attuato è tale che il picco di pressione massima non lo si raggiunga né troppo prima, né troppo dopo il PMS: se si raggiunge troppo prima il pistone, nel tratto finale della corsa di salita, incontrerà un aumento di pressione che determinerà un aumento del lavoro di compressione; se si raggiunge troppo oltre, si sacrifica una parte del lavoro di espansione (lavoro utili);
- 5) la valvola di scarico si apre in anticipo di circa  $50^\circ \div 60^\circ$  per rendere più vigoroso lo scarico spontaneo, sfruttando il salto di pressione tra la camera di combustione e il condotto di scarico; così facendo si sacrifica una parte del lavoro di espansione, con il maggior vantaggio di ridurre il lavoro di pompaggio, in quanto lo scarico forzato risulta più contenuto;
- 6) la valvola di scarico si chiude in ritardo di circa  $10^\circ$  rispetto al PMS, per sfruttare l'inerzia dei fumi che continuano a defluire nel condotto di scarico, anche quando il pistone inizia la corsa di discesa. Inoltre, si ha un certo intervallo di angolo di manovella in cui entrambe le valvole sono contemporaneamente aperte (fase di incrocio), che risulta benefico per quanto riguarda il riempimento del cilindro: infatti quando alla fine dello scarico forzato si raggiunge la  $P_{\text{atm}}$ , anche se per un attimo, si ha che la pressione scende al di sotto di quella esterna e si un effetto di "risucchiamento". Allora questo fenomeno è sfruttato per ottenere una forma di lavaggio, risucchiando miscela fresca dalla valvola di aspirazione.

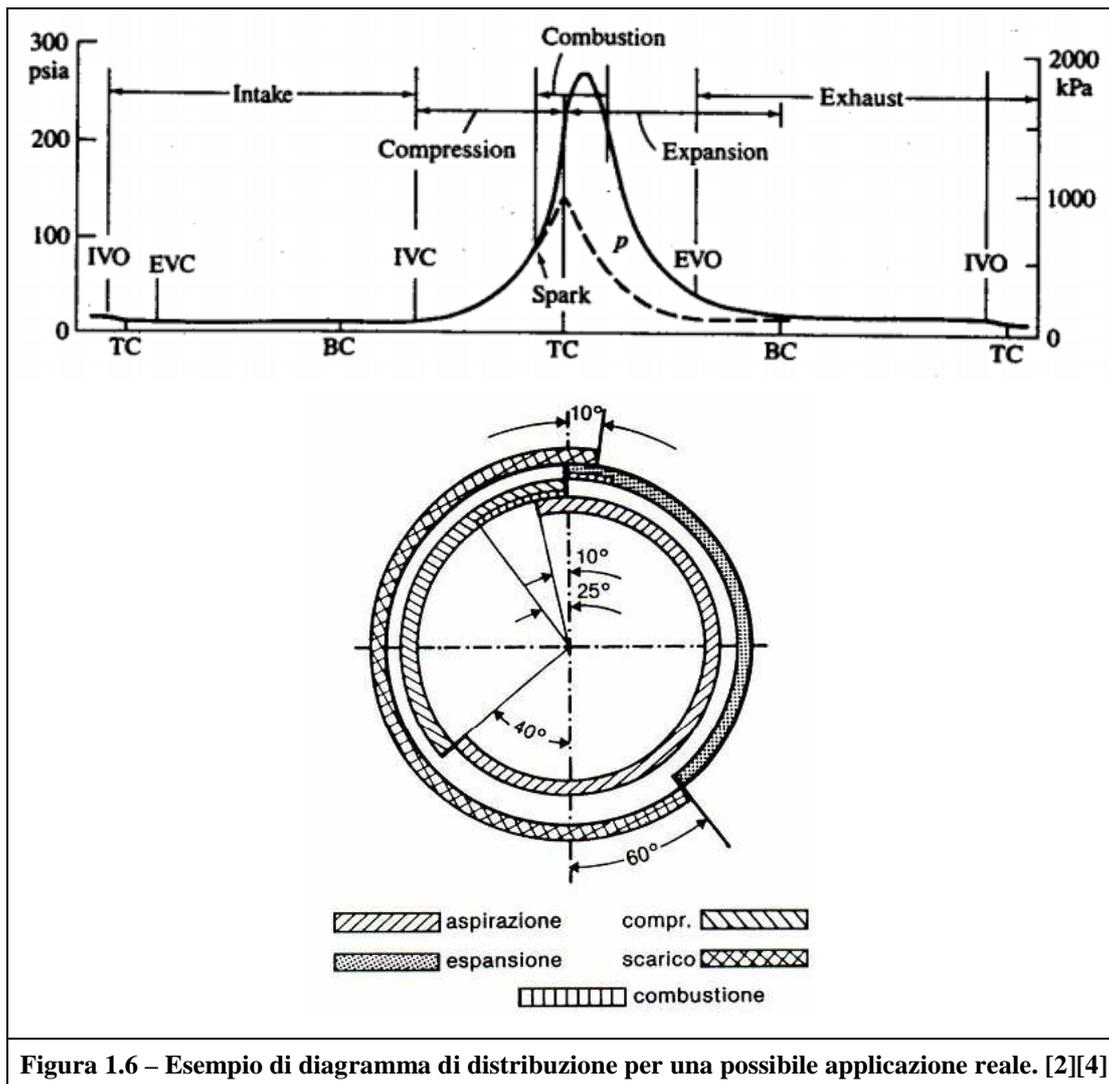


Figura 1.6 – Esempio di diagramma di distribuzione per una possibile applicazione reale. [2][4]

Con la fasatura d'accensione o anticipo d'accensione s'intende quell'angolo d'anticipo o millimetri di spostamento del pistone rispetto al PMS deciso dall'accensione e dove l'impianto d'accensione fa scoccare la scintilla alla candela.

Quest'anticipo per essere ottimale a tutti i regimi, non deve essere fisso, perché la lentezza della combustione non è data solo dal rapporto stechiometrico e polverizzazione del combustibile (più è povera di benzina o meglio polverizzata, più è veloce la combustione) e dalla quantità di miscela aria/benzina, ma anche dalle turbolenze della

miscela, dove la combustione si velocizza con l'aumento della turbolenza, che aumenta all'aumentare del regime motore.

La fasatura può essere di vario tipo:

- *Fasatura di accensione fissa*: in questo caso l'angolo di anticipo è fisso e quindi costante a tutti i regimi; non è il massimo in termini di funzionamento del motore in quanto, essendo fissa la fase d'accensione, si avrà un arco molto stretto di funzionamento ottimale, dato che la combustione o termina troppo presto o termina troppo tardi, per questi motivi si deve cercare di tenere il motore il più possibile a un determinato regime (e carico).
- *Fasatura di accensione variabile*: in questo caso l'angolo di anticipo è variabile e quindi cambia al variare della condizione di funzionamento; questo tipo di fasatura lo si ottiene con l'utilizzo di centraline elettroniche e si fa in modo di avere una combustione ottimale a tutti i regimi (e carichi), dato che al variare del punto motore la combustione deve iniziare più o meno in anticipo per poter generare la massima coppia.

### 1.3 La combustione

La combustione viene innescata mediante un piccolo arco elettrico, fatto scoccare fra gli elettrodi di una candela che genera una reazione locale. Attorno alla scintilla si forma il *nucleo della combustione*, a partire dal quale la reazione avanza interessando tutta la carica secondo l'avanzamento del fronte di fiamma. Tale superficie delimita la regione della camera di combustione in cui la reazione è già

avvenuta da quella che deve ancora reagire. È facilmente intuibile che le condizioni termodinamiche della parte ancora non interessata dalla combustione vadano cambiando con l'avanzare del fronte di fiamma, manifestando quindi un aumento di pressione e temperatura.

Il fronte di fiamma avanza con una velocità che varia con il numero di giri del motore, ed in particolare aumenta con l'aumentare dei giri ma con legge non lineare. Tale velocità inoltre è, all'inizio della combustione, molto modesta per poi aumentare rapidamente nelle zone a maggior turbolenza.

Altri fattori che modificano la velocità di propagazione del fronte di fiamma sono il rapporto  $\lambda$  (vedi 1.1), la temperatura e la pressione di aspirazione, eventuali gas inerti che rallentano la reazione (quando si parla di gas inerti ci si riferisce ai gas residui che rimangono nella camera di combustione dopo la reazione, sia spontaneamente che volontariamente).

Si nota subito quindi come il controllo di questo tipo di motore debba avvenire per *quantità*, ossia si vede come al variare del carico debba necessariamente variare la quantità di combustibile. In altre parole, il rapporto aria-combustibile deve rimanere pressoché costante al variare del carico, aspetto che non si verifica nel C.I. (*Compression Ignition*).

La velocità della fiamma ha una notevolissima importanza perché da questa dipende il tempo di combustione.

### *1.3.1 Combustione anomala: detonazione e preaccensione*

Quando in un motore ad accensione comandata la fiamma investe tutta la camera a partire dalla zona della candela, senza incontrare altre accensioni spontanee nel suo percorso, la combustione è avvenuta in modo regolare.

In alcune condizioni operative, però, si può assistere a dei fronti di fiamma che partono da zone ancora incombuste dovuti all'aumento di pressione e temperatura nella zona che non ha ancora reagito come conseguenza dell'avanzamento della combustione o a combustioni che partono ancora prima dello scoccare della scintilla a causa di particolari condizioni presenti in camera di combustione. Tali fenomeni sono conosciuti rispettivamente come detonazione o battito in testa (*knock* in lingua anglosassone) e come preaccensione (*pre-ignition* o *mega-knock* sempre in lingua anglosassone).

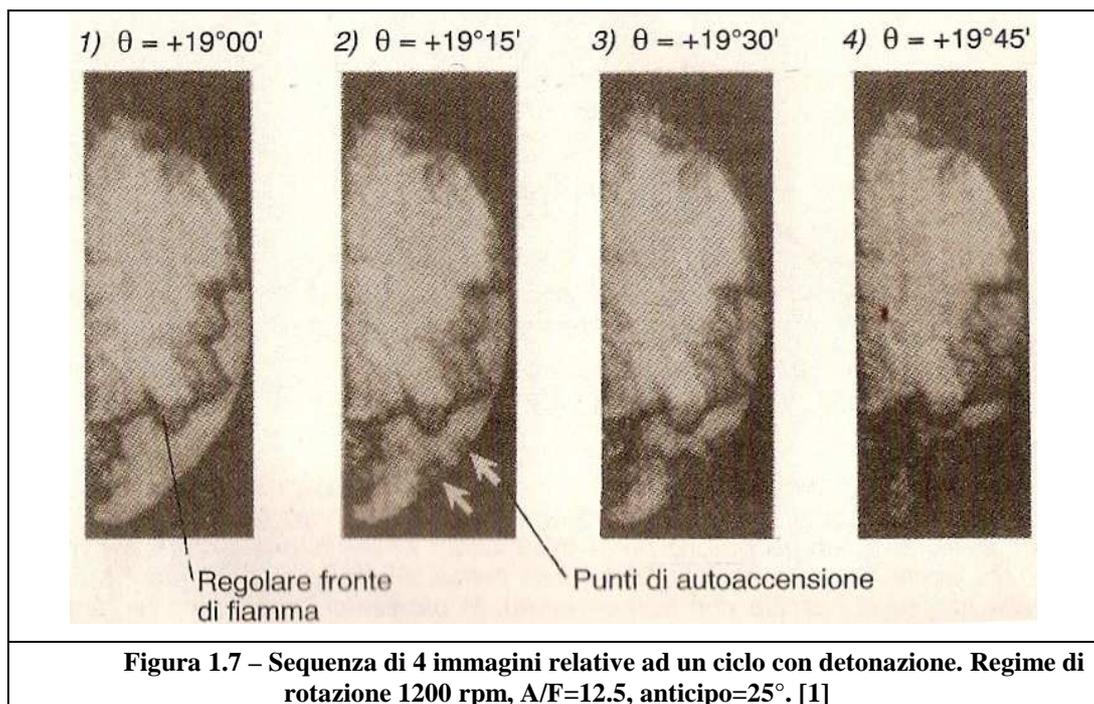
Entrambe costituiscono delle forme di combustione anomala molto importanti in quanto limitano le prestazioni e il rendimento dei motori. Esse si manifestano all'esterno oltre che con l'emissione di un caratteristico rumore metallico, simile ad un martellamento, anche con vibrazioni, riscaldamento accentuato, arrivando, in situazioni particolarmente gravi, al danneggiamento degli organi meccanici del motore.

#### *1.3.1.1 La detonazione*

Nella sua avanzata il fronte di fiamma comprime e riscalda la miscela fresca. Siccome quest'ultima non è mai perfettamente

omogenea, né in termini di composizione né in termini di temperatura (dato il miscelamento con i gas residui di combustione ed il contatto con punti caldi), le reazioni di prefiamma si svilupperanno con una diversa rapidità nei vari punti della carica fresca che dovrebbe essere investita per ultima dal fronte di fiamma (End-Gas). Può quindi accadere che uno o più volumetti di miscela si auto-accendano prima di essere raggiunti dalla fiamma, liberando localmente una forte quantità di energia (che dipende dalla massa di miscela interessata) e producendo un brusco picco di pressione. Questo si propaga nell'intorno con velocità sonica stimolando l'autoaccensione di quella parte di carica non ancora bruciata. Le onde di pressione si riflettono ripetutamente sulle pareti della camera, producendo vibrazioni nelle parti metalliche che si trasmettono all'esterno sotto forma del caratteristico battito.

La figura 1.7 mostra una sequenza di 4 immagini riprese con un intervallo di  $\frac{1}{4}$  di grado di manovella l'una dall'altra, in corrispondenza

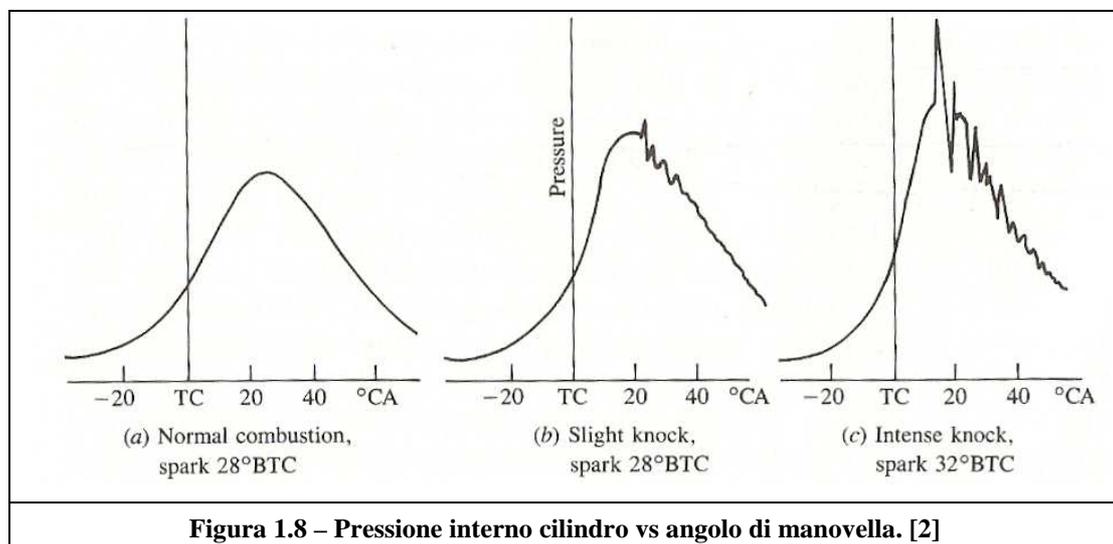


dell'insorgere della detonazione. Le zone più scure indicano un maggiore gradiente di densità. Si vede chiaramente nel secondo fotogramma come in due punti all'interno della miscela fresca si abbia autoaccensione.

Le principali cause della detonazione possono essere:

- a) Miscela magra;
- b) Numero di Ottano del carburante troppo basso;
- c) Fasatura di accensione (anticipo) non adeguata;
- d) Depositi di carbonio;

Quando il motore è soggetto a detonazione i diagrammi della pressione in camera di combustione, in funzione dell'angolo di manovella, mostrano fluttuazioni ad alta frequenza, con picchi di ampiezza gradualmente decrescente nel tempo.

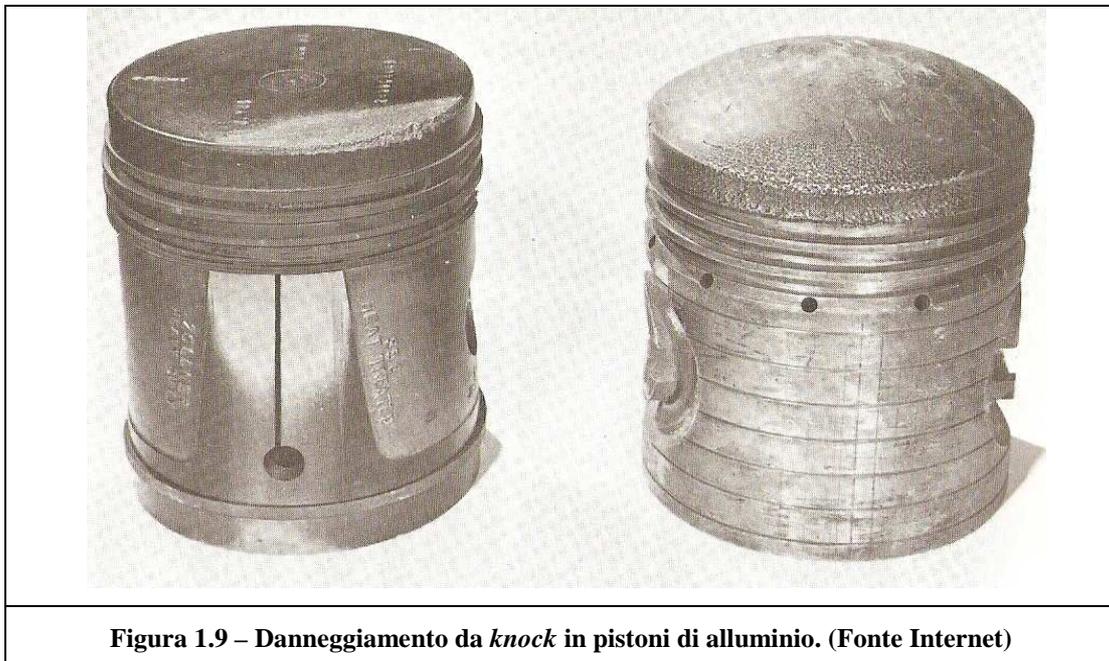


Le figure *a* e *b* sono ricavate a partire dalle stesse condizioni di funzionamento in due cicli diversi. Per circa un terzo dei cicli nelle stesse condizioni non si ha traccia di detonazione e l'andamento di pressione è

quello indicato in *a*. In *c* è rappresentato l'andamento di pressione interno cilindro in condizioni di *knock* severo. La presenza di *knock* inizia più vicino al punto morto superiore e le fluttuazioni hanno un'ampiezza più ampia. Queste fluttuazioni di pressione producono il tipico rumore metallico.

L'ampiezza delle fluttuazioni di pressione è un indicatore dell'intensità di *knock* dato che dipende dalla quantità dei gas che si trovano in condizioni di autoaccensione, e poiché il danneggiamento del motore è legato all'elevata pressione e temperatura dei gas.

L'esatto meccanismo che causa il danneggiamento non è del tutto noto. Sembra improbabile possa essere solo l'elevata pressione la responsabile del danneggiamento delle parti meccaniche. Più accettabile risulta la teoria secondo la quale le onde di pressione, rimuovendo lo strato di gas aderente alle pareti della camera di combustione,



**Figura 1.9 – Danneggiamento da *knock* in pistoni di alluminio. (Fonte Internet)**

incrementano sensibilmente il flusso di calore verso l'esterno. Gli accresciuti carichi termici, uniti alle sollecitazioni meccaniche variabili nel tempo, possono quindi portare alla rottura di qualche componente (pistoni, fasce elastiche, guarnizione della testa) per un fenomeno di fatica a caldo (figura 1.9).

Attualmente la detonazione ha perso parte della sua pericolosità originaria grazie alla sempre più frequente adozione di un sistema elettronico di controllo del fenomeno. In esso un apposito sensore di tipo acustico od accelerometrico rileva l'entità del battito. Confrontando indici fisico statistici calcolati a partire dal segnale acquisito filtrato con soglie calibrate si riesce a stabilire quando si è in condizioni di detonazione. L'istante in cui tali indici eccedono dalle soglie permette di risalire al cilindro che detona. L'unità di controllo provvede quindi a diminuire l'anticipo all'accensione (allontanando il pericolo di *knock* rapidamente).

### *1.3.1.2 La preaccensione*

La preaccensione è un fenomeno tecnicamente diverso dalla detonazione. È un evento che si viene a creare nella camera di combustione a causa della presenza in essa, di ciò che viene definito come "punto caldo", che può essere dovuto alla formazione di depositi incombusti di olio lungo la superficie della camera, oppure a depositi incombusti del carburante stesso (depositi dovuti ad una cattiva ed incompleta combustione) negli eventuali meati sottili (graffi-segni) che possono essersi creati nella camera di combustione, o negli eventuali

spigoli che possono essere presenti in una camera mal progettata o mal lavorata, o ancora a causa (nei motori funzionanti a benzina) di candele con grado termico errato, o di valvole troppo calde (specie quelle di scarico). Queste cause le possiamo considerare come necessarie, ma non sufficienti per scatenare il fenomeno della preaccensione: da ciclo a ciclo, le condizioni di pressione e temperatura in camera (legate al funzionamento del motore ad alti carichi, basse girature, miscela magra e anticipo degradato) raggiungono livello tali che il tempo di ritardo all'accensione della miscela si riduce fortemente favorendo l'insorgere della preaccensione. Questi due aspetti possono risultare anche interconnessi fra di loro: in relazione alle condizioni in camera risultati dal funzionamento stesso del motore e alla partecipazione a diverse combustioni di questi depositi (o ancora una candela con grado termico errato), aumentano sempre più la loro temperatura, fino ad arrivare alla temperatura di accensione del carburante utilizzato, causando perciò, in fase di aspirazione della miscela (o in motori a iniezione diretta in caso di formazione della miscela in camera), un inizio di combustione anticipato rispetto al momento "ottimale" impostato per il motore, causando quindi un funzionamento scorretto dello stesso, con un calo di potenza. È un fenomeno autoesaltante, che in caso di durata eccessiva può portare alla foratura del pistone e causare gravi danni anche ad anelli e valvole [5].

Alla luce di tutto questo, sviluppare un algoritmo che possa “prevedere” in che tipo di condizioni ci troviamo basandoci sui segnali di pressione e temperatura, e conseguentemente attuare una strategia di prevenzione e controllo opportuna, può essere un vantaggio per “portare” le condizioni di funzionamento il più lontano possibile da quelle critiche per l'insorgenza della preaccensione, evitando così il

verificarsi della stessa, e salvaguardando l'integrità strutturale e le prestazioni del motore.

Le sfide associate alla preaccensione sono aumentate negli ultimi anni con lo sviluppo di motori che seguono il concetto di *downsizing*: ridotte dimensioni, cilindrata, consumi, emissioni e altamente sovralimentati. L'elevato livello di sovralimentazione, in comune con una strategia mirata alla riduzione dei consumi, che porta quindi il motore a lavorare con miscele magra e anticipi fortemente degradati, favoriscono la possibilità di preaccensione e il cosiddetto "Mega-Knock".



Figura 2.0 – Danneggiamento da *preaccensione*. (Fonte Internet)

Le principali cause della preaccensione possono essere:

- a) Condizioni di pressione e temperatura in camera di combustione tali da ridurre fortemente il tempo di ritardo all'accensione della miscela;
- b) Depositi di carbonio che rimangono incandescenti;

- c) Candele con grado termico non corretto (con una candela che non riesce a smaltire l'eccesso di calore, si può arrivare a far lavorare gli elettrodi a temperature così elevate da originare l'autoaccensione, mentre una che ne smaltisce troppo favorisce il formarsi di depositi carboniosi);
- d) Miscela magra;
- e) Detonazione o le condizioni che conducono ad essa;
- f) Spigoli vivi in camera di combustione
- g) Le valvole che operano ad una temperatura più alta del normale;
- h) Surriscaldamento (a causa di problemi ai sistemi di raffreddamento).

Data una corretta progettazione della camera di combustione, la preaccensione generalmente può comunque essere eliminata attraverso una corretta selezione della candela, la regolazione della miscela aria/carburante, la pulizia periodica delle camere di combustione e da opportune strategie di funzionamento attuate attraverso il controllo della centralina

Resta comunque il fatto che i due fenomeni di combustione anomala appena descritti risultano strettamente legati fra di loro. La preaccensione comporta una reazione di combustione che, portando a maggiori valori di pressione e temperatura all'interno della camera (di fatto è come se il fenomeno della preaccensione aumentasse l'anticipo di accensione), potrebbe causare detonazione. Viceversa lunghi periodi di detonazione severa potrebbero accentuare la formazione di punti caldi e favorire la preaccensione degli stessi. Si nota quindi come detonazione e preaccensione non siano separati e si esaltino a vicenda.

### *1.4 La centralina elettronica*

E' un vero e proprio microcalcolatore che, in base a una serie di istruzioni in esso memorizzate (la cosiddetta mappatura) e alle informazioni ricevute dai vari sensori, è in grado di controllare le diverse funzioni del motore e della vettura. Inizialmente le centraline elettroniche sono state utilizzate soprattutto per determinare l'anticipo d'accensione e la quantità di benzina iniettata (iniezione). Con lo sviluppo delle moderne tecnologie e con le sempre maggiori richieste di strategie di gestione del motore mirate alla riduzione degli inquinanti e dei consumi e all'ottimizzazione delle prestazioni, si è arrivati ad una gestione completa e molto complessa del motore.

Una sola centralina è tipicamente utilizzata per accensione e iniezione: regola i tempi di iniezione, gli anticipi di accensione, l'avviamento a freddo e l'arricchimento in accelerazione, il regime di minimo, il cut-off, il limite di fuorigiri, la rotazione del corpo farfallato (DBW), il controllo della trazione (TCS), la diagnostica, ecc.

Normalmente in vettura oltre al tipo precedente, esistono altre centraline adibite alla gestione delle funzioni ausiliarie quali il sistema antibloccaggio dei freni (ABS), degli airbag, delle sospensioni attive, del climatizzatore e di tutto ciò che necessita di un controllo di tipo elettronico.

Il funzionamento si basa, in genere, su mappature e su modelli fisici del sistema controllato: la quantità di combustibile da iniettare è determinata in funzione della velocità di rotazione del motore e della pressione nel collettore misurate da sensori.



**Figura 1.10 – Esempio di centralina. (Fonte Magneti Marelli)**

Naturalmente le mappe sono sperimentali. Sono create acquisendo dati in sala prove, validate da collaudi al banco e in vettura.

Questa metodologia di gestire il comportamento del motore e della vettura attraverso strategie basate su mappe presenta problematiche legate a un numero fitto di punti di calibrazione (si arriva anche a 12.000), a tal punto che a volte è impensabile farlo al banco e, soprattutto, senza accettare delle approssimazioni.

È nata quindi in parallelo la determinazione delle mappe con l'ausilio della statistica. Si determinano i valori delle grandezze fisiche da mappare in determinati punti di funzionamento del motore, estrapolando statisticamente i valori nei restanti.

Il futuro, già iniziato, vede la gestione delle funzioni, da parte delle centraline, non tramite mappe, bensì con modelli realizzati conoscendo i fenomeni fisici che li caratterizzano.



# Capitolo 2

## ***Relazione empirica di Douaud & Eyzat***

In primo luogo viene qui descritta la relazione empirica alla base del modello di preaccensione e la sua somiglianza con un modello di tasso di reazione chimica nota come equazione di Arrhenius, che può essere correlato al tempo di ritardo di accensione di un combustibile.

L'idea alla base dell'equazione di Arrhenius, che motiva il suo utilizzo – o l'uso del suo “cugino” – in un modello di preaccensione, è la sua dipendenza della costante di velocità delle reazioni chimiche dalla temperatura e da una certa energia di attivazione. L'equazione di Arrhenius è comunemente espressa come:

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{E}{R \cdot T}\right)$$

dove  $k$  è la costante di velocità delle reazioni chimiche,  $A$  è un fattore pre-esponenziale,  $E$  l'energia di attivazione (l'energia minima necessaria ad un sistema per iniziare un particolare processo, qui nello specifico, per innescare una reazione chimica),  $R$  la costante dei gas e  $T$  è la temperatura.

Per cercare di prevedere l'apparire della preaccensione si può utilizzare il tempo di ritardo all'accensione (o tempo di autoaccensione). E' noto, infatti, che qualsiasi combustibile, posto nelle condizioni di pressione e temperatura idonee all'autoaccensione, impieghi un tempo più o meno lungo a seconda della sua natura prima dello svilupparsi della fiamma. La somiglianza tra l'equazione di Arrhenius e il modello a tempo di ritardo di accensione è chiaro, in quanto quest'ultimo è modellato come:

$$\tau_A = C_1 \cdot \left( \frac{ON}{100} \right)^{C_2} \cdot p^{-C_3} \cdot \exp\left( \frac{C_4}{T} \right)$$

dove ON è il Numero di Ottano del combustibile, p e T sono rispettivamente la pressione e la temperatura della miscela (intese in questo caso a fine fase compressione, senza combustione, ovvero i valori massimi raggiungibili nell'ipotesi, ad esempio, di applicare anticipi di accensione negativi) e C1, C2, C3 e C4 sono coefficienti del modello (Douaud & Eyzat, 1978 [6]).

### *2.1 Coefficienti della relazione empirica*

Durante la ricerca bibliografica preliminare è risultato che non vi è unicità per ciò che riguarda sia la relazione che i coefficienti della relazione in quanto si è riscontrato che, in alcune trattazioni più recenti, la relazione empirica figura senza la parte relativa alla dipendenza dal Numero di Ottano, con conseguente sovrastima del tempo di ritardo all'accensione [7][9][10]. Inoltre sono stati riscontrati anche una moltitudine di coefficienti, alcuni dello stesso ordine di quelli forniti dai due scienziati che per primi hanno formulato la relazione empirica

descritta, Douaud e Eyzat, mentre altri risultano essere completamente diversi, sia come valori sia come ordine di grandezza.

Di seguito sono riportati la varietà di coefficienti riscontrati durante la ricerca preliminare con riferimento alle relative trattazioni:

|                              | C1      | C2    | C3    | C4   |
|------------------------------|---------|-------|-------|------|
| Douaud/Eyzat [6]             | 0,0187  | 3,402 | 1,7   | 3800 |
| Elmqvist/Lindstrom et.al [7] | 0,021   | ---   | 1,7   | 3800 |
| Wayne/Clark et.al [8]        | 0,389   | 7,202 | 1,15  | 5200 |
| Lindstrom [9]                | 0,00759 | ---   | 1,325 | 3296 |
| Elmqvist/Moller [10]         | 0,0071  | ---   | 1,325 | 3296 |

Tabella 2.1 – Vari coefficienti della relazione empirica

Le caselle all'interno delle quali sono presenti dei trattini, fanno riferimento a trattazioni in cui non viene tenuto conto della dipendenza dal Numero di Ottano.

Come si può vedere, alcuni coefficienti si assomigliano in diverse trattazioni, quindi durante la svolgimento della tesi si è trattato di capire se fra questi coefficienti esista una combinazione adatta alla nostra applicazione o se, in fase di calibrazione, si possa arrivare a definire altri coefficienti che risultino più idonei all'algoritmo in questione.

## 2.2 Paraetri di input: $ON$ , $p$ , $T$

La relazione empirica oggetto dell'algoritmo presenta al suo interno tre dipendenze:

- Numero di Ottano;

- Pressione;
- Temperatura.

Per ciò che riguarda il Numero di Ottano, esso dipende dal tipo di combustibile impiegato, quindi una volta scelto il combustibile, esso può essere assunto più o meno costante. Pressione e temperatura, invece, sono due grandezze che possono variare da ciclo a ciclo e vanno quindi calcolate volta per volta.

Entrando più nello specifico, i valori delle ultime 2 grandezze sopracitate, fanno riferimento ai valori di pressione e temperatura al TDC (Punto Morto Superiore) a fine fase compressione senza combustione, e vengono calcolati attraverso una trasformazione politropica [ $pV^n = costante$ ] a partire da valori, sempre di pressione e temperatura, rilevati però a IVC (alla chiusura delle valvole di aspirazione).

Queste grandezze in ingresso nel modello, come già detto, vengono calcolate attraverso una trasformazione politropica da un altro modello, sulla base delle seguenti relazioni:

- la pressione alla chiusura delle valvole di aspirazione  $P_{IVC}$  viene stimata moltiplicando la pressione nel collettore di aspirazione per un fattore di pressione;
- la temperatura alla chiusura delle valvole di aspirazione  $T_{IVC}$  è ottenuta attraverso l'utilizzo dell'equazione dei gas perfetti

$$P_{IVC} [Pa] \cdot V_{IVC} [m^3] = n_{IVC} [mol] \cdot R \left[ \frac{J}{mol \cdot K} \right] \cdot T_{IVC} [K]$$

quindi

$$T_{IVC}[K] = \frac{100 \cdot p_{IVC}[mbar] \cdot V_{IVC}[cm^3]}{m_{IVC}[mg] \cdot R \left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right]}$$

- la pressione a fine fase compressione risulta dalla trasformazione politropica

$$p_{TDC} = p_{IVC} \cdot \left( \frac{V_{IVC}}{V_{TDC}} \right)^n = p_{IVC} \cdot rc_{eff}^{n-1}$$

- la temperatura a fine fase compressione senza combustione viene calcolata tramite la seguente relazione alternativa per la trasformazione politropica

$$TV^{n-1} = \text{costante'}$$

quindi

$$T_{TDC}[K] = T_{IVC}[K] \cdot \left( \frac{V_{IVC}}{V_{TDC}} \right)^{n-1} = \frac{100 \cdot p_{IVC}[mbar] \cdot V_{IVC}[cm^3]}{m_{IVC}[mg] \cdot R \left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right]} \cdot rc_{eff}^{n-1}$$

Dove  $rc_{eff}$  rappresenta l'effettivo rapporto di compressione ed è definito come il rapporto fra il volume alla chiusura della valvola di aspirazione (IVC) e il volume al PMS (o TDC nell'espressione).

Una prima analisi più approfondita della sequenza di espressione che portano a determinare quest'ultima grandezza, ci ha permesso di constatare che il valore della temperatura  $T_{TDC}$  non è del tutto corretto. Il problema risiede nel fatto che, quest'ultimo, risulta essere una semplice stima della temperatura, eseguita attraverso una trasformazione politropica, e non tiene conto, per esempio, del lambda ed in particolare dell'effetto refrigerante associato al calore latente di vaporizzazione del combustibile sulla temperatura alla chiusura della valvola di aspirazione  $T_{IVC}$ .

Più avanti, nel capitolo 3, la questione appena descritta verrà trattata più nel dettaglio e sarà spiegato come è stato corretta la temperatura per renderla più vicina al valore "reale" (vedi 3.2.4.1).

L'idea che sta alla base di questa tesi è stata quella di implementare, all'interno di un modello Simulink, la relazione empirica sopra descritta possibilmente per cercare di prevedere, e quindi evitare, l'insorgere della preaccensione.

Grazie a questa relazione, il nuovo algoritmo sarebbe in grado di stimare il tempo di ritardo di accensione della miscela in millisecondi, per poi poterlo confrontare con l'anticipo di accensione attuato dalla centralina (convertito da angolo di manovella a millisecondi, tenendo conto della velocità di rotazione), in modo da poter valutare quanto siamo o meno alle condizioni critiche per l'insorgere della preaccensione e dare modo così alla centralina di attuare la strategia più appropriata.

Il confronto fra le due grandezze mette in moto tutta la strategia di previsione e controllo del fenomeno della preaccensione basata sull'incremento o il decremento di un contatore, il quale fornisce un'indicazione della vicinanza o meno della preaccensione stessa e va ad agire, conseguentemente, su un ulteriore parametro che determina la condizione di attivazione o disattivazione della strategia “anti-preaccensione”.



# Capitolo 3

## ***Elaborazione del modello di previsione***

Il modello all'interno del quale è presente la strategia di prevenzione, è un modello che farà parte di un sistema di controllo motore che prossimamente Magneti Marelli metterà in produzione implementandolo nelle centraline delle vetture di ultima generazione, all'interno delle quali il cuore pulsante incarna al massimo livello il concetto di *downsizing*:

- ✓ cilindrata ridotta;
- ✓ consumi ridotti;
- ✓ emissioni ridotte.

Questo modello viene utilizzato per definire il target di titolo per la miscela che verrà utilizzata poi come ingresso (insieme alla stima della portata d'aria ai cilindri) per la catena di calcolo della benzina, che sfocerà in un target di tempo di iniezione per l'attuatore benzina, ovvero l'iniettore. Il suo obiettivo principale è quello di definire un target di lambda in ogni condizione di funzionamento del motore, cercando di mantenere il più basso possibile il consumo di carburante.

Durante il normale funzionamento di questo tipo di motore, si è presentato il fenomeno indesiderato della preaccensione: come descritto nel Capitolo 1, è un fenomeno che si verifica in determinate condizioni di pressione e temperatura, derivanti dal funzionamento del motore ad alti carichi, regimi di rotazione medio-bassi, valori di lambda (titolo della miscela) magri e, di conseguenza, anticipi molto degradati<sup>1</sup> (cioè valori di anticipo negativi, oltre il Punto Morto Superiore), condizioni tali da poter far auto-accendere tutta la miscela presente in camera di combustione ancor prima dello scoccare della scintilla.

Il fatto che questo fenomeno si presenti prima dello scoccare della scintilla, lo rende di fatto insensibile al controllo motore che viene attuato per la normale detonazione, in cui si va ad agire sull'anticipo, riducendolo.

L'unica strategia possibile al momento per il controllo della preaccensione è quella di andare ad arricchire la miscela, in modo da poter usufruire di un maggiore quantitativo di combustibile che, evaporando, sottrae un quantitativo maggiore di calore all'aria, con il conseguente risultato di avere una miscela più fresca che non ricade più nelle condizioni critiche di preaccensione.

Attualmente, in centralina, è già presente un algoritmo per la previsione del fenomeno che però risulta ancora alquanto grezzo; il mio compito è stato quello di affinare questo algoritmo per renderlo più

---

<sup>1</sup> La condizione di anticipo degradato può essere considerata una conseguenza intrinseca dell'utilizzo di un titolo di miscela magro: lavorare con un lambda magro significa raggiungere, ciclo dopo ciclo, temperature in camera di combustione sempre più elevate, sfociando nelle condizioni idonee di detonazione; per salvaguardarsi dalla detonazione, l'anticipo viene ridotto ed è possibili che si giunga fino a valori negativi. Purtroppo così facendo, si rischia di ricadere però nelle condizioni idonee per la preaccensione, dove l'anticipo non può più essere usato come leva per uscirne fuori, e l'unica leva possibile è quella di sfruttare l'effetto refrigerante associato al calore latente di vaporizzazione del combustibile.

sensibile ed efficace. Nella pratica ho implementato, tramite linguaggio Simulink, la relazione empirica descritta nel capitolo precedente, in modo tale da poterla opportunamente confrontare con l'anticipo attuato dalla centralina; ho poi realizzato tutta la strategia di funzionamento del contatore, basata su soglie calibrate e guadagni, che determina l'attivazione o meno della strategia di prevenzione dalla preaccensione; e per ultimo sono passato alla validazione del modello, ricercando risultati positivi rispetto a quelli prodotti dall'attuale algoritmo presente in centralina.

In questo capitolo vengono elencati i principali blocchi strutturali del modello, il cui layout è riportato in Figura 3.1, per poi passare ad una descrizione più dettagliata di ogni singolo blocco di cui si compone nello specifico l'algoritmo di previsione.

### *SCHEDULATORE*

In questo blocco è presente una macchina a stati finiti che genera le chiamate a funzione (function call) per tutti i restanti blocchi presenti nel modello.

In ingresso abbiamo i seguenti task di centralina:

- ACCENSIONE MOTORE: è un segnale booleano che identifica l'evento di accensione del motore con la condizione TRUE;
- EVENTO PMS: è un segnale booleano che identifica l'evento di passaggio al PMS con la condizione TRUE;
- EVENTO TEMPO MEDIO: è un segnale booleano che produce una condizione TRUE ogni 16 millisecondi;
- EVENTO TEMPO LENTO: è un segnale booleano che produce una condizione TRUE ogni 100 millisecondi;

- **EVENTO MOTORE FERMO:** è un segnale booleano che produce una condizione TRUE quando il motore viene fermato.

A seconda dell'istante in cui ogni grandezza all'interno del modello deve essere calcolata, ogni blocco presente nel modello stesso viene "chiamato" a svolgere le operazioni contenute al suo interno a seconda del tipo di evento (esempio, nel mio algoritmo le grandezze vengono calcolate ad ogni EVENTO PMS).

#### *CALCOLO DEL LAMBDA DI BASE*

Blocco contenente vari subsystem che permettono di arrivare a definire il lambda di base (output principale) e le relative correzioni. Fra i vari subsystem è presente anche l'algoritmo di previsione della preaccensione (la cui modifica è l'oggetto di questa tesi).

L'output principale diventa poi uno degli input per il calcolo del lambda obiettivo.

#### *CORREZIONE LAMBDA ALL'AVVIAMENTO*

Questo blocco e i subsystem al suo interno risolvono una delle questioni più importanti di tutta la strategia. Una correzione del titolo di miscela si rende necessario a causa dello scarso campo di moto che si ha all'avviamento del motore, in cui le condizioni di combustione non sono le migliori (bassa temperatura, pressione e turbolenza rendono bassa la velocità di fiamma, il che è negativo per la stabilità della combustione).

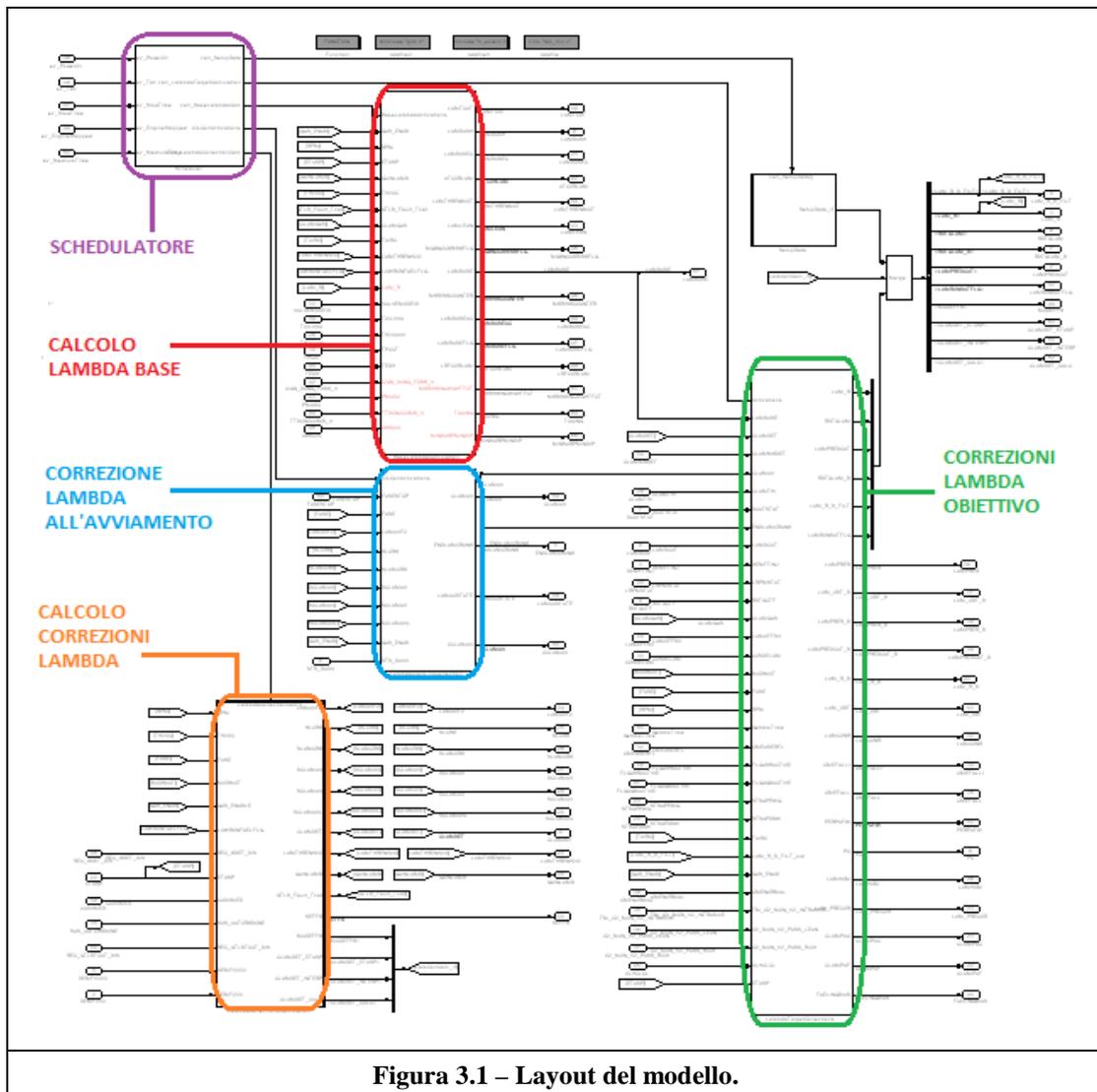
#### *CALCOLO DELLE CORREZIONI DEL LAMBDA*

Blocco che contiene diversi subsystem dove vengono calcolate le principali correzioni del titolo di miscela in funzione, per esempio, dei giri motore, della temperatura dell'acqua di raffreddamento e dell'aria, della modalità di funzionamento del motore e anche della correzione del

titolo in caso di detonazione normale, correzioni utilizzate poi dagli altri blocchi qui descritti.

**CORREZIONI DEL LAMBDA OBIETTIVO**

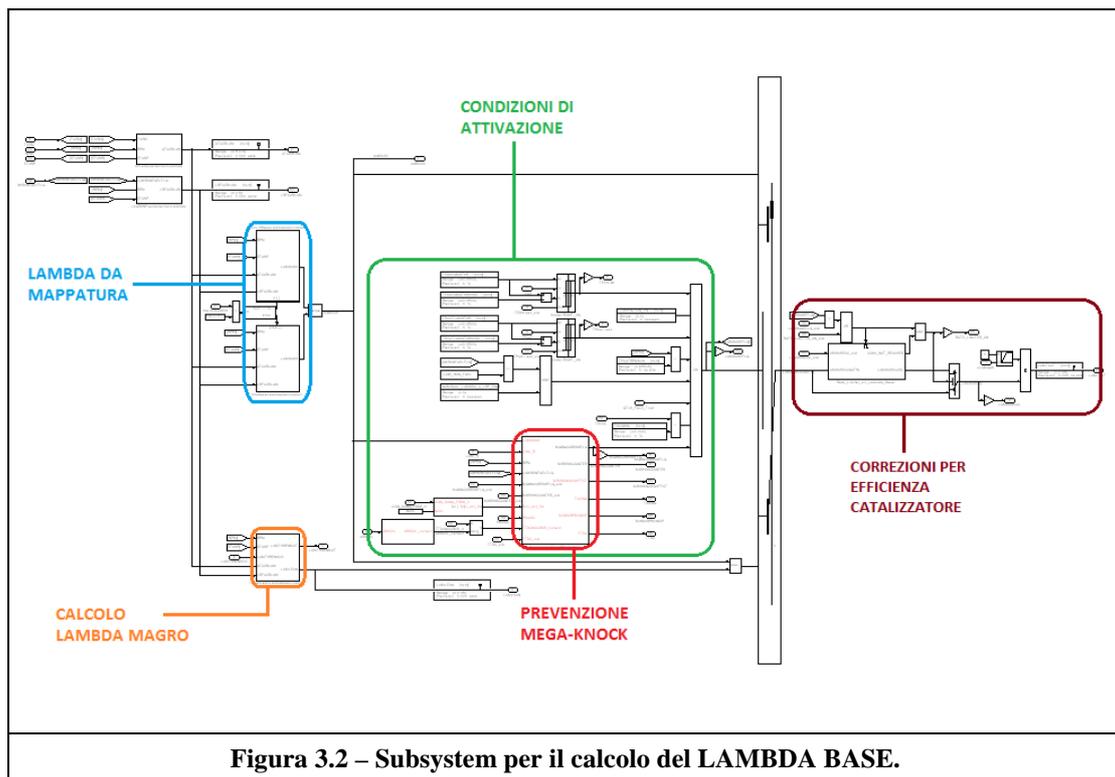
Blocco nel quale viene calcolato il lambda obiettivo, ovvero il target di titolo per la miscela che verrà poi utilizzato come input per la catena di calcolo della benzina, e dove vengono calcolate e applicate le relative correzioni in relazione al valore del lambda base in ingresso e di altre grandezze come, per esempio, l'efficienza di aspirazione e la temperatura dell'aria.



**Figura 3.1 – Layout del modello.**

### 3.1 Calcolo del lambda base

Come già anticipato, questo macroblocco del modello contiene al suo interno vari subsystem che permettono di arrivare a definire il LAMBDA BASE e le relative correzioni (relative alla temperatura dell'aria, all'utilizzo di un combustibile con basso Numero di Ottano, etc.), fra le quali è presente anche l'algoritmo di previsione della preaccensione e che si pone come una delle condizioni abilitative di correzione del valore del titolo di miscela in caso si preveda il verificarsi del fenomeno indesiderato. L'output diventa uno degli input per il calcolo del LAMBDA OBIETTIVO.



Nella parte di modello descritto in questo paragrafo, vengono calcolate due varianti del titolo di miscela: il LAMBDA DA MAPPATURA e un LAMBDA MAGRO. Questo subsystem del

modello si compone, quindi, di due insiemi di blocchi dove vengono calcolati i due valori del titolo di miscela appena descritti; questi due valori di lambda vengono utilizzati come opzioni possibili di uno switch che viene abilitato da diverse condizioni, fra le quali è presente l'output del subsystem che contiene l'algoritmo di previsione della preaccensione; l'output di questo switch verrà poi successivamente "trattato", apportando alcune correzioni per garantire un'elevata efficienza del catalizzatore.

### 3.1.1 Lambda da mappatura

Di seguito viene riportato il blocco che permette di ricavare il valore del LAMBDA DA MAPPATURA. Questo valore del titolo viene ricavato attraverso mappe calibrate in funzione del regime motore e del carico, poi successivamente corretto tramite due coefficienti che tengono conto della temperatura dell'aria e del fatto che si stia utilizzando o meno un combustibile con basso Numero di Ottano.

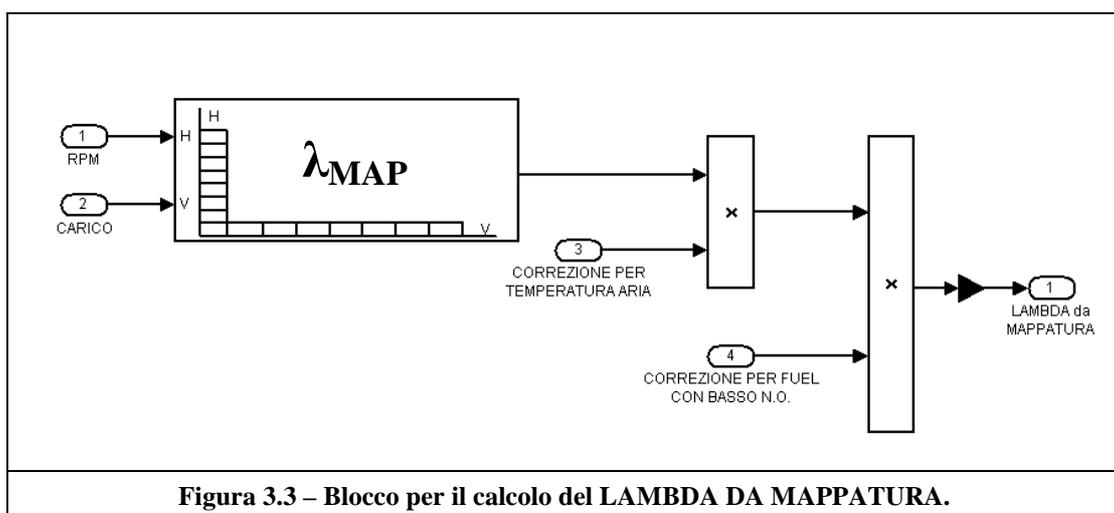


Figura 3.3 – Blocco per il calcolo del LAMBDA DA MAPPATURA.

La mappa  $\lambda_{MAP}$  è stata calibrata tenendo presente due requisiti:

- 1) l'integrità termica della linea di scarico;
- 2) la massimizzazione dell'efficienza di conversione del catalizzatore per le tre famiglie di inquinanti.

Questi due requisiti non sono stati messi in questo ordine per caso, nel senso che è prioritario il requisito 1) e solo nei punti motore (rpm e carico) nei quali il requisito 1) è soddisfatto per qualunque valore di lambda, allora è possibile andare a soddisfare il requisito 2) con una calibrazione opportuna (figura 3.4).

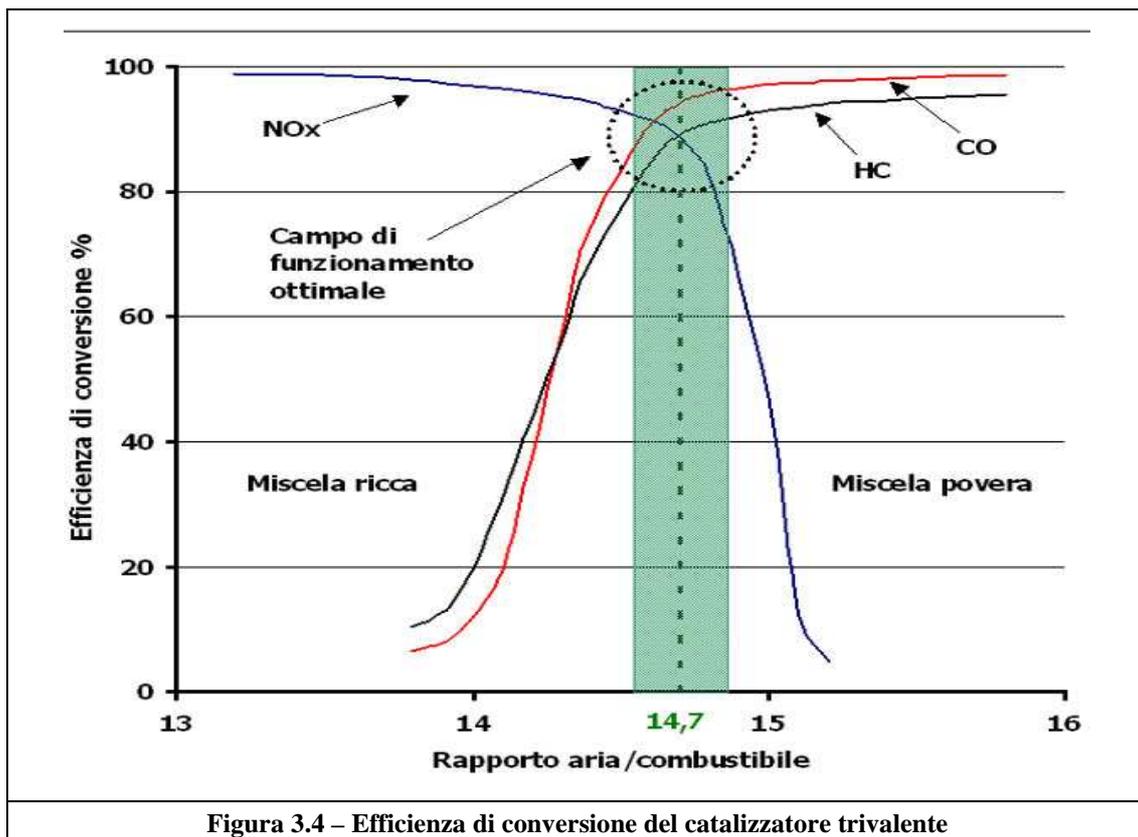
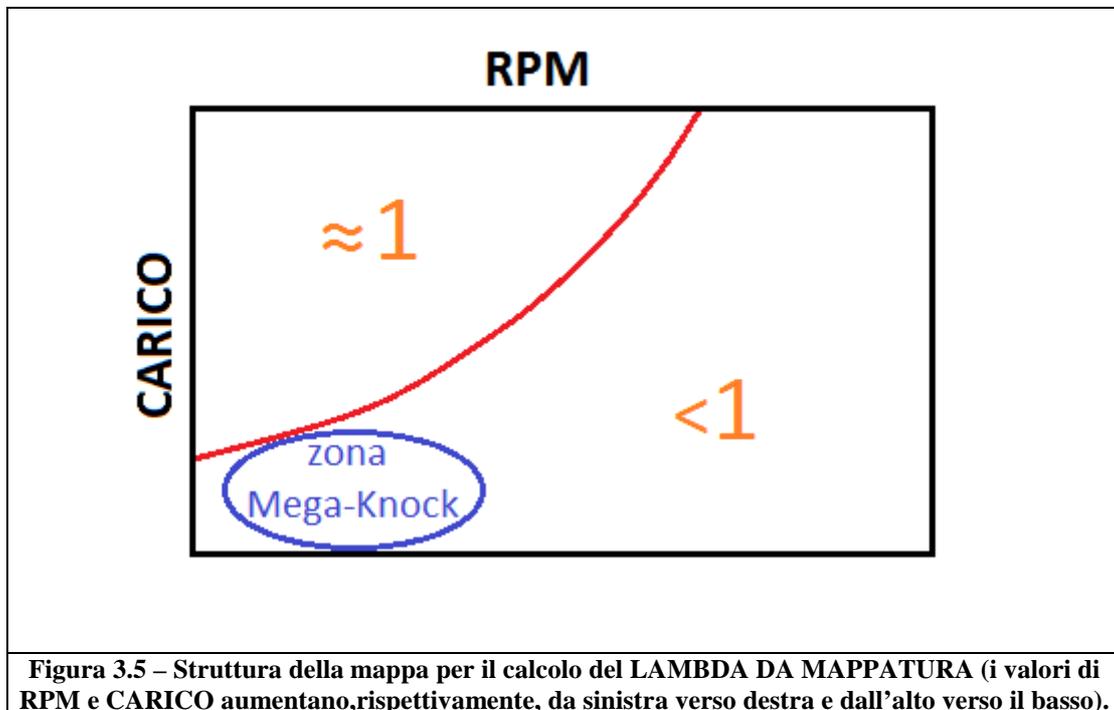


Figura 3.4 – Efficienza di conversione del catalizzatore trivalente

Il risultato è che la mappa sarà divisa in due parti: una in cui sarà possibile definire un lambda molto prossimo a 1 e quindi massimizzare l'efficienza di conversione del catalizzatore, in quanto le temperature allo scarico sono ben lontane dalle soglie considerate critiche; un'altra in cui invece è necessario calibrare un titolo ricco (mettendo in secondo piano, quindi, l'aspetto di efficienza del catalizzatore) che è quello che garantisce la protezione termica dei componenti della linea di scarico. Il titolo sarà sempre più ricco al crescere della giratura e del carico (Figura 3.5).



Discorso a parte per la zona di Mega-Knock (altissimi carichi e basse girature,  $< 3000$  rpm): nella mappa, in questo caso, vengono calibrati valori ricchi non perché le temperature allo scarico sono troppo alte, ma perché la magrezza facilita il presentarsi del fenomeno Mega-Knock.

### *3.1.2 Lambda magro*

Questo valore del titolo di miscela rappresenta il target di lambda in caso di combustione magra, derivante dalla strategia di riduzione dei consumi di carburante. Anch'esso viene sempre ricavato da tabelle calibrate in funzione del REGIME MOTORE e del CARICO, corretto sempre con un coefficiente in funzione della temperatura dell'aria e del combustibile con basso Numero di Ottano.

### *3.2 Previsione della preaccensione (Mega-Knock)*

In questo paragrafo verranno descritti in maniera dettagliata tutti i blocchi che vanno a comporre l'algoritmo di previsione della preaccensione, il cui output, come già descritto nel paragrafo 3.1, rappresenta una delle condizioni abilitative per il passaggio da una combustione magra (caratterizzante il tipo di strategia motore per la riduzione dei consumi) ad una combustione più ricca (caratterizzante il tipo di strategia per la prevenzione dalla preaccensione).

In primo luogo viene mostrato il plant dell'algoritmo (Figura 3.6), dove si può vedere, in azzurro, tutto ciò che riguarda le grandezze in ingresso che servono per il calcolo del tempo di ritardo all'accensione, in giallo la parte relativa alla strategia di previsione dove viene effettuato il confronto fra il tempo di ritardo all'accensione precedentemente calcolato e l'anticipo minimo attuato in base alla strategia motore (opportunamente convertito in un tempo, vedi 3.2.3) e in verde la parte che permette di ricavare il segnale abilitativo in uscita

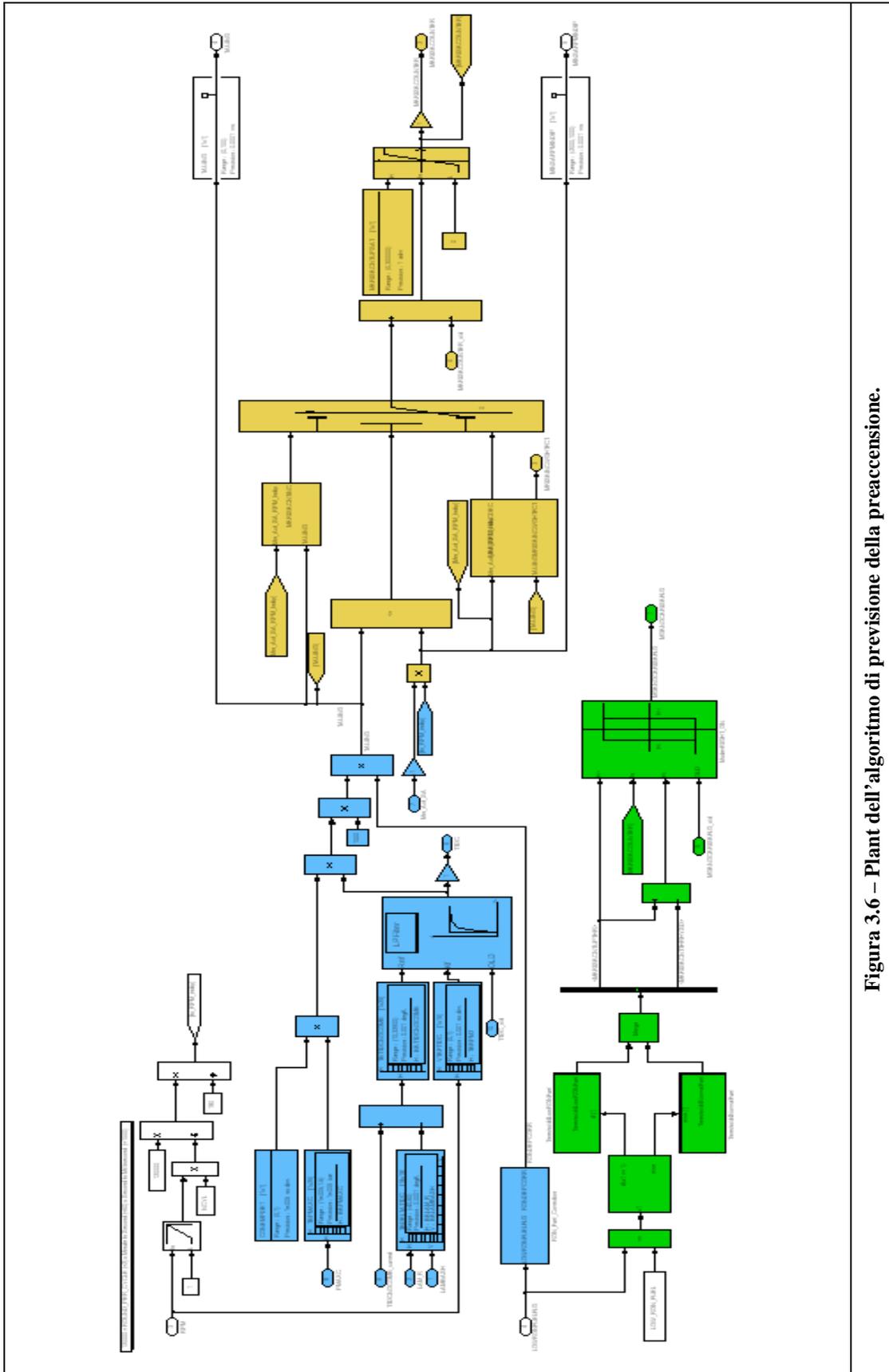


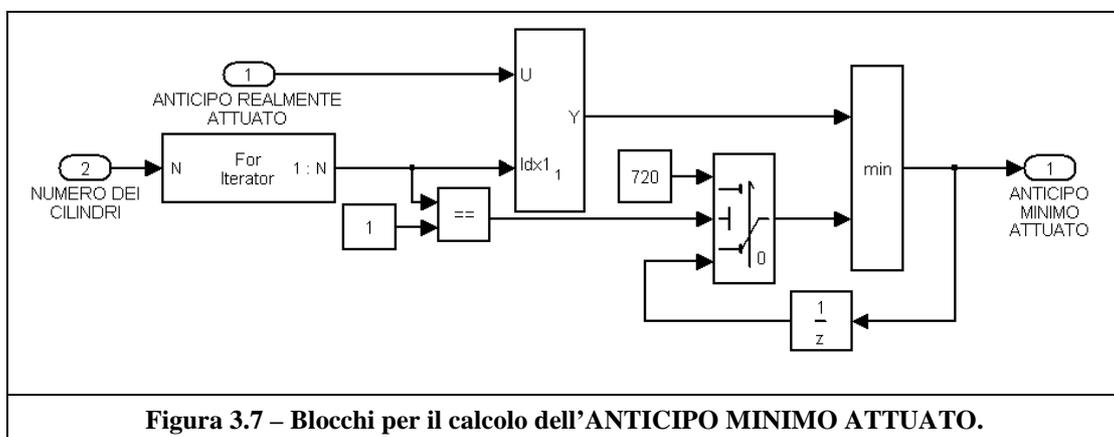
Figura 3.6 – Plant dell’algoritmo di previsione della preaccensione.

dall’algoritmo per poter poi attivare la strategia motore preventiva (ovvero la modifica del titolo di miscela). Vi è poi un insieme di blocchi (diciamo ausiliari) che sono stati lasciati in bianco, il cui funzionamento verrà spiegato in seguito.

Vediamo nel dettaglio ogni singolo blocco, o gruppo di blocchi, che compongono l’algoritmo spiegando il compito che sono tenuti ad assolvere.

### 3.2.1 Anticipo minimo attuato

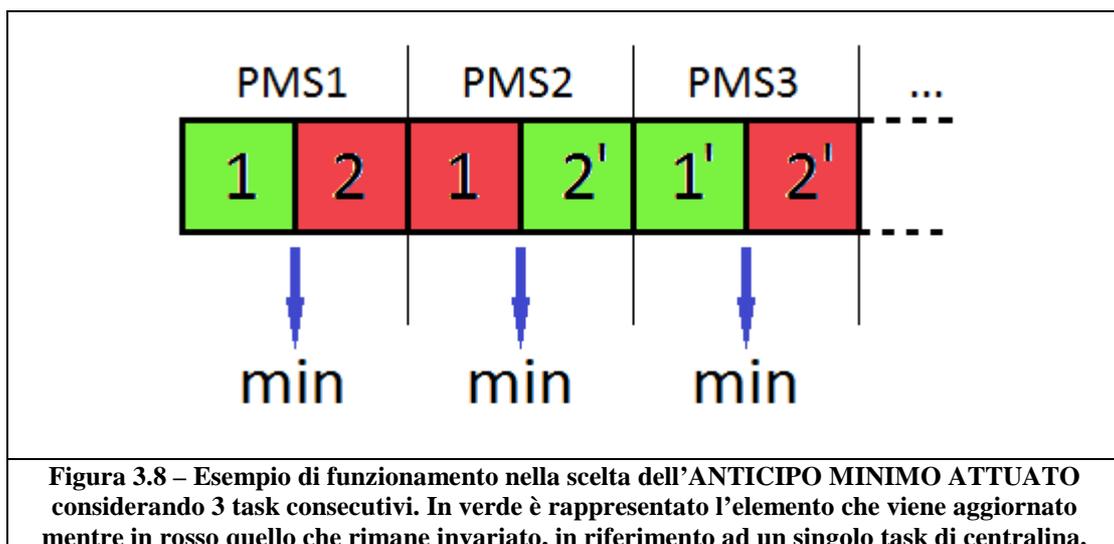
Viene qui descritto il subsystem che contiene i blocchi (Figura 3.7) che permettono di ricavare una delle due grandezze che rappresentano il nodo principale della strategia di previsione, ovvero l’ANTICIPO MINIMO: sostanzialmente si parte, come input, dall’ANTICIPO REALMENTE ATTUATO in funzione della strategia motore attiva in quel momento e dal numero dei cilindri; è presente un blocco per legare l’ANTICIPO ATTUATO con il relativo cilindro di riferimento e ogni anticipo al ciclo attuale viene poi confrontato con quello al ciclo precedente, e viene tenuto in considerazione il più piccolo fra i due.



**Figura 3.7 – Blocchi per il calcolo dell’ANTICIPO MINIMO ATTUATO.**

C'è da notare che non si tiene conto dell'anticipo realizzato in quel preciso istante nel cilindro considerato, ma si tiene conto di quello più piccolo fra i due cilindri nell'istante di riferimento considerato. Mi spiego meglio: la grandezza ANTICIPO REALMENTE ATTUATO è in realtà un vettore composto da due elementi (in riferimento alla mia applicazione) che rappresentano il feedback di anticipo appena attuato per i due cilindri; questo vettore (Figura 3.8) viene continuamente aggiornato ad ogni task di centralina (più precisamente ad ogni EVENTO PMS) e il confronto per capire qual è l'anticipo più piccolo e tenerlo in considerazione come segnale in uscita viene fatto fra i due valori di anticipo presenti a quel task in quel vettore.

Questo è stato fatto per “mettersi dalla parte del sicuro”, nel senso che l'anticipo più piccolo ci pone in condizioni più critiche nei riguardi della preaccensione e, piuttosto che mancare una previsione e rischiare di danneggiare il motore, conviene che la strategia di prevenzione si attivi una volta in più per preservare l'integrità e le prestazioni del motore.



### 3.2.2 Devettorizzazione della temperatura

La temperatura rappresenta una dei principali ingressi dell’algoritmo di previsione della preaccensione. La TEMPERATURA A FINE FASE COMPRESSIONE SENZA COMBUSTIONE, stimata da un altro modello attraverso una trasformazione politropica (come ampiamente descritto nel Capitolo 2), esce ad ogni ciclo da suddetto modello sotto forma di vettore, avente un numero di elementi pari al numero dei cilindri. Il blocco Selector permette di associare ogni singolo valore di temperatura presente all’interno del vettore con il relativo cilindro di riferimento che in quel momento si trova al PMS, seguendo l’effettivo ordine di combustione (Figura 3.9).

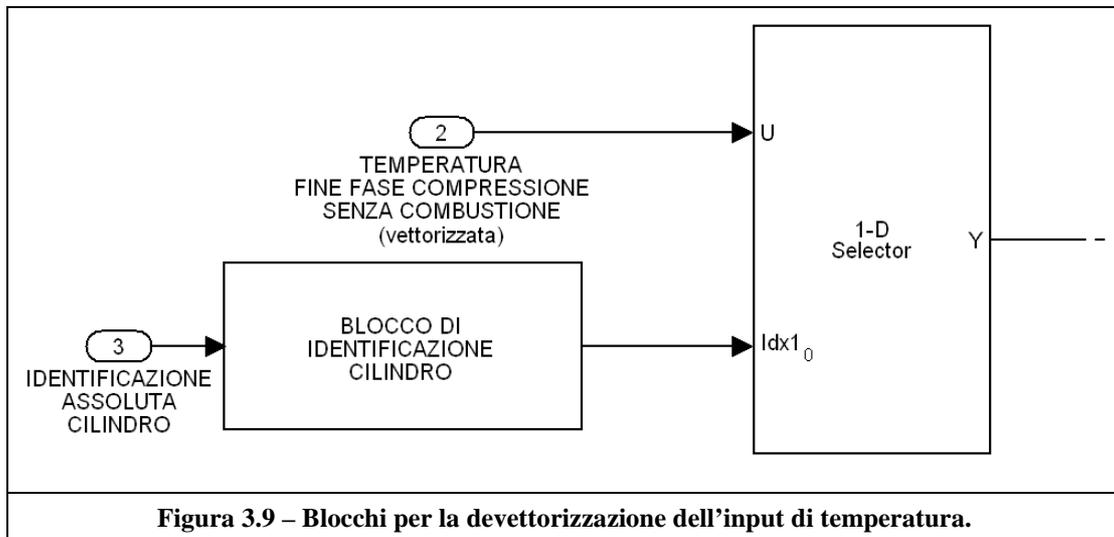
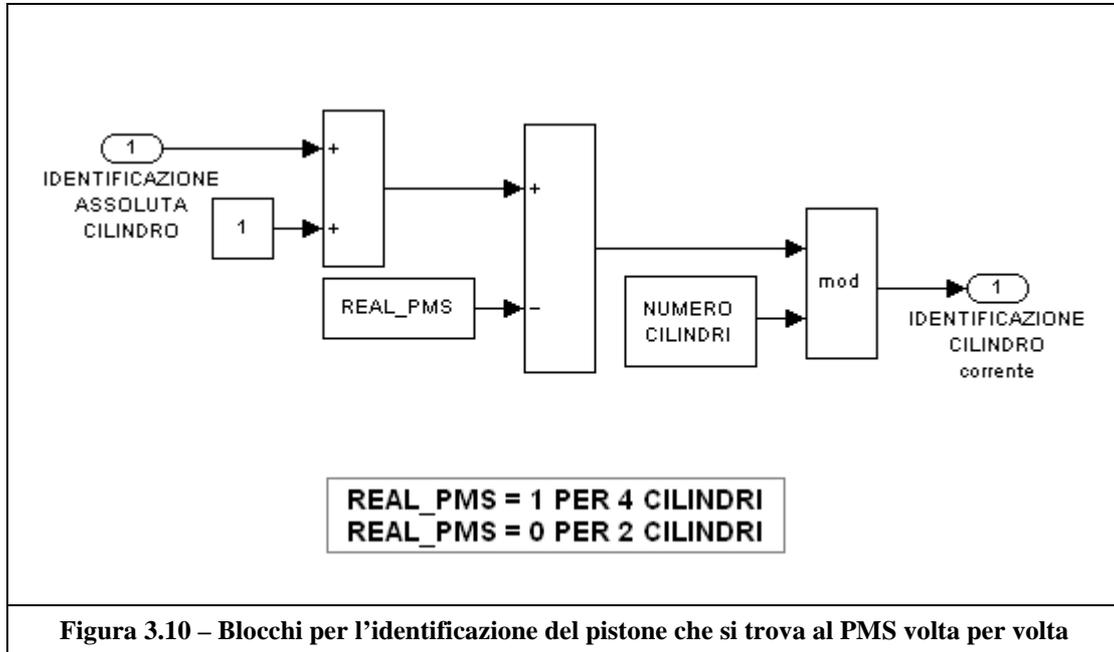


Figura 3.9 – Blocchi per la devettorizzazione dell’input di temperatura.

Per poter eseguire questa associazione temperatura-cilindro, prima del selettore è presente un subsystem denominato Blocco di Identificazione Cilindro (Figura 3.10), nel quale vi è in ingresso l’IDENTIFICAZIONE ASSOLUTA CILINDRO che è una grandezza che varia fra il valore 0 e un valore pari al numero effettivo di cilindri

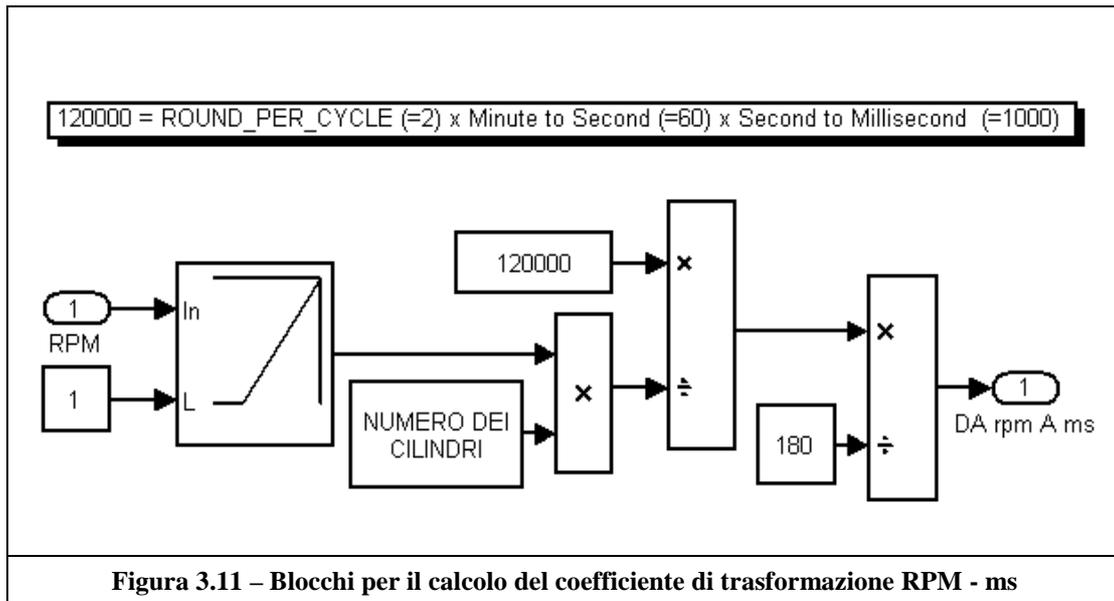
meno 1, ed identifica il cilindro che si trova al PMS di fine compressione.



La parte principale risiede nel blocco MOD: questo blocco permette di identificare quale cilindro si trova al PMS di fine compressione attraverso semplici passaggi matematici.

### 3.2.3 Convertitore CAD – ms

Il gruppo di blocchi riportato di seguito (Figura 3.11) viene utilizzato per calcolare un coefficiente che permette di passare dall'ANTICIPO MINIMO ATTUATO, espresso in angolo di manovella, all'ANTICIPO MINIMO ATTUATO espresso in millisecondi (tenendo conto della velocità di rotazione del motore), così che possa essere tranquillamente confrontato col TEMPO DI AUTOACCENSIONE (anch'esso espresso in millisecondi).



### 3.2.4 Calcolo del tempo di autoaccensione

Finora si è parlato di tutti quei subsystem e raggruppamenti di blocchi che si potrebbero definire “ausiliari”. Da qui in poi si inizia a parlare dell’algoritmo vero e proprio.

Partiamo riportando l’espressione della relazione empirica oggetto dell’implementazione:

$$\tau_A = C_1 \cdot \left( \frac{ON}{100} \right)^{C_2} \cdot p^{-C_3} \cdot \exp\left( \frac{C_4}{T} \right)$$

Inizialmente la relazione empirica è stata implementata interamente, comprendendo anche la parte relativa alla dipendenza dal Numero di Ottano anche se, come già riportato nel capitolo precedente, durante la ricerca bibliografica sono state riscontrate relazioni empiriche che non comprendevano questa parte.

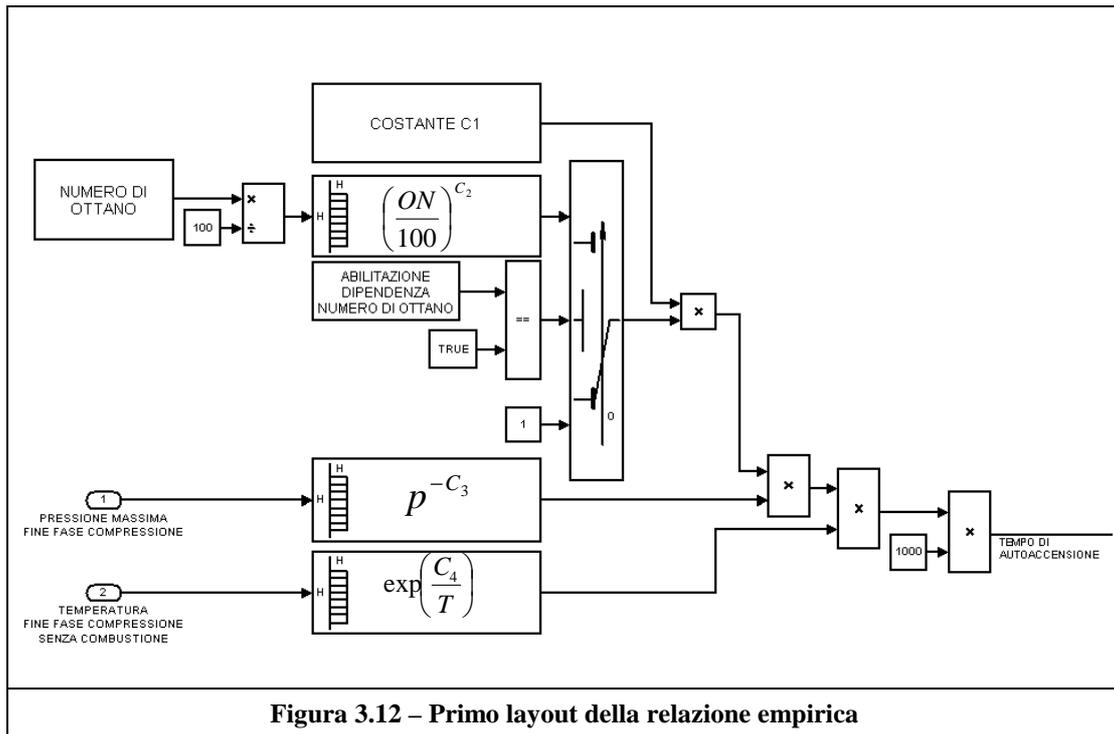


Figura 3.12 – Primo layout della relazione empirica

In Figura 3.12 è rappresentato lo schema in linguaggio Simulink della relazione empirica dove si possono notare, a sinistra, i tre ingressi (NO, PRESSIONE e TEMPERATURA), a destra l'output (TEMPO DI AUTOACCENSIONE), mentre centralmente sono presenti tre tabelle calibrate che presentano in ingresso le grandezze fondamentali ed ognuna realizza, rispettivamente, la parte di relazione riportata all'interno del riquadro (cioè i due elevamenti a potenza per ciò che riguarda NO e pressione e l'esponenziale per ciò che riguarda la temperatura).

Per tener conto del fatto che sono state osservate relazioni senza la parte relativa al Numero di Ottano, dopo la tabella che realizza l'elevamento a potenza del suddetto, è stato posto uno switch, opportunamente abilitato, che permette di calcolare il TEMPO DI

AUTOACCENSIONE sia in presenza della dipendenza da NO che in assenza di essa.

Questa prima stesura della relazione empirica è anche stata scartata molto in fretta in quanto in centralina non è presente niente che ci dica quanto vale effettivamente il Numero di Ottano del combustibile che si sta utilizzando, ma ci riesce a dire soltanto se si tratta di un buon combustibile (Good Fuel) o di un cattivo combustibile (Bad Fuel): questa distinzione viene eseguita monitorando il livello di detonazione in relazione all'anticipo. Esiste un modello in centralina che è in grado di rilevare per più cicli consecutivi il livello di detonazione e di metterlo in relazione con l'anticipo attuato: se per quel valore di anticipo (che, per esempio, può risultare essere idoneo nel caso si utilizzi un Good Fuel) il livello di detonazione è alto, l'algoritmo di questo modello "intuisce" che non si tratta di un Good Fuel, ma bensì di un Bad Fuel e modifica il suo output; se invece non è presente detonazione e siamo su valori di anticipo più idonei per il Good Fuel, i casi sono due, o il combustibile utilizzato è un Good Fuel e il modello ha già confermato la cosa, oppure, se in uscita ci ha detto fino ad ora che si trattava di un Bad Fuel, la "scelta" verrà switchata sul Good Fuel.

Così si è arrivati ad un layout definitivo della relazione empirica (Figura 3.13) nel quale si può notare l'aggiunta di nuovi blocchi così come alcuni nuovi ingressi, il tutto ampiamente spiegato nelle pagine successive.

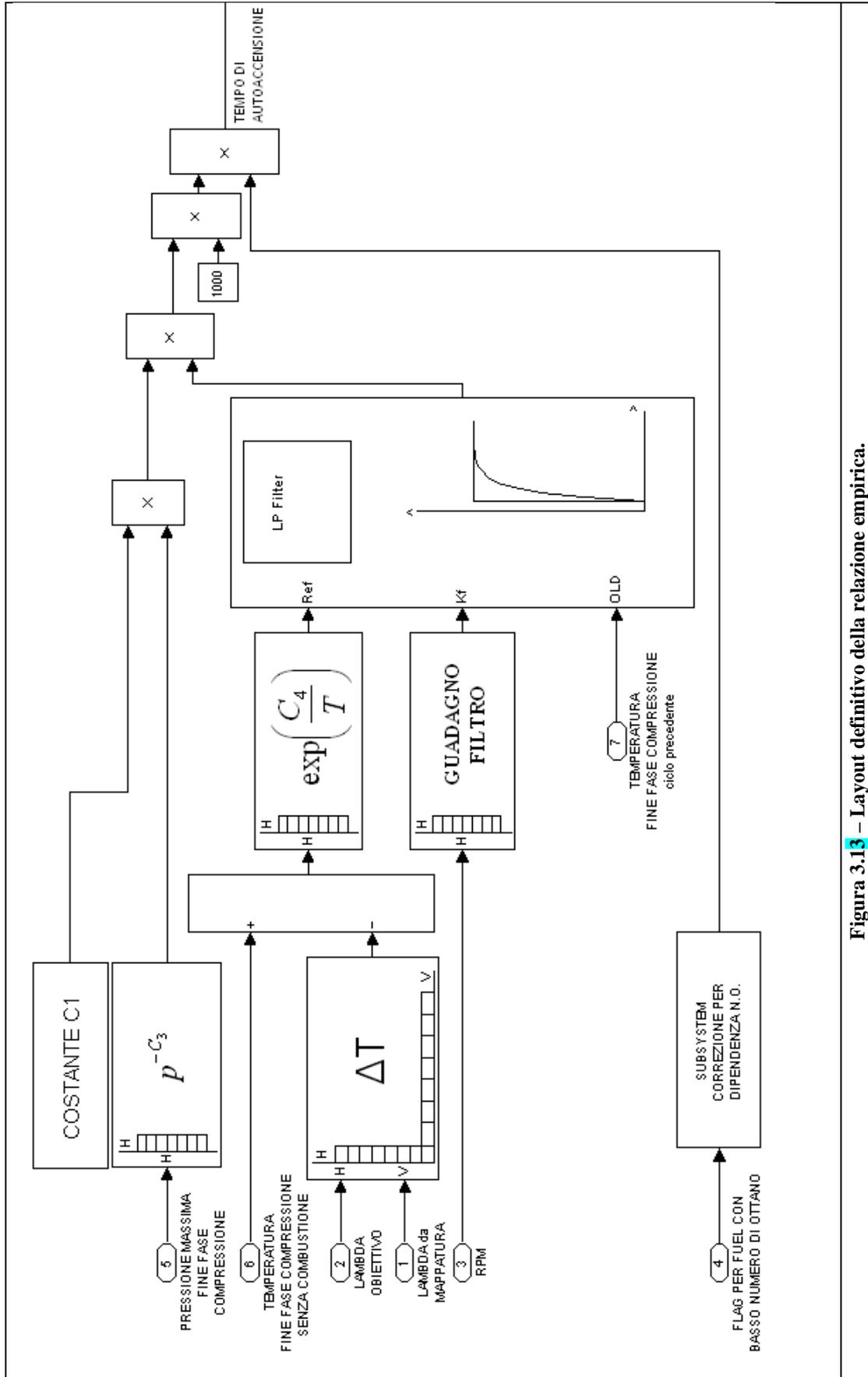


Figura 3.13 – Layout definitivo della relazione empirica.

### *3.2.4.1 Tabella per correzione temperatura*

Un'analisi più approfondita ci ha portato a concludere che la TEMPERATURA FINE FASE COMPRESSIONE, così come verrebbe calcolata secondo la relazione di cui al capitolo 2, non è del tutto corretta. Il problema principale risiede nel fatto che quel valore di temperatura è un valore puramente stimato tramite la relazione di una trasformazione politropica. Quello che la tabella di seguito descritta cerca di fare, è correggere la temperatura per renderla più vicina al valore “reale”.

Ragionando sul tipo di strategia che viene attuata per allontanarsi dalle condizioni critiche di preaccensione, si è pensato di introdurre una dipendenza dal titolo della miscela, che ricalca il principio alla base della strategia di prevenzione dal Mega-Knock: in base al titolo di miscela attuato e quindi alla quantità di combustibile introdotta, quest'ultimo evaporando sottrarrà una certa percentuale di calore all'aria in relazione alla quantità introdotta.

Inoltre, ragionando su come si giunge a calcolare questa temperatura, la logica ha portato a pensare che non sarebbe appropriato correggere la TEMPERATURA FINE FASE COMPRESSIONE in ingresso direttamente all'interno della parte di modello da me generata, ma ha più senso andare a correggere la TEMPERATURA A IVC (alla chiusura della valvola di aspirazione), cioè prima che la temperatura venga stimata tramite la trasformazione politropica, in quanto sostanzialmente alla chiusura delle valvole di aspirazione la miscela è già stata generata e quindi il quantitativo di combustibile introdotto ha

già fatto variare sensibilmente la temperatura, ed è in questo frangente che vanno giustamente apportate eventuali variazioni.

Questa correzione viene fatta applicando un bilancio energetico semplificato che ci porta ad ottenere un delta di temperatura in funzione del rapporto aria / combustibile secondo questi semplici passaggi:

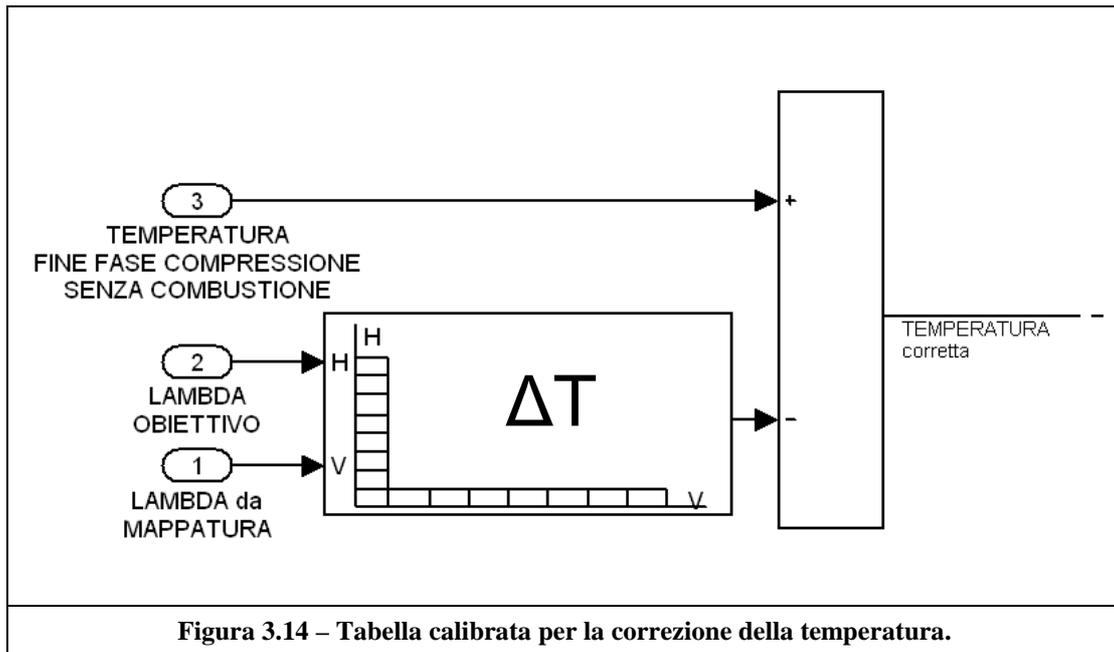
$$\dot{m}_a c_p T_{a,1} + \dot{m}_l (c_l T_l - r) = (\dot{m}_a + \dot{m}_v) c_p T_{a,2}$$

se  $T_{a,1} \approx T_l$  con  $\alpha = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$  risulta

$$\Delta T = T_{a,2} - T_{a,1} = -\frac{r}{(1 + \alpha)c_p}$$

Nell'ipotesi benzina, il calore latente di vaporizzazione risulta essere pari a circa  $r = 400 \text{ kJ/Kg}$ . [3]

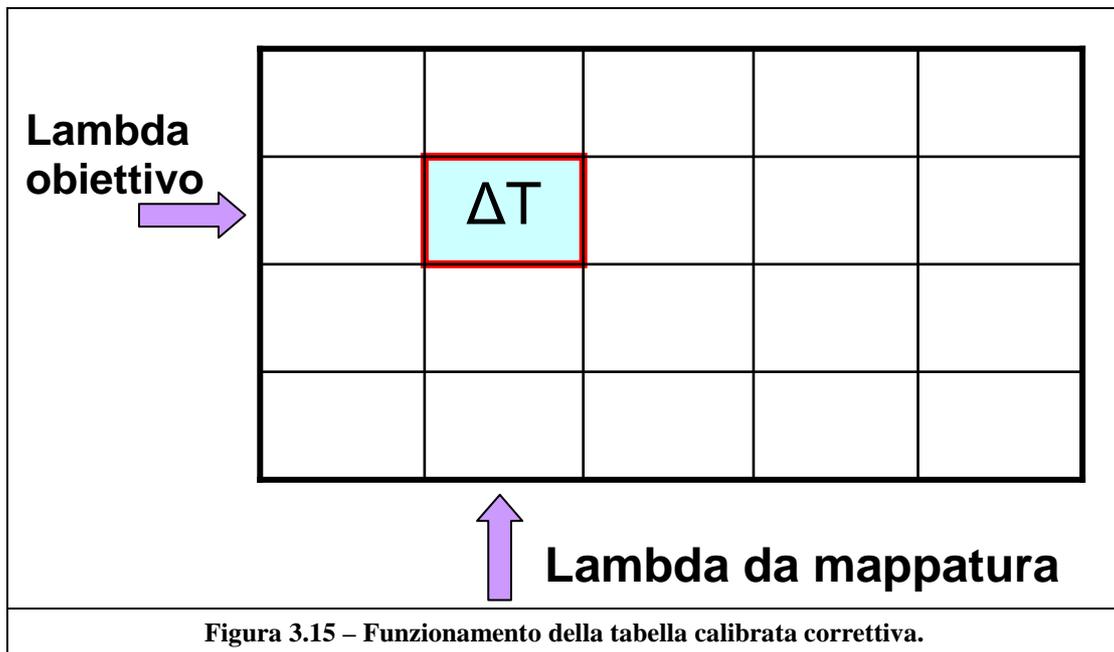
Purtroppo per poter eseguire questa correzione era necessario modificare il modello relativo al calcolo di questa temperatura, ma viste le procedure aziendali questo non era immediatamente possibile, quindi per ottenere gli stessi risultati abbiamo cercato un'altra strada: si è pensato di realizzare una TABELLA CORRETTIVA  $\Delta T$  per rendere più realistica la temperatura (Figura 3.14).



Nella pratica, per poter ricavare questa TABELLA CORRETTIVA  $\Delta T$  si è reso temporaneamente necessario riprodurre fedelmente (nel mio modello) il ramo del modello in cui viene normalmente stimata la TEMPERATURA FINE FASE COMPRESSIONE; poi è stato da me aggiunto in parallelo un ramo da cui è sempre possibile stimare la temperatura, ma alla presenza di una correzione dovuta al lambda seguendo le relazioni sopra descritte per il calcolo del  $\Delta$  di temperatura in funzione del quantitativo di combustibile introdotto, correzione che è stata applicata nel punto in cui si calcola la temperatura a IVC.

Successivamente gli output generati da questi due rami vengono sottratti uno all'altro (quindi viene fatta una differenza fra la temperatura normalmente stimata e quella corretta) e quello che si ottiene è il  $\Delta T$  fra i due valori di temperatura sopra citati, derivante dalla correzione applicata e con questi valori sono andato a riempire la tabella correttiva.

Per realizzare questa correzione e, quindi, come ingressi della TABELLA CORRETTIVA  $\Delta T$  calibrata, vengono utilizzati due valori diversi del titolo di miscela: un lambda mappato in funzione dei GIRI MOTORE e del CARICO (LAMBDA DA MAPPATURA, descritto nella prima parte del Capitolo 3) e un lambda derivante dalla strategia motore attuata (LAMBDA OBIETTIVO). Le motivazioni dell'utilizzo di questi due valori di lambda sono molto semplici: siccome la temperatura viene stimata tramite una trasformazione politropica in condizioni statiche, si è deciso di utilizzare il LAMBDA DA MAPPATURA che viene considerato un lambda “statico”; il LAMBDA OBIETTIVO è stato scelto in quanto deriva dalla strategia motore attuata e quindi è sicuramente più “dinamico”.



Prima di giungere alla soluzione di utilizzare due valori di lambda e giungere quindi alla tabella correttiva attuale, sono state provate altre strade, consistenti sostanzialmente nel considerare altre dipendenze (giri

motore, carico, rapporto di compressione) ma tutte restituivano un'influenza blanda, poco significativa, e quindi sono state scartate.

Tradotta per via grafica la tabella si presenta in questo modo (notare che il  $\Delta T$  è nullo sulla diagonale della matrice, ovvero per valori dei due LAMBDA uguali, mentre è positiva se LAMBDA OBIETTIVO > LAMBDA da MAPPATURA e negativa viceversa):

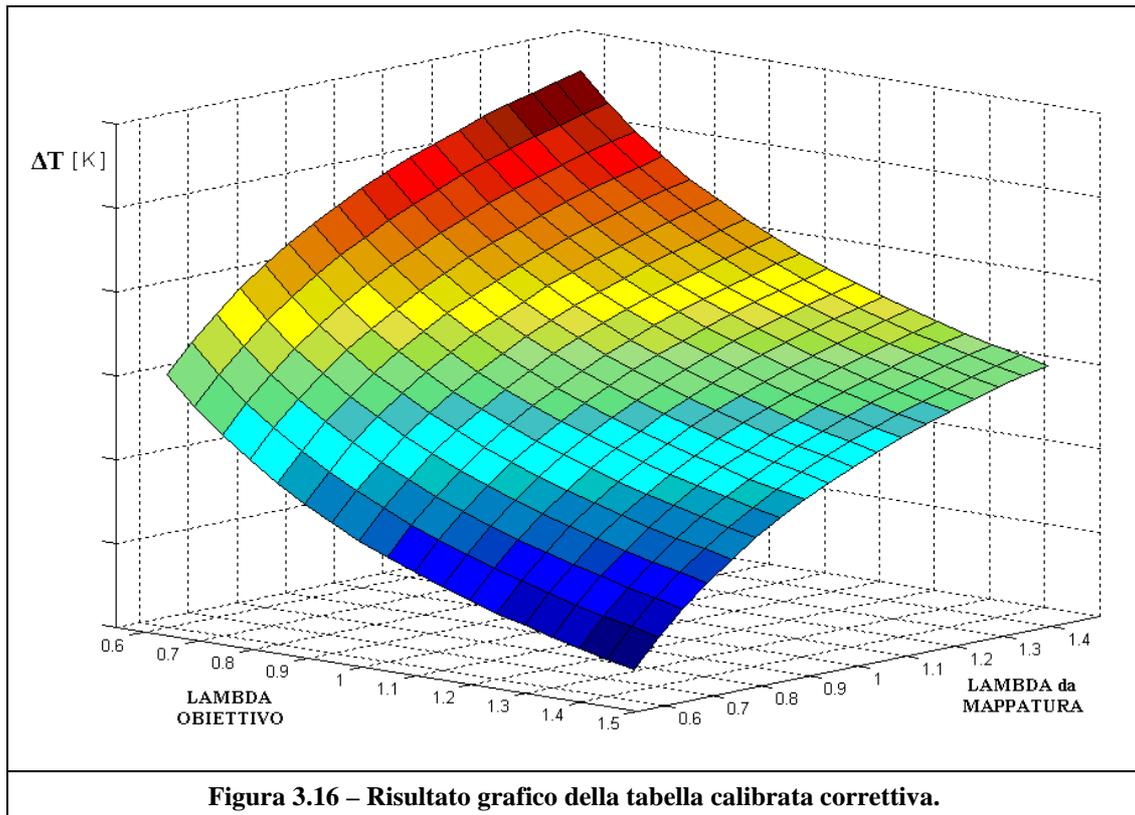
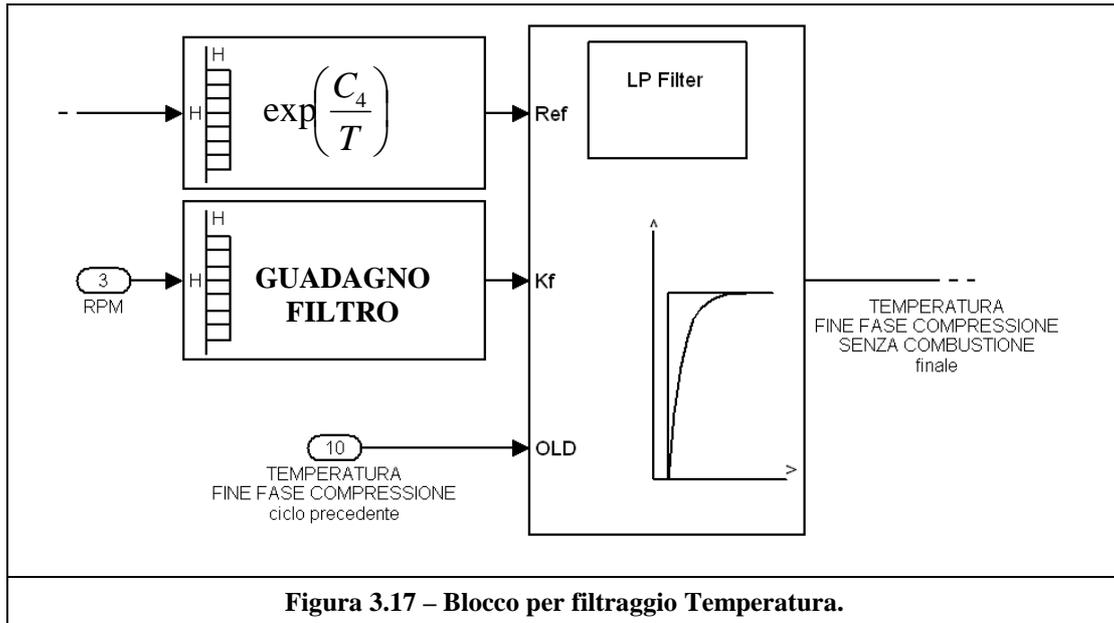


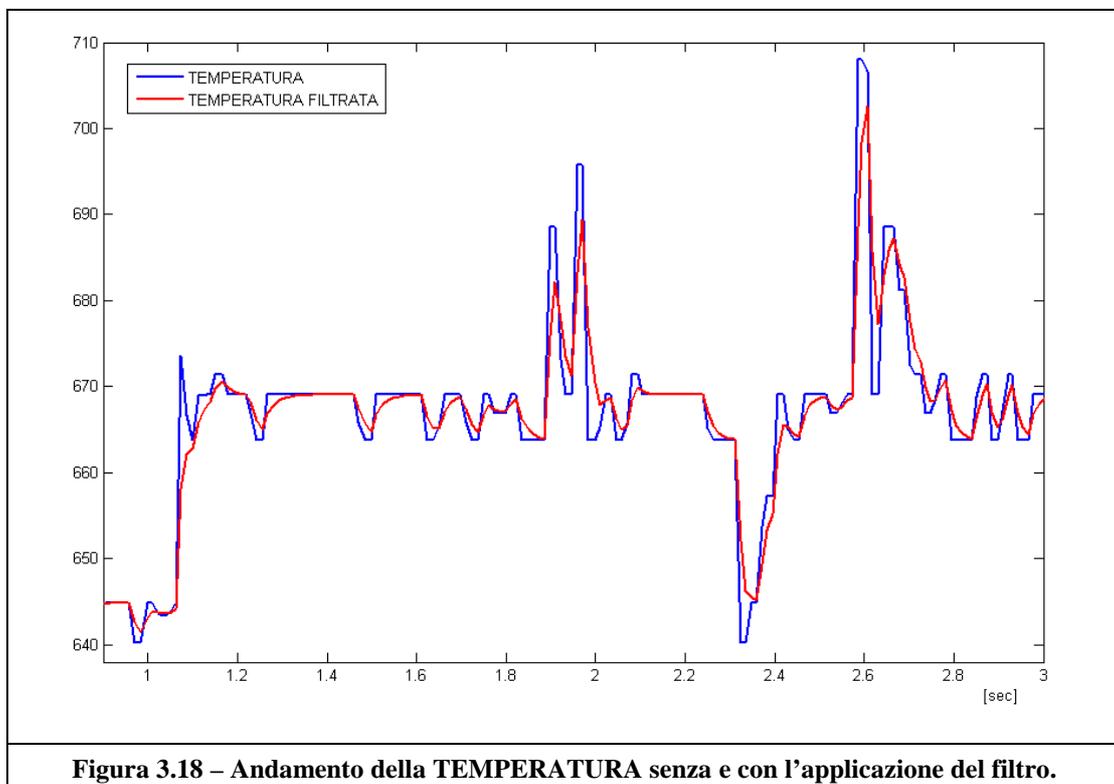
Figura 3.16 – Risultato grafico della tabella calibrata correttiva.

### 3.2.4.2 Filtro Inerzia Temperatura.

Nella pagina successiva è riportato il blocco che realizza il filtraggio della temperatura a TDC con i relativi dati in ingresso. Questo blocco, che realizza un filtro passa-basso, è stato introdotto sempre a seguito della questione di cercare di rendere un po' più "realistica" la stima della TEMPERATURA FINE FASE COMPRESSIONE.



Come si può chiaramente vedere in Figura 3.18, l'applicazione di questo filtro rende meno squadrati gli andamenti: è una prima idea (ancora alquanto primitiva che potrebbe subire cambiamenti in futuro) pensata per simulare una sorta di inerzia termica, cioè per tener conto di ciò che è avvenuto al ciclo precedente.



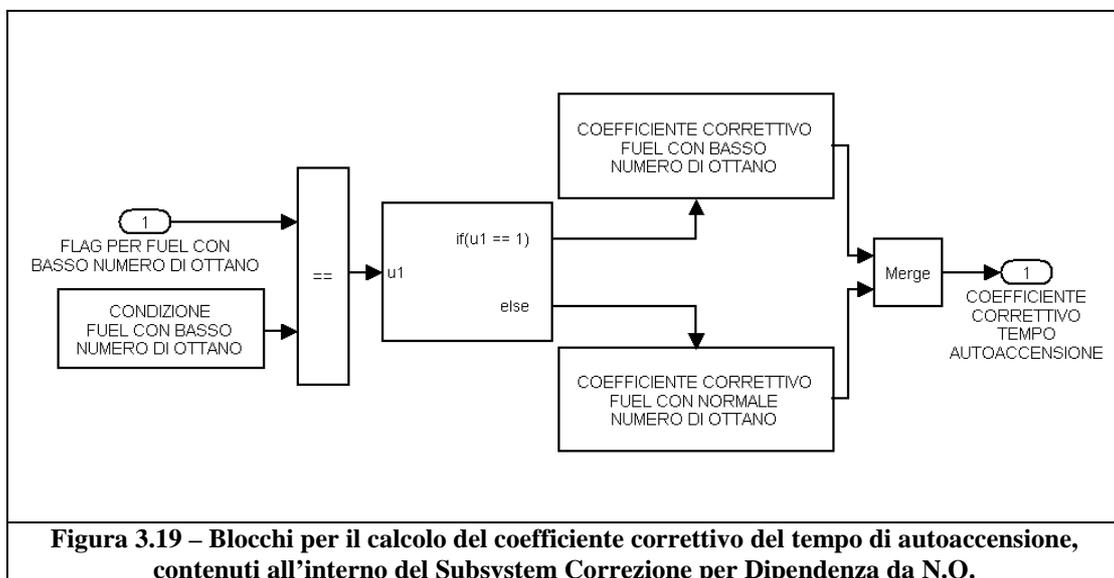
Durante lo studio della TEMPERATURA FINE FASE COMPRESSIONE, ai fini del ricercare alcune dipendenze per renderla più reale possibile, è risultata anche la possibile dipendenza dalla TEMPERATURA ARIA aspirata. In merito a ciò però non sono state eseguite ricerche o simulazione per il fatto che, in maniera approssimativa, la si può considerare come “già implementata”: innanzitutto della TEMPERATURA ARIA se ne tiene conto nel calcolo dell’ANTICIPO ATTUATO; inoltre anche nel calcolo della temperatura stessa, già la PRESSIONE A IVC implicitamente tiene conto della TEMPERATURA ARIA, questo perché se voglio avere una certa efficienza di aspirazione, con una temperatura dell’aria a 40 °C, si dovrà avere una certa pressione nel collettore di aspirazione, mentre se voglio arrivare allo stesso valore di efficienza di aspirazione con una temperatura dell’aria di 90 °C servirà una pressione nel collettore di aspirazione sicuramente più alta (avendo una densità dell’aria più bassa). Siccome poi della pressione nel collettore di aspirazione viene utilizzata per il calcolo della TEMPERATURA FINE FASE COMPRESSIONE, proprio per questo motivo si può ipotizzare che implicitamente ne teniamo già conto della TEMPERATURA ARIA.

È chiaro che la TEMPERATURA FINE FASE COMPRESSIONE è purtroppo non misurabile direttamente (almeno non facilmente) e bisogna anche precisare che, l’algoritmo che permette la stima di questa temperatura, presenta ancora qualche piccolo difetto; quindi le modifiche qui apportate sono state pensate ragionando sulle possibili dinamiche che possono presentarsi e non è stato possibile verificarle se non implicitamente nei risultati positivi dell’algoritmo.

Comunque, come descritto nel capitolo finale, un possibile scenario di sviluppo futuro riguarderà sicuramente l'evoluzione della catena di calcolo della stima di temperatura a fine fase compressione.

### 3.2.4.3 *Correzione per dipendenza da N.O.*

Per le motivazioni esposte nelle pagine precedenti, nel modello è stata tolta la dipendenza diretta del Numero di Ottano dalla relazione ed è stata inserita una parte di modello (Figura 3.19) che genera un COEFFICIENTE CORRETTIVO (differente in base al fatto che venga utilizzato un buon combustibile o un cattivo combustibile) il quale va a correggere il valore del TEMPO DI AUTOACCENSIONE in modo tale da ritrovare valori di quest'ultimo simili alla situazione precedente in cui si aveva la dipendenza diretta.



#### Caratterizzazione del correttore

Siccome il tipo di carburante considerato può essere solo di due tipo (good o bad fuel, come già descritto), conseguentemente i

COEFFICIENTI CORRETTIVI generati sono solo due. Per poter arrivare a generare questi correttori, è stato necessario scegliere due valori del Numero di Ottano da considerare come “rappresentativi” delle due qualità di combustibile:

- N.O. = 88 per un cattivo combustibile;
- N.O. = 93 per un buon combustibile.

Successivamente sono state eseguite delle simulazioni offline per arrivare a caratterizzare i COEFFICIENTI CORRETTIVI, ragionando in questo modo: sono stati calcolati prima i TEMPI DI AUTOACCENSIONE impostando i due valori di NO sopra descritti, e poi è stato calcolato il TEMPO DI AUTOACCENSIONE senza la dipendenza dal Numero di Ottano.

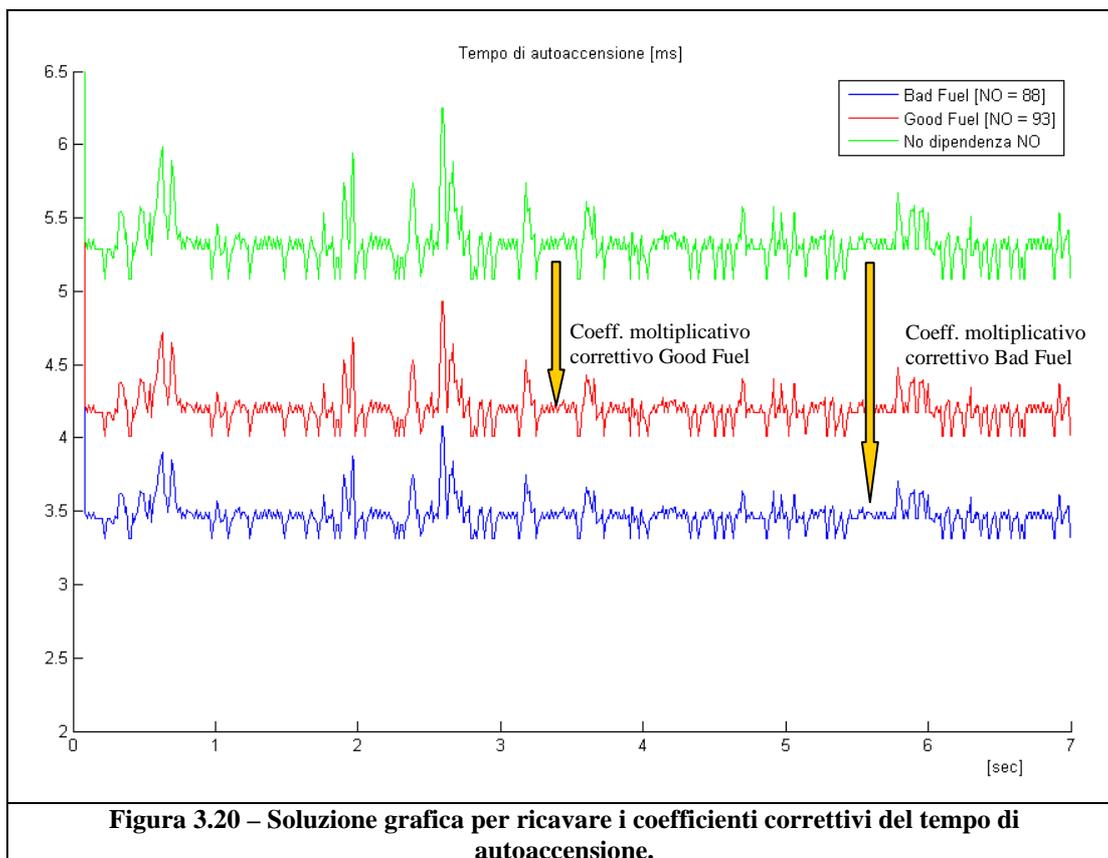
Questo COEFFICIENTE CORRETTIVO altro non è che un coefficiente moltiplicativo, che viene combinato con il TEMPO DI AUTOACCENSIONE calcolato senza dipendenza da NO per ritrovare i valori del suddetto tempo come se fosse presente la dipendenza.

$$Tempo\_Autoaccen_{CORRETTO} = Tempo\_Autoaccen_{SENZA\_DIPENDENZA} * Coeff\_Correttivo$$

Per ricavare il COEFFICIENTE CORRETTIVO è stato eseguito un semplice rapporto:

$$coefficiente\_correttivo = \frac{Tempo\_Autoaccensione_{CORRETTO}}{Tempo\_Autoaccensione_{SENZA\_DIPENDENZA}}$$

Graficamente:



**Figura 3.20 – Soluzione grafica per ricavare i coefficienti correttivi del tempo di autoaccensione.**

Per chiarire faccio un esempio considerando l'utilizzo di un Good Fuel (cosa analoga vale per il Bad Fuel): se nella relazione fosse ancora presente la dipendenza diretta da NO, con un Good Fuel (NO = 93), si avrebbe un tempo di autoaccensione con andamento come quello in figura (linea rossa); siccome non è presente la questa dipendenza diretta, l'andamento del tempo di autoaccensione che si ottiene (senza il correttore) è quella verde. Ecco dunque che il coefficiente correttivo, a cui si giunge come descritto nella pagina precedente, risulta essere un coefficiente moltiplicativo (minore di 1 in questo esempio) che riporta la curve verde ad avere valori uguali alla curva rossa.

Conseguentemente risulta che, se il carburante che viene utilizzato ha come Numero di Ottano uno di questo due valori di riferimento, allora il TEMPO DI AUTOACCENSIONE che viene calcolato risulterà corretto (cioè l'andamento verde viene portato ad avere gli stessi valori della curva rossa e blu, rispettivamente), altrimenti risulterà leggermente sovrastimato o sottostimato a seconda dei casi (se il NO effettivo risulta più grande di quello caratteristico di riferimento, allora il TEMPO DI AUTOACCENSIONE risulta sottostimato, viceversa se il NO effettivo risulta più piccolo, il TEMPO DI AUTOACCENSIONE risulta sovrastimato).

### *3.2.5 Confronto grandezze e strategia contatore*

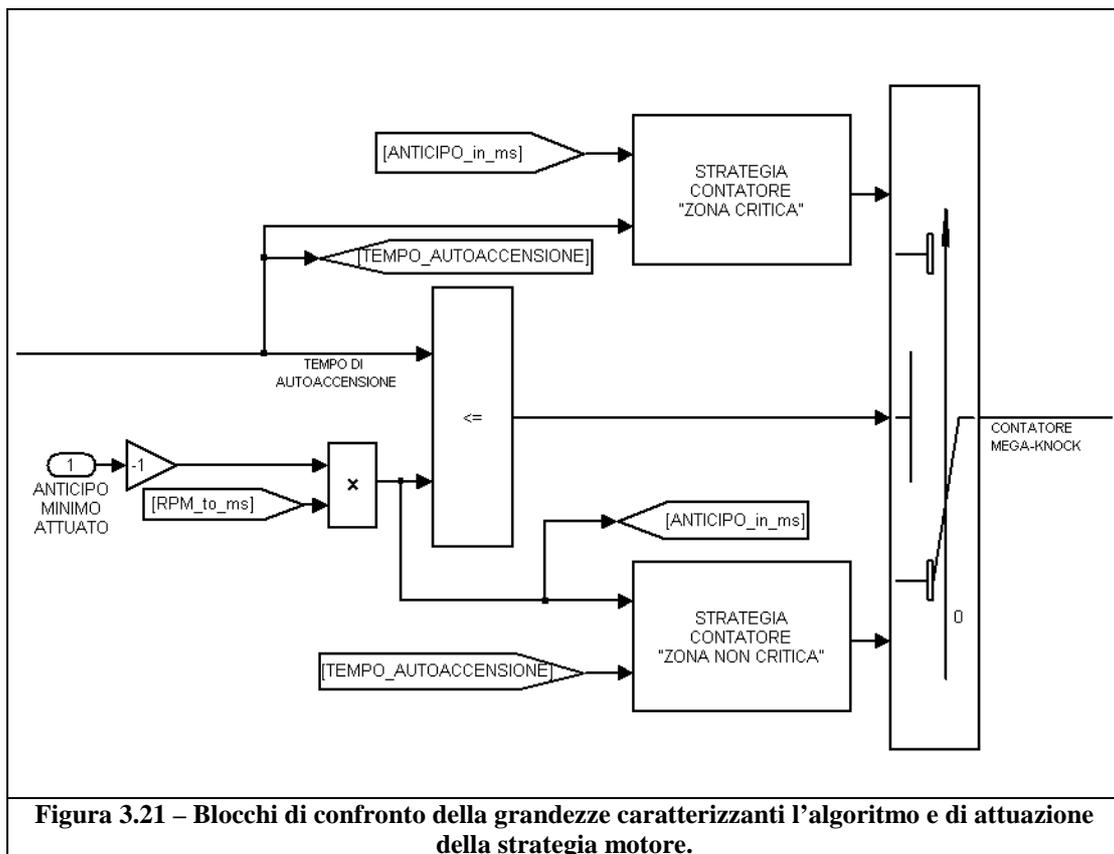
Si passa ora a descrivere i blocchi (Figura 3.21) che sostanzialmente “decidono” quando la strategia motore deve essere cambiata per prevenire la preaccensione. Il funzionamento dell'algoritmo si basa sul semplice confronto fra il TEMPO DI AUTOACCENSIONE e l'ANTICIPO MINIMO ATTUATO.

Si parte con la conversione dell'ANTICIPO MINIMO ATTUATO da base angolo a base tempo (ovvero da gradi di manovella, che rappresentano la distanza dal PMS, ai millisecondi corrispondenti tra PMS e istante di autoaccensione), in modo da avere la stessa grandezza espressa in millisecondi invece che in angolo di manovella e per poterla così confrontare con il TEMPO DI AUTOACCENSIONE che arriva al blocco di confronto già in millisecondi.

All'interno del blocco di confronto viene valutata una semplicissima condizione:

$$\text{TEMPO\_AUTOACCENSIONE} \leq \text{ANTICIPO\_MINIMO}$$

e a seconda del risultato del confronto, in uscita dal blocco ci sarà un segnale TRUE o FALSE che rappresenta la condizione abilitativa di uno switch che mette in moto tutta la strategia di prevenzione dal fenomeno della preaccensione basata sull'incremento o il decremento del CONTATORE MEGA-KNOCK che dà un'indicazione della vicinanza o meno dalla preaccensione stessa, andando poi ad attuare la strategia di prevenzione caratteristica del modello.



**Figura 3.21 – Blocchi di confronto delle grandezze caratterizzanti l’algoritmo e di attuazione della strategia motore.**

Lo switch che sposta il funzionamento del CONTATORE MEGA-KNOCK da una macrozona all'altra funziona nel seguente modo:

- quando dal blocco di confronto abbiamo un output TRUE, cioè il TEMPO DI AUTOACCENSIONE risulta più piccolo dell'ANTICIPO MINIMO (ricordando che per il particolare tipo di strategia di controllo motore abbiamo valori di anticipo degradati, quindi ci troviamo oltre il PMS), lo switch si sposta nella posizione in alto, in cui è attiva la strategia per la zona critica;
- quando dal blocco di confronto abbiamo un output FALSE, cioè il TEMPO DI AUTOACCENSIONE risulta più grande dell'ANTICIPO MINIMO, lo switch si sposta nella posizione in basso, in cui è attiva la strategia per la zona non critica.

Nella pagina successiva (Figura 3.22) è stato inserito lo schema generale di funzionamento, che raffigura la strategia nel suo complesso.

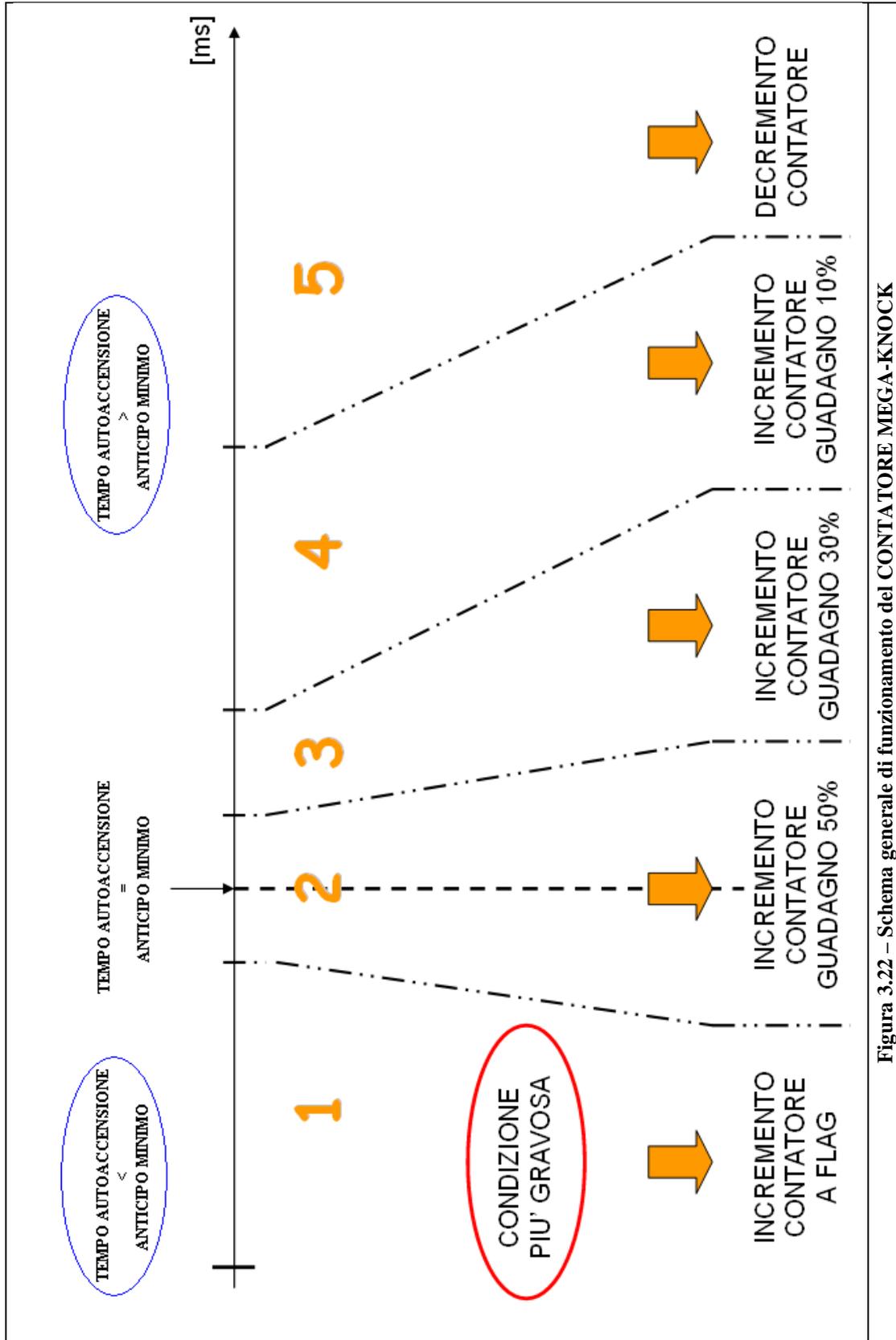


Figura 3.22 – Schema generale di funzionamento del CONTATORE MEGA-KNOCK

Le modalità di incremento e decremento del CONTATORE MEGA-KNOCK, divise in due subsystem, vengono descritte nei sottocapitoli successivi.

### 3.2.5.1 Strategia contatore “zona critica”

La strategia del contatore nella “zona critica” viene presa in considerazione quando la condizione abilitativa dello switch è TRUE, cioè quando la grandezza TEMPO DI AUTOACCENSIONE risulta essere inferiore all’ANTICIPO MINIMO ATTUATO, di conseguenza ci troviamo in una situazione in cui le condizioni di pressione e temperatura sono tali da essere a rischio imminente di preaccensione, proprio perché, per i calcoli eseguiti, si prevede che la miscela si autoaccenda prima dello scoccare della scintilla.

Di seguito viene invece riportata la composizione dei blocchi Simulink che realizzano la parte sinistra della strategia (Figura 3.23), relativa alla zona 1 e alla parte più a sinistra della zona 2 (vedi Figura 3.22).

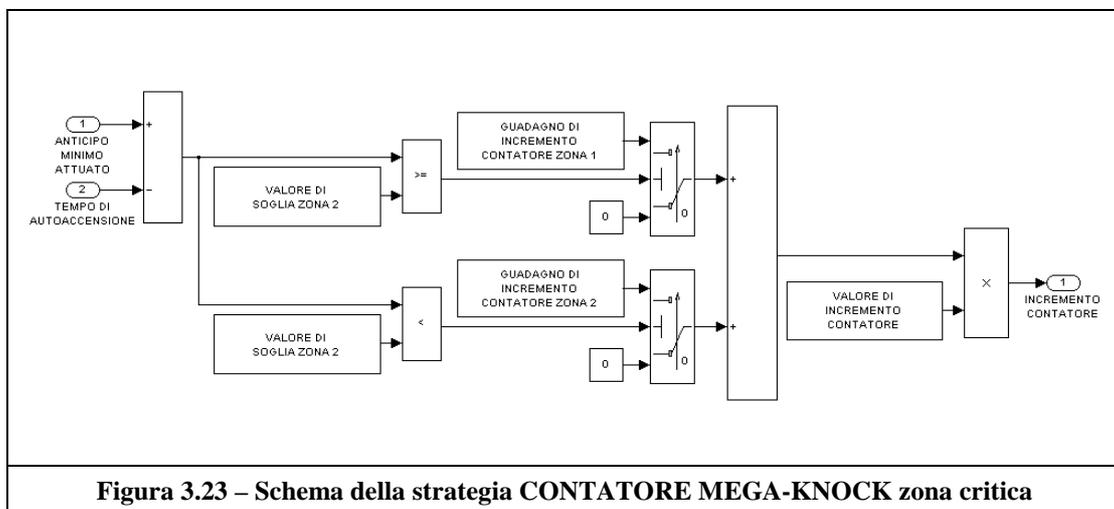


Figura 3.23 – Schema della strategia CONTATORE MEGA-KNOCK zona critica

In alto a sinistra si può notare il blocco che realizza la differenza fra le due grandezze che comanda i vari rami della strategia. Centralmente vi sono i blocchi che definiscono il VALORE SOGLIA e GUADAGNO delle varie zone e ogni ramo viene “eccitato” confrontando il valore della differenza con i valori di soglia calibrati: il risultato di questo confronto comanda lo switch che presenta, su un ramo il valore 0 (nel caso il ramo non sia “eccitato”), e sull’altro il blocco calibrato contenente GUADAGNO DI INCREMENTO relativo alla zona di interesse. I guadagni che entrano poi nel sommatore rappresentano le percentuali di incremento, le quali vengono post-moltiplicate per un valore calibrato (VALORE INCREMENTO COTATORE) che porta a definire il valore del CONTATORE MEGA-KNOCK.

All’interno di questo subsystem viene quindi fatta una vera e propria differenza fra il valore ANTICIPO MINIMO e TEMPO DI AUTOACCENSIONE per capire quanto siamo distanti dal confine limite in cui le due grandezze hanno lo stesso valore. In base a questa distanza, esiste un VALORE SOGLIA ZONA 2 che divide la parte sinistra della strategia in due zone:

- *Zona 1*, dove si è molto al di sotto del valore ANTICIPO MINIMO (quindi si è nelle condizioni più gravose di funzionamento), in cui al CONTATORE MEGA-KNOCK viene applicato un guadagno del 100% portandolo direttamente al valore massimo, condizione che attiva il FLAG MEGA-KNOCK istantaneamente;
- *Zona 2*, dove si è a ridosso del confine limite (più precisamente, oltre ad essere vicino al confine limite, siamo comunque nella

zona definita “critica”, ma tenendo conto di una certa inerzia delle reazioni di combustione, la zona può essere considerata “quasi-critica”), in cui al CONTATORE MEGA-KNOCK viene applicato un guadagno del 50%. Quindi succede che, se per due cicli consecutivi ci si ritrova all’interno di questa zona (precisando che il valore del CONTATORE MEGA-KNOCK al ciclo attuale viene sempre sommato a quello relativo al ciclo precedente), si arriva alla soglia massima a disposizione, condizione che attiva il FLAG MEGA-KNOCK.

### *3.2.5.2 Strategia contatore “zona non critica”*

La strategia del contatore nella “zona non critica” viene presa in considerazione, invece, quando la condizione abilitativa dello switch è FALSE, cioè quando la grandezza TEMPO DI AUTOACCENSIONE risulta essere superiore all’ANTICIPO MINIMO ATTUATO, di conseguenza ci troviamo in una situazione in cui le condizioni di pressione e temperatura non sono tali da essere a rischio di preaccensione.

Di seguito viene riportata la composizione dei blocchi Simulink che realizzano la parte sinistra della strategia (Figura 3.24), relativa alla parte destra della zona 2 e alle zone 3, 4, 5 (vedi Figura 3.22).

Anche qui, in alto a sinistra, c’è il blocco che realizza la differenza fra le due grandezze che comanda poi i vari rami della strategia. Centralmente vi sono sempre i blocchi che definiscono il VALORE SOGLIA e GUADAGNO delle varie zone e ogni ramo viene “eccitato” sempre confrontando il valore della differenza con i valori di

soglia calibrati. I guadagni che entrano poi nel sommatore rappresentano le percentuali di incremento, le quali vengono post-moltiplicate per un valore calibrato (VALORE INCREMENTO CONTATORE) che porta a definire il valore del CONTATORE MEGA-KNOCK in fase incrementale.

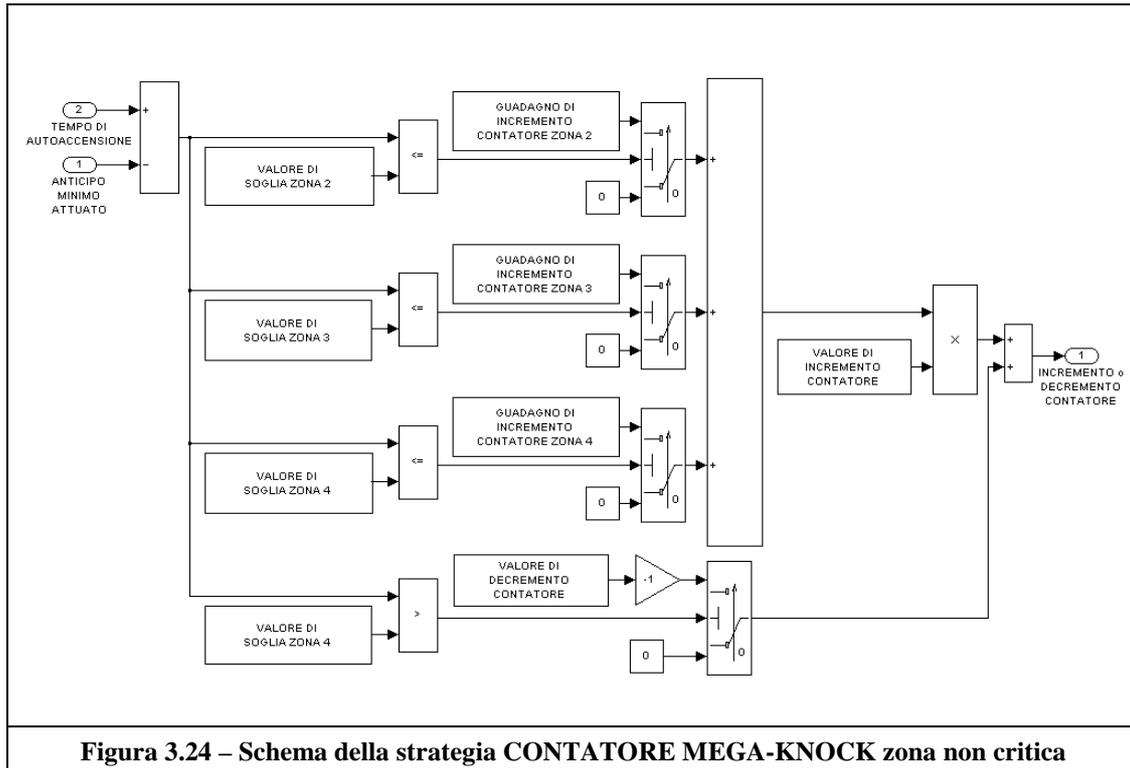


Figura 3.24 – Schema della strategia CONTATORE MEGA-KNOCK zona non critica

Infine in basso vi è un quarto ramo (solo in questa parte di strategia), sempre comandato dalla differenza fra le due grandezze, e riproduce la zona di strategia in cui il contatore viene decrementato perché molto lontani dalle condizioni critiche.

Anche all'interno di questo subsystem viene fatta una vera e propria differenza fra il valore TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO per capire quanto siamo distanti dal confine limite in cui le due grandezze hanno lo stesso valore. In base a questa distanza,

in questo caso esistono tre VALORE SOGLIA ZONA 2, 3, 4 che dividono la parte destra della strategia in quattro zone:

- *Zona 2*, dove si è a ridosso del confine limite, in cui al CONTATORE MEGA-KNOCK viene applicato un guadagno del 50%;
- *Zona 3*, dove si è leggermente più distanti dal confine limite, in cui al CONTATORE MEGA-KNOCK viene applicato un guadagno del 30%;
- *Zona 4*, dove si è sempre più distanti dal confine limite, in cui al CONTATORE MEGA-KNOCK viene applicato un guadagno del 10%;
- *Zona 5*, dove si è ampiamente distanti dal confine limite e quindi in una situazione molto sicura, in cui al CONTATORE MEGA-KNOCK viene applicato direttamente il VALORE DECREMENTO CONTATORE.

Un esempio di quello che succede durante il funzionamento, per capire meglio come ragiona l'algoritmo nella parte del CONTATORE MEGA-KNOCK è spiegato nelle prossime pagine.

Se, per esempio, il valore derivante dalla differenza fra le grandezze fondamentali dovesse ricadere nella Zona 2, quindi al di sotto del VALORE SOGLIA ZONA 2, quello che succede è che i primi tre blocchi di confronto sono verificati (in quanto passando dalla Zona 2 alla Zona 4 il VALORE SOGLIA aumenta) e di conseguenza abbiamo tre segnali abilitativi che commutano i relativi switch e permettono il passaggio del GUADAGNO DI INCREMENTO relativo alla zona di riferimento. Questi guadagni vengono addizionati nel sommatore e

vanno a rappresentare il **GUADAGNO DI INCREMENTO** relativo all'attuale condizione motore di funzionamento, il quale verrà poi moltiplicato per il **VALORE DI INCREMENTO** generando il segnale del **CONTATORE** in fase incrementale (Figura 3.25).

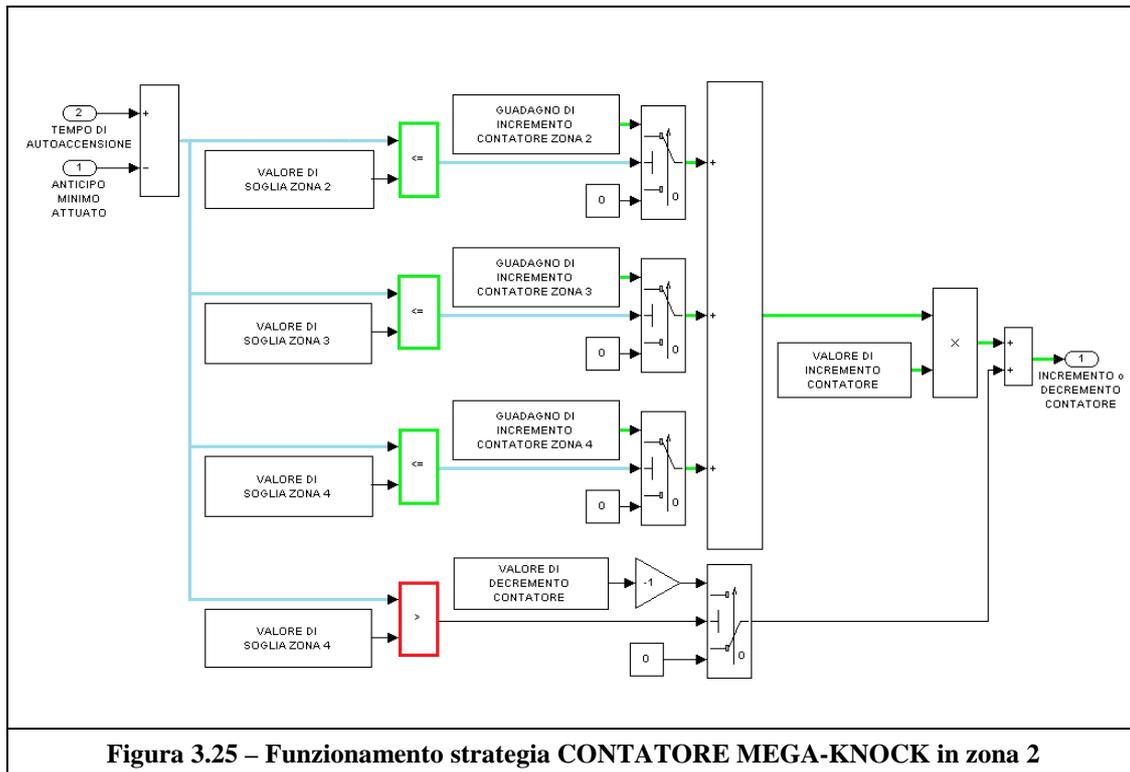


Figura 3.25 – Funzionamento strategia CONTATORE MEGA-KNOCK in zona 2

Se invece, il valore derivante dalla differenza fra le grandezze fondamentali dovesse ricadere nella Zona 4, quindi al di sotto del **VALORE SOGLIA ZONA 4**, quello che succede è che i primi due blocchi di confronto non sono verificati (così come l'ultimo blocco che riguarda la sola parte di decremento) ma solo il terzo risulta verificato, di conseguenza il solo segnale che giunge al sommatore è quello relativo al **GUADAGNO DI INCREMENTO ZONA 4**. Analogamente al caso precedente, questo guadagno verrà moltiplicato per il **VALORE DI INCREMENTO CONTATORE** generando il segnale del **CONTATORE**

in fase incrementale (Figura 3.26) in quest'altra condizione di funzionamento.

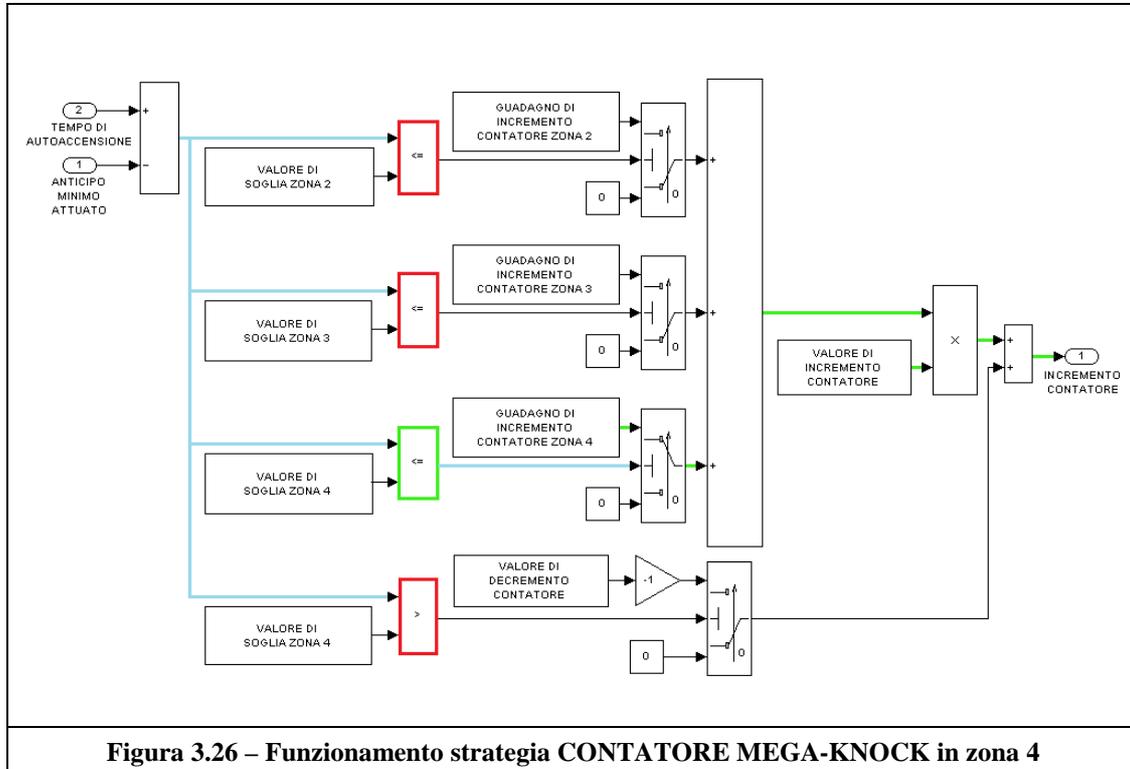
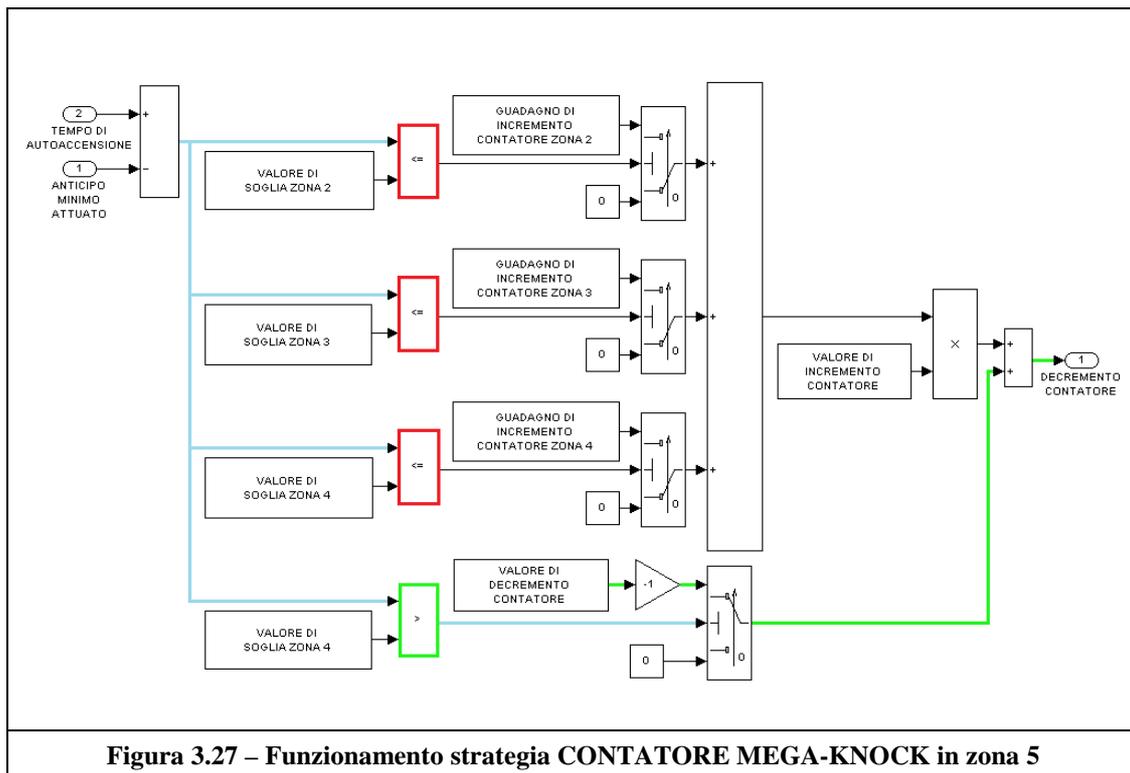


Figura 3.26 – Funzionamento strategia CONTATORE MEGA-KNOCK in zona 4

L'ultimo caso esposto, è quello relativo ad una differenza fra le grandezze fondamentali che ricade in Zona 5, quindi oltre il VALORE SOGLIA ZONA 4: in questo caso i primi tre blocchi di confronto non sono verificati mentre l'ultimo sì, di conseguenza viene commutato il solo switch relativo alla zona di decremento che permette il passaggio del VALORE DI DECREMENTO CONTATORE, che rappresenta già il valore di cui verrà decrementato il CONTATORE MEGA-KNOCK (Figura 3.27).



**Figura 3.27 – Funzionamento strategia CONTATORE MEGA-KNOCK in zona 5**

### 3.2.6 Contatore e flag di Mega-Knock

La parte finale dell’algoritmo di prevenzione è composta (nel ramo superiore) da un sommatore per legare il valore del CONTATORE MEGA-KNOCK del ciclo attuale a quello del ciclo precedente, seguito da elementi che caratterizzano il range di variabilità del contatore (dal valore 0 al VALORE SUPERIORE DI SATURAZIONE).

Il segnale del contatore al ciclo attuale viene addizionato a quello risultante dal ciclo precedente perché comunque alcune dinamiche in camera di combustione sono legate a quello che è avvenuto al ciclo precedente (vedi la temperatura) così il CONTATORE ricalca questa situazione.

Nella pratica quello che succede è che, se ci troviamo per esempio nella Zona 2 al primo ciclo, il contatore verrà incrementato del 90% se

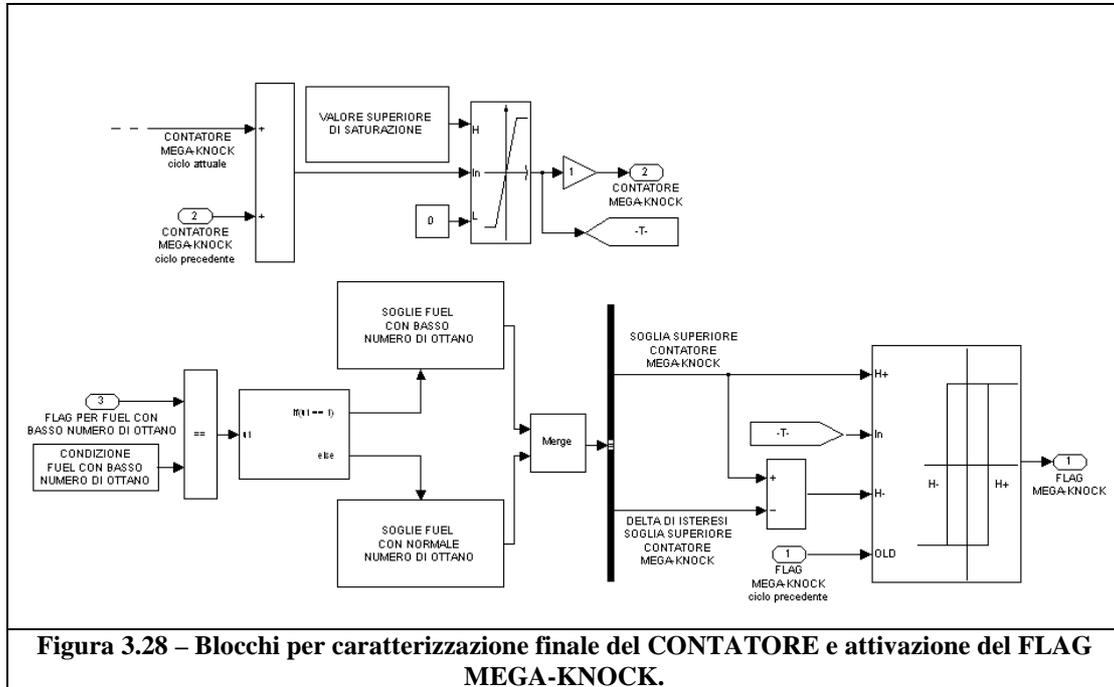
al secondo ciclo la differenza fra le due grandezze è tale da ricadere ancora in Zona 2, allora il contatore verrà incrementato di un altro 90% arrivando a superare la soglia utile per far scattare il FLAG MEGA-KNOCK, andando ad azionare la strategia di prevenzione. Ovviamente in questo caso la strategia viene attivata anche se non siamo in presenza del fenomeno indesiderato di preaccensione ma, trovandoci per due cicli consecutivi nelle vicinanze della zona limite, avviene, diciamo, per stare dalla parte del sicuro e riportare le condizioni all'interno della camera di combustione a livelli tali da garantire un tempo di ritardo di accensione del combustibile più elevato e allontanarci dalla possibilità di avere preaccensione.

Se invece durante il primo ciclo, la differenza è tale da ricadere nella Zona 3, per esempio, allora il livello del CONTATORE sarà arrivato all'40%; se al ciclo successivo siamo ancora in Zona 3 o addirittura in Zona 4, il CONTATORE verrà incrementato di un altro 40% o 10% rispettivamente (valore non sufficiente per far scattare il FLAG) e quindi risulta necessario un altro ciclo che ricada nella zona di incremento per avere l'attivazione della strategia.

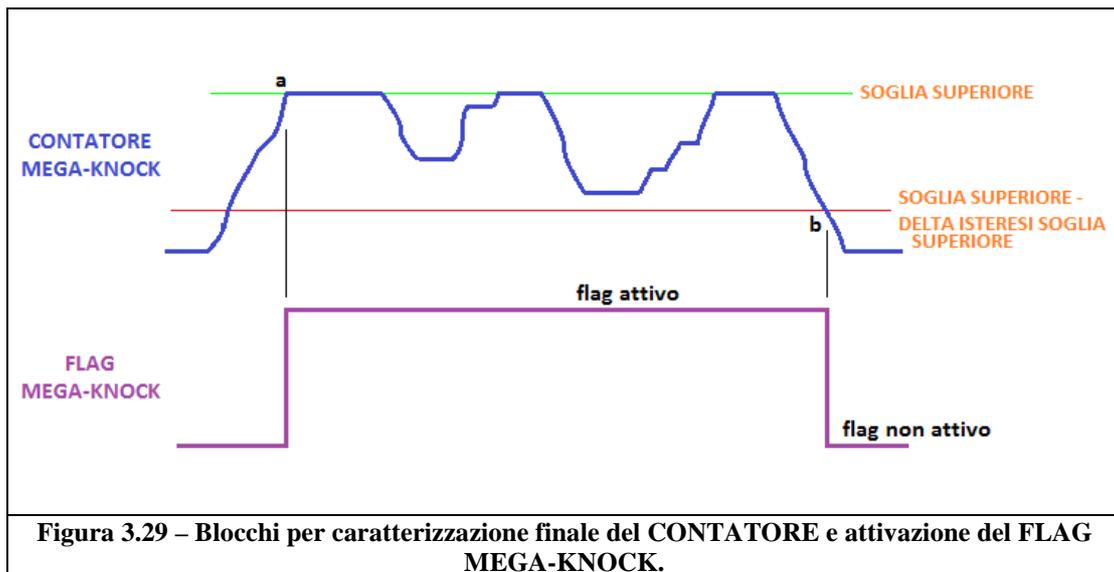
Viceversa, se per qualche motivo, i cicli successivi sono tali per cui la differenza ricade in Zona 5, quindi molto lontani dal limite critico, allora il CONTATORE viene decrementato di una quantità predefinita.

Per quello che riguarda il ramo inferiore, nella parte di sinistra (vedi Figura 3.28), a seconda che si verifichi o no la CONDIZIONE FUEL CON BASSO N.O., vengono definite la SOGLIA SUPERIORE e il DELTA DI ISTERESI SOGLIA SUPERIORE del contatore per l'attivazione e la disattivazione del FLAG MEGA-KNOCK in riferimento alle due tipologie di combustibile, cioè considerando il fatto

che si utilizzi un buon combustibile o un cattivo combustibile con basso Numero di Ottano.



L'attivazione e la disattivazione del FLAG MEGA-KNOCK (Figura 3.29) funziona in questo modo:



la sua attivazione e disattivazione viene comandata dall'andamento del CONTATORE MEGA-KNOCK; vengono definite appunto la SOGLIA SUPERIORE e il DELTA DI ISTERESI SOGLIA SUPERIORE, che sono i due valori di soglia che determinano gli istanti nei quali si attiva e si disattiva il FLAG.

Più precisamente, durante la fase di incremento del CONTATORE MEGA-KNOCK, il FLAG risulta non attivo fintanto che il valore del CONTATORE non raggiunge il valore di SOGLIA SUPERIORE (punto a).

Nella fase di decremento del CONTATORE MEGA-KNOCK, il FLAG risulta attivo fintanto che il valore del CONTATORE non scende al di sotto di un valore pari a

$SOGLIA\ SUPERIORE - DELTA\ ISTERESI\ SOGLIA\ SUPERIORE$   
passato questo valore il FLAG si disattiva istantaneamente (punto b). Quindi risulta chiaro che, in fase di decremento del CONTATORE, una opportuna calibrazione del DELTA DI ISTERESI SOGLIA SUPERIORE renderà la strategia più o meno robusta.

Con la descrizione contenuta in quest'ultimo paragrafo si può ritenere completa la descrizione dell'algoritmo di previsione sviluppato in linguaggio Simulink e si può procedere con l'analisi della acquisizioni e delle simulazioni.

# Capitolo 4

## ***Calibrazione del modello e simulazioni***

La parte conclusiva dell'attività di tesi è stata impiegata per la verifica del corretto funzionamento dell'algoritmo e per la ricerca di risultati migliori rispetto all'algoritmo che attualmente è presente in centralina.

Tutti i test di cui si discuterà in seguito sono stati effettuati utilizzando un motore ad accensione comandata 0.9L. Maggiori specifiche si possono trovare nella Tabella 4.1.

|                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| CILINDRATA               | 875 cm <sup>3</sup> |
| NUMERO DI CILINDRI       | 2, in linea         |
| NUMERO DI VALVOLE        | 8                   |
| CORSA                    | 86 mm               |
| ALESAGGIO                | 80.5 mm             |
| RAPPORTO DI COMPRESSIONE | 10:1                |
| SISTEMA DI INIEZIONE     | MULTI-POINT, PFI    |
| POTENZA MASSIMA          | 105 CV a 5500 rpm   |
| COPIA MASSIMA            | 145 Nm a 2250 rpm   |
| E.C.U                    | Magneti Marelli     |
| ALIMENTAZIONE            | Benzina             |

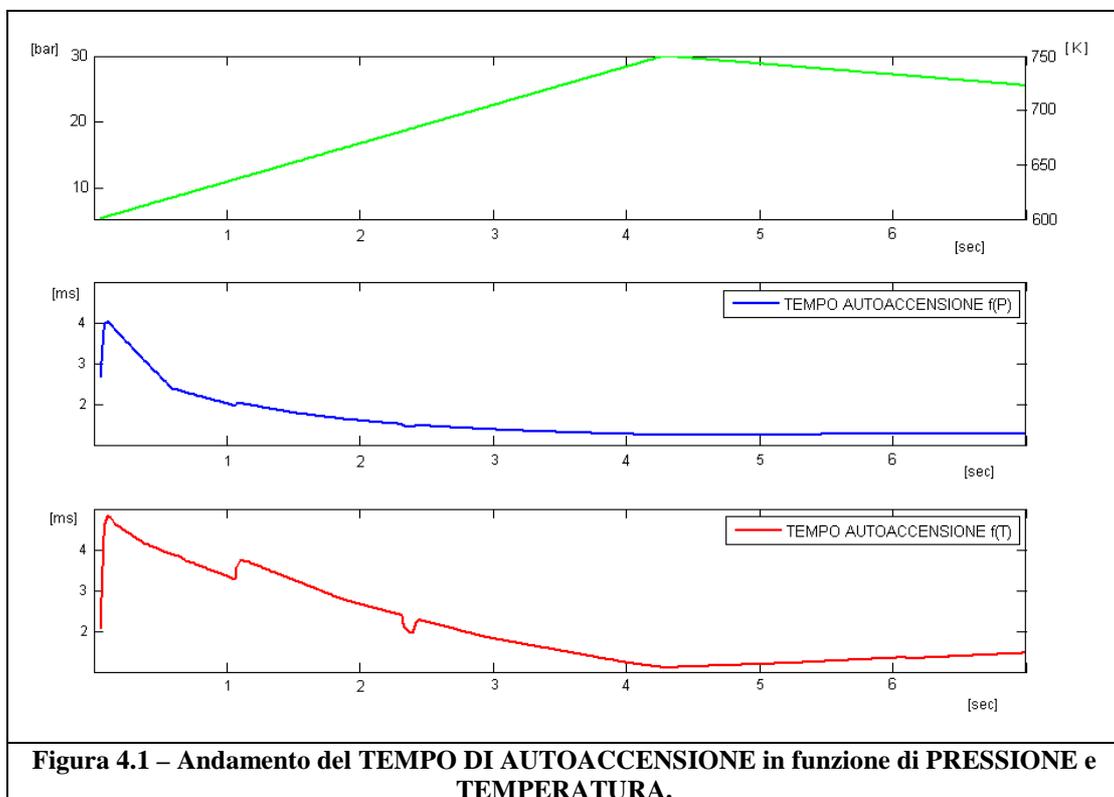
**Tabella 4.1 – Specifiche motore 0.9L**

### 4.1 Caratterizzazione Tempo di Autoaccensione

In questa prima fase si è voluto verificare il corretto funzionamento dell’algoritmo in termini di correttezza dei calcoli e che l’andamento dei vari parametri rispecchi le aspettative iniziali.

Per queste prime verifiche non è stato fondamentale avere a disposizione acquisizioni mirate, ma sono state utilizzate acquisizioni che il modello già utilizza per verificare il funzionamento di altre parti dello stesso.

Più precisamente sono state eseguite simulazioni off-line per verificare il corretto calcolo del TEMPO DI AUTOACCENSIONE soprattutto in relazione alla variazione di TEMPERATURA e PRESSIONE FINE FASE COMPRESSIONE, che rappresentano le grandezze dalle quali è caratterizzata.



Nei grafici in figura 4.1, è evidenziato il risultato riassuntivo di queste prime simulazioni: nel grafico in alto è rappresentato l'andamento di una possibile "grandezza tipo" in ingresso: per testare il corretto calcolo da parte dell'algoritmo del TEMPO DI AUTOACCENSIONE, una prima volta, tale andamento in verde, è stato assegnato alla pressione e una seconda volta alla temperatura, rispettivamente caratterizzato con opportuni valori; al centro vi è l'andamento risultante del Tempo di Autoaccensione in funzione della sola Pressione (ipotizzando costante la Temperatura); mentre in basso l'andamento sempre del Tempo di Autoaccensione in funzione della sola Temperatura (ipotizzando costante la Pressione). In entrambi i casi è stato possibile verificare il corretto risultato del tempo di autoaccensione (confrontandolo con calcoli eseguiti a mano) e si può notare un andamento inversamente proporzionale con l'andamento di pressione e temperatura: dalla teoria si sa che all'aumentare di pressione e temperatura il tempo di ritardo all'accensione tende a diminuire e questo è quanto è stato verificato, quindi sotto questo aspetto l'algoritmo procede bene.

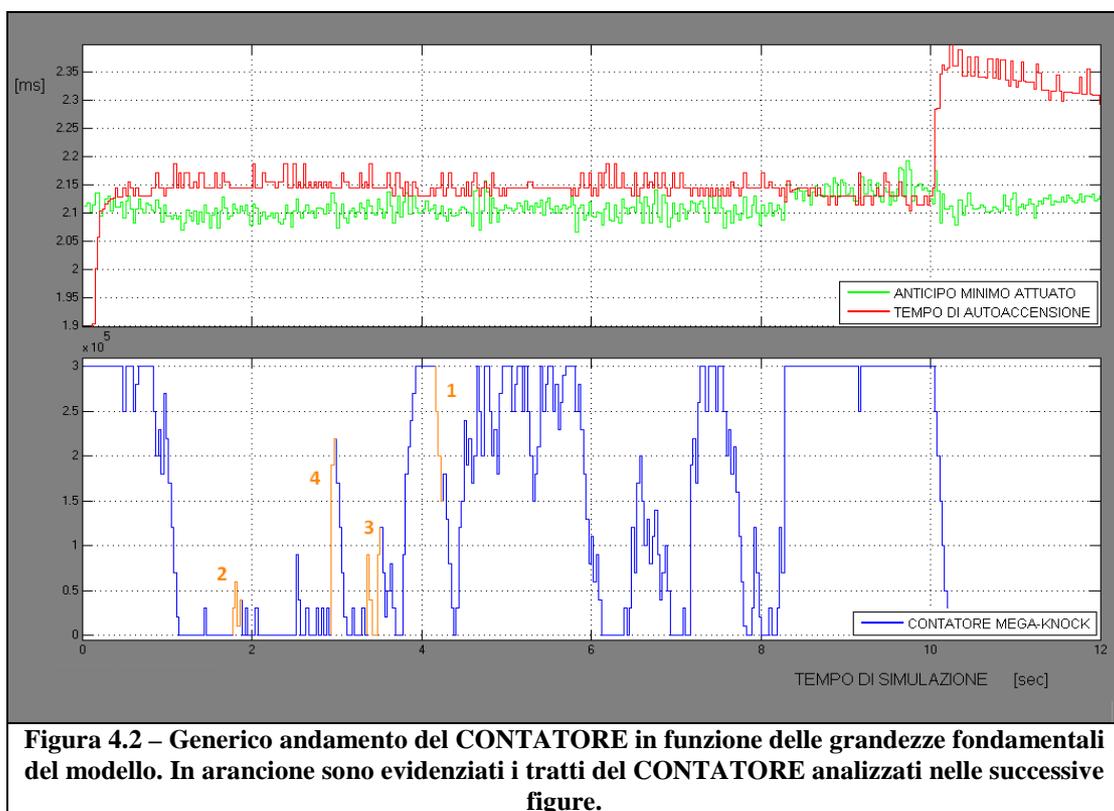
Diciamo che come verifica può ritenersi banale e scontata, ma comunque è servita per verificare che la parte di algoritmo in cui è implementata la relazione empirica è stata costruita senza errori.

## *4.2 Validazione del Contatore Mega-Knock*

Nella seconda parte si è presentata l'esigenza di verificare il corretto funzionamento della strategia del CONTATORE MEGA-KNOCK in riferimento alla distanza fra il TEMPO DI AUTOACCENSIONE e l'ANTICIPO MINIMO.

In figura 4.2 vi è una generica rappresentazione del CONTATORE MEGA-KNOCK in funzione dell'andamento delle grandezze fondamentali di riferimento.

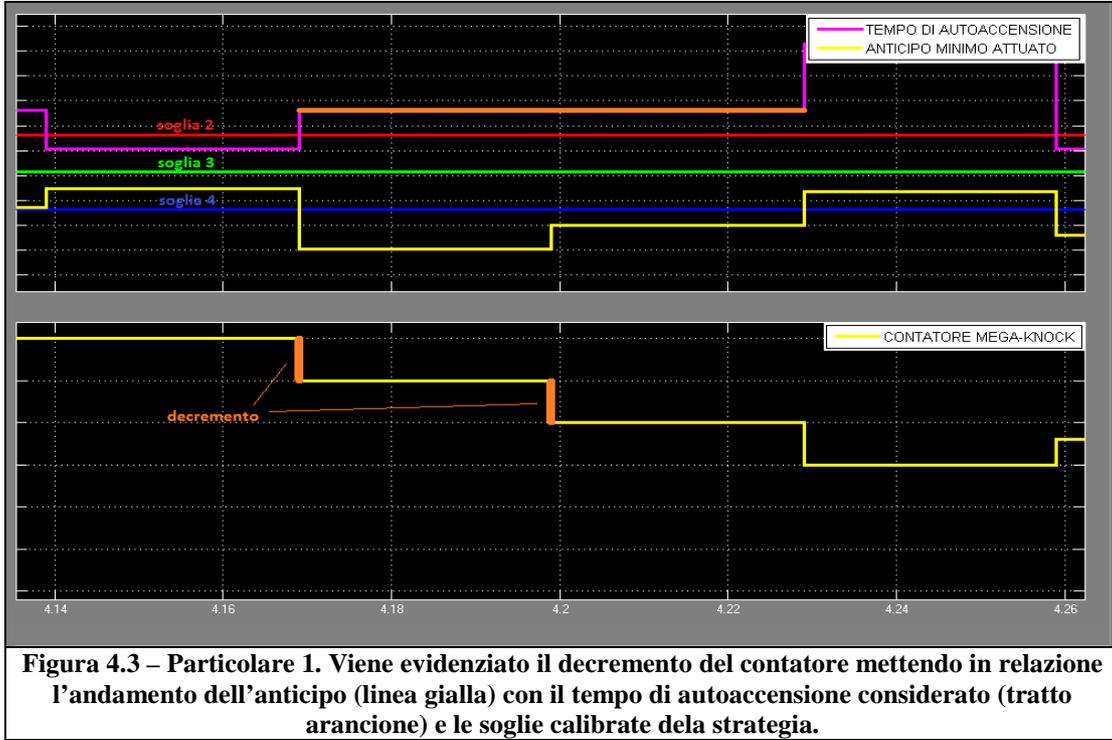
Eseguendo degli ingrandimenti (da figura 4.3 a figura 4.7) è stato possibile verificare il corretto funzionamento del CONTATORE stesso, aggiungendo nel grafico le SOGLIE della strategia di incremento e decremento.



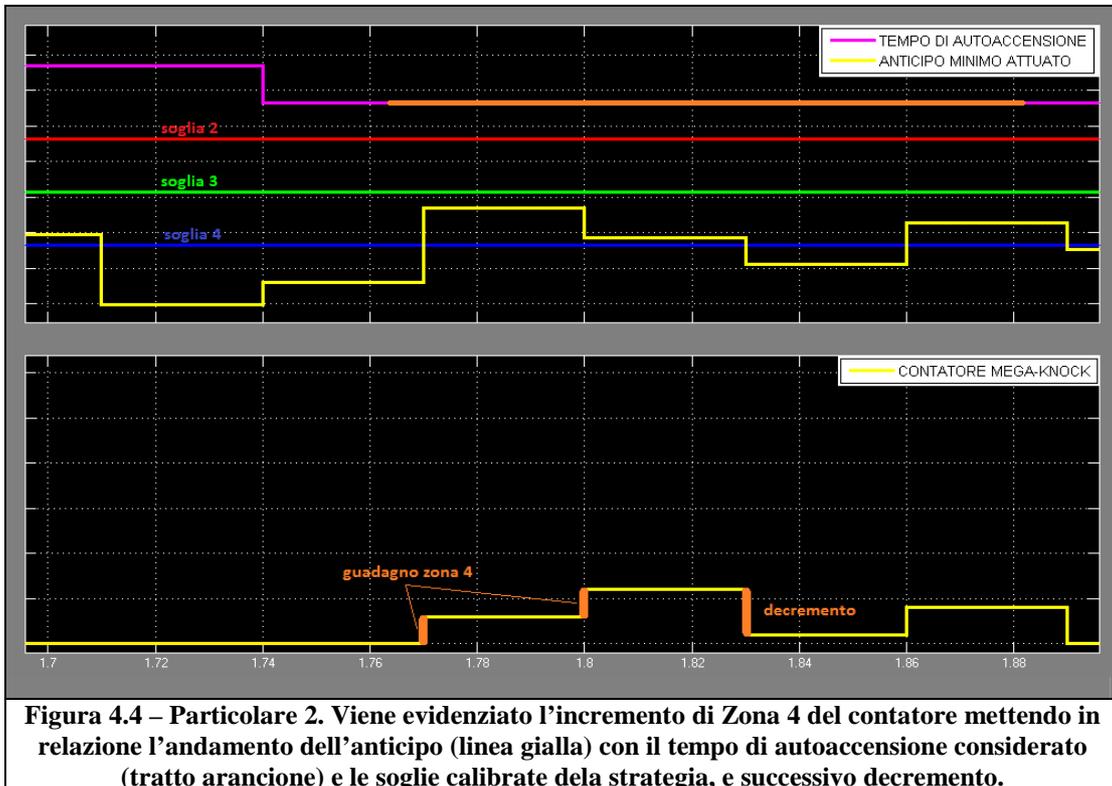
In figura 4.3, in relazione al tratto di TEMPO DI AUTOACCENSIONE evidenziato in arancione (tra  $t = 4.17$  e  $t = 4.23$  ms), si può notare che l'ANTICIPO MINIMO ATTUATO ricade oltre la SOGLIA 4 (linea blu), quindi ci si ritrova nella Zona 5 della strategia (vedi figura 3.19) in cui il contatore viene decrementato,

In figura 4.4, sempre in relazione al tratto evidenziato in arancione, l'ANTICIPO ricade prima fra le SOGLIE 3 e 4, quindi nella

Zona 4 (vedi sempre figura 3.19) dove il contatore viene incrementato col relativo GUADAGNO di zona, e poi si sposta ancora oltre la SOGLIA 4 e quindi si apprezza ancora il decremento del contatore.

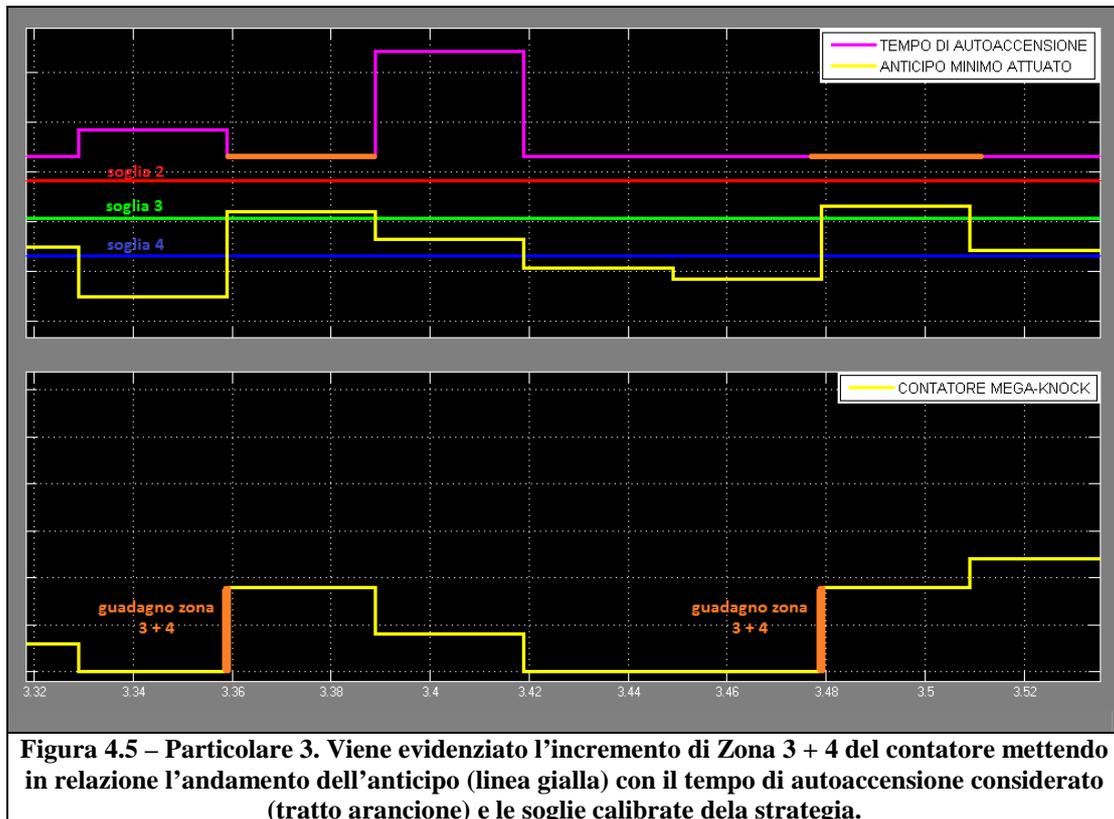


**Figura 4.3 – Particolare 1. Viene evidenziato il decremento del contatore mettendo in relazione l’andamento dell’anticipo (linea gialla) con il tempo di autoaccensione considerato (tratto arancione) e le soglie calibrate della strategia.**



**Figura 4.4 – Particolare 2. Viene evidenziato l’incremento di Zona 4 del contatore mettendo in relazione l’andamento dell’anticipo (linea gialla) con il tempo di autoaccensione considerato (tratto arancione) e le soglie calibrate della strategia, e successivo decremento.**

In figura 4.5 l'ANTICIPO, rispetto al tratto considerato, ricade prima fra le SOGLIE 2 e 3, quindi nella Zona 3 (vedi figura 3.19) dove il contatore viene incrementato col relativo GUADAGNO di zona sommato a quello della Zona 4.

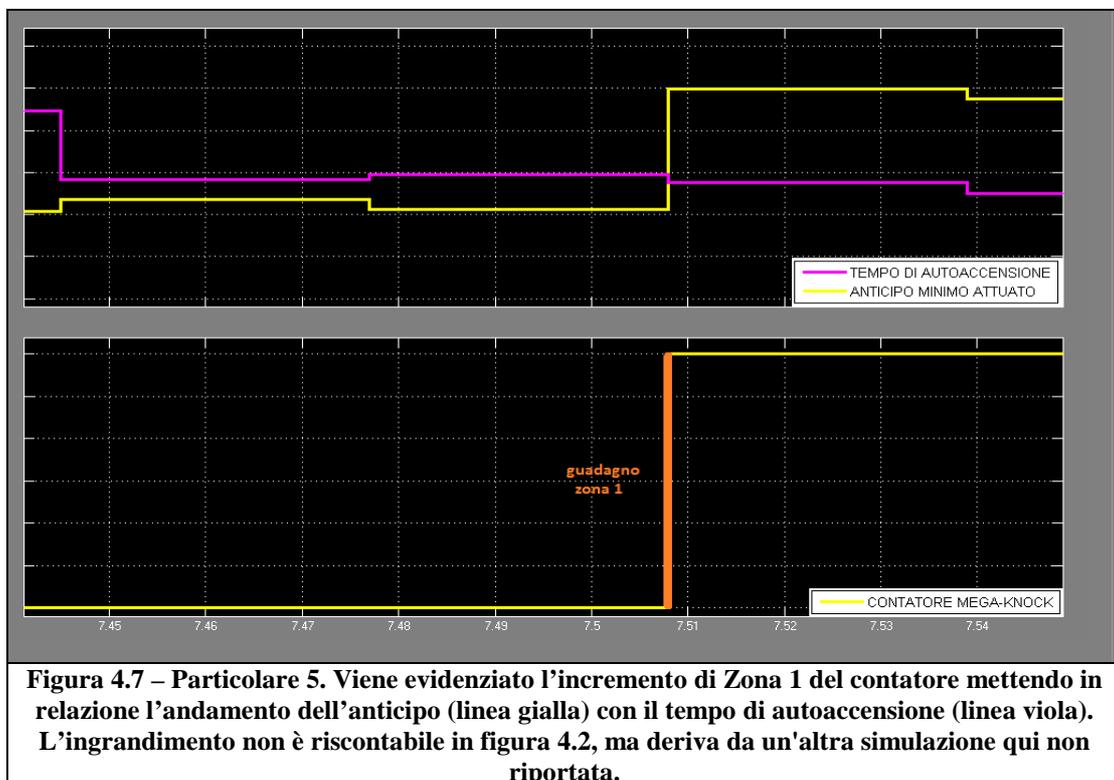
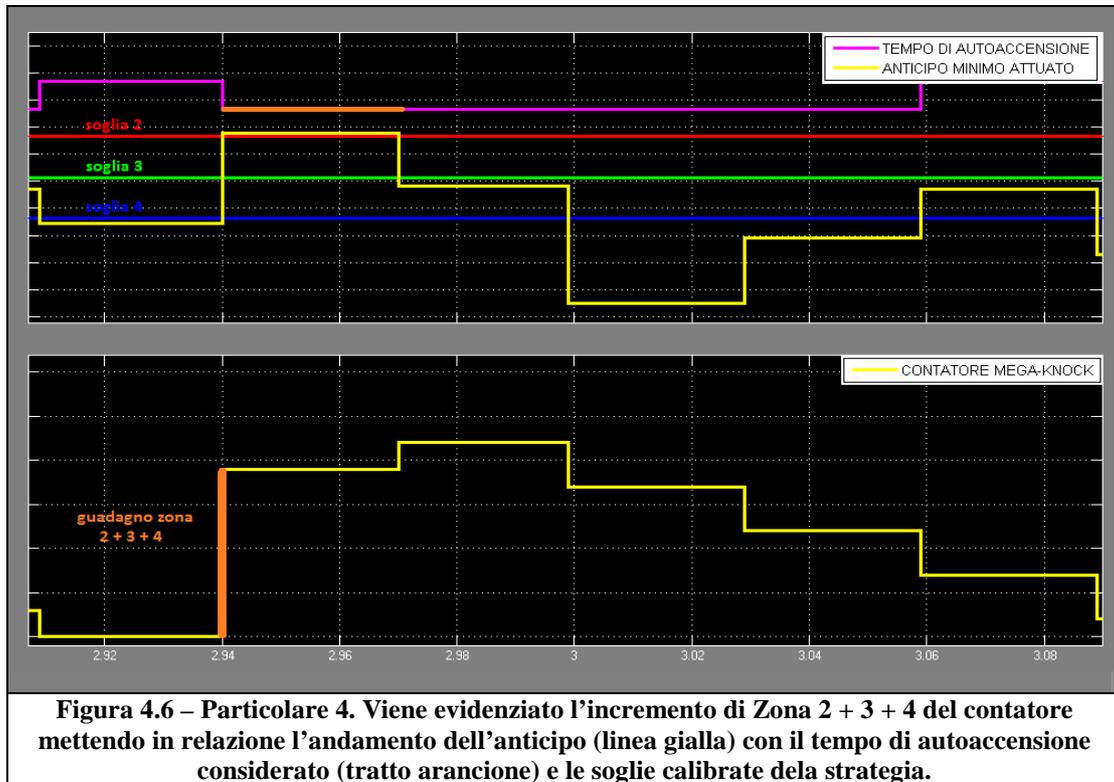


**Figura 4.5 – Particolare 3. Viene evidenziato l'incremento di Zona 3 + 4 del contatore mettendo in relazione l'andamento dell'anticipo (linea gialla) con il tempo di autoaccensione considerato (tratto arancione) e le soglie calibrate della strategia.**

In figura 4.6, l'ANTICIPO ricade sopra la SOGLIA 2, quindi nella Zona 2 di destra (vedi figura 3.19) dove il contatore viene incrementato col relativo GUADAGNO di zona, sommandolo sempre a quelli della Zona 3 e 4 (non si riesce ad apprezzare bene la posizione reciproca, ma comunque l'anticipo è di poco sopra il valore di soglia).

In figura 4.7, non sono presenti le soglie, in quanto qui si apprezza il fatto che quando il TEMPO DI AUTOACCENSIONE si trova al di sotto dell'ANTICIPO, si ricade nella Zona 1 (vedi figura 3.19), quella più critica dove il GUADAGNO di zona porta il

CONTATORE direttamente al valore massimo, valore che attiva il FLAG e conseguentemente la strategia di prevenzione.



### *4.3 Calibrazione coefficienti della relazione empirica*

In questa terza fase si è ricercato il set ottimale di valori dei coefficienti della relazione empirica che meglio si prestasse per l'applicazione qui trattata.

Per rendere possibile questo tipo di attività, sono state utilizzate acquisizioni mirate al raggiungimento della preaccensione, eseguite al banco motore, con le seguenti modalità:

- numero di giri motore basso e costante;
- miscela magra;
- anticipo degradato;
- pieno carico.

Con queste modalità di funzionamento si è arrivati a registrare quattro preaccensioni: grazie all'utilizzo di un indice, il KNOCK PEAK (vedi 4.4), associato agli andamenti di pressione in camera, è stato possibile “verificare” l'insorgenza della preaccensione, rispettivamente una per prova (Tabella 4.2). Purtroppo, per motivi legati ad una nuova strumentazione, non è stato possibile ricevere gli andamenti della pressione in camera per tali combustioni e quindi analizzarli; resta il fatto che il KNOCK PEAK viene ricavato a partire proprio dalle tracce di pressione, quindi, basandomi su alcune considerazioni (vedi 4.4), mi è stato comunque possibile utilizzarlo anche come indice di preaccensione.

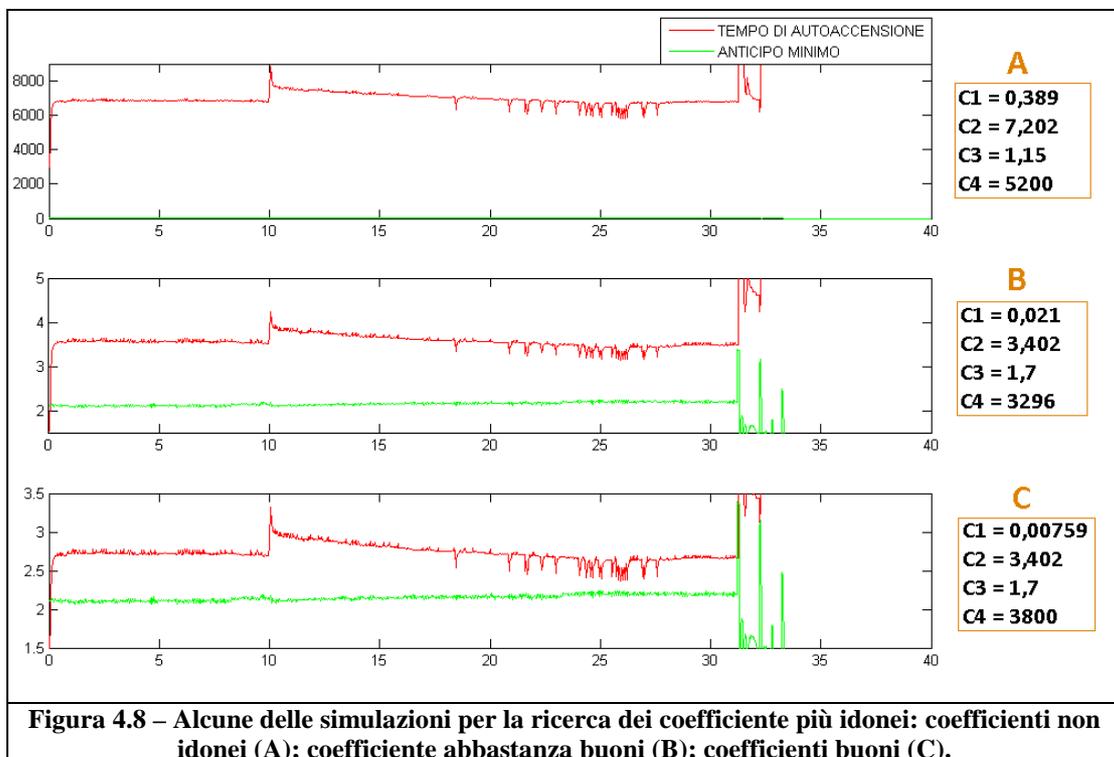
Di seguito è riportato come sono state impiegate per la calibrazione dei coefficienti.

| NOME PROVA |
|------------|
| mk_1_2000  |
| mk_2_2000  |
| mk_3_2000  |
| mk_4_2000  |

Tabella 4. 2 – Acquisizioni analizzate in condizioni di preaccensione.

Per la determinazione del set ottimale di coefficienti mi sono mosso in questo modo: partendo dalla tabella con tutte le costanti presente nel capitolo 2 (tabella 2.1), ho realizzato un piano di simulazione che comprendesse tutti quei coefficienti e tutte le possibili combinazioni degli stessi.

Da questo articolato piano di simulazioni, analizzando attentamente i risultati (di cui alcuni in figura 4.8), sono riuscito a convalidare una cerchia ristretta di coefficienti, tralasciando quelli che



restituivano un risultato non accettabile: come si può notare dai 3 grafici in figura 4.8, il primo set di coefficienti (A) determina valori del tempo di autoaccensione completamente fuori scala (oltre i 6000 ms); il secondo set di coefficienti (B) determina valori che, volendo, possono essere già considerati come buoni; il terzo set di coefficienti (C) determina valori che risultano ancora più adeguati all'applicazione, cioè “compatibili” con i valori dell'anticipo.

In questo modo da 13 diversi coefficiente riscontrati nella ricerca preliminare, ne ho ristretto il numero a solo 7 valori. Dopo questa prima scrematura, basandomi poi solo su un paio di acquisizioni, ho ristretto ulteriormente il numero arrivando a definire un valore definitivo per quello che riguarda i coefficienti  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ .

| $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|-------|-------|-------|
| 3,402 | 1,7   | 3800  |

Per chiarire,  $C_2$  non compare esplicitamente nell'algoritmo, ma è stato utilizzato durante la caratterizzazione dei COEFFICIENTI CORRETTIVI in caso di utilizzo di un good o bad fuel.  $C_3$  e  $C_4$  sono invece contenuti all'interno dei blocchi che realizzano il calcolo di parti della relazione (figura 3.10).

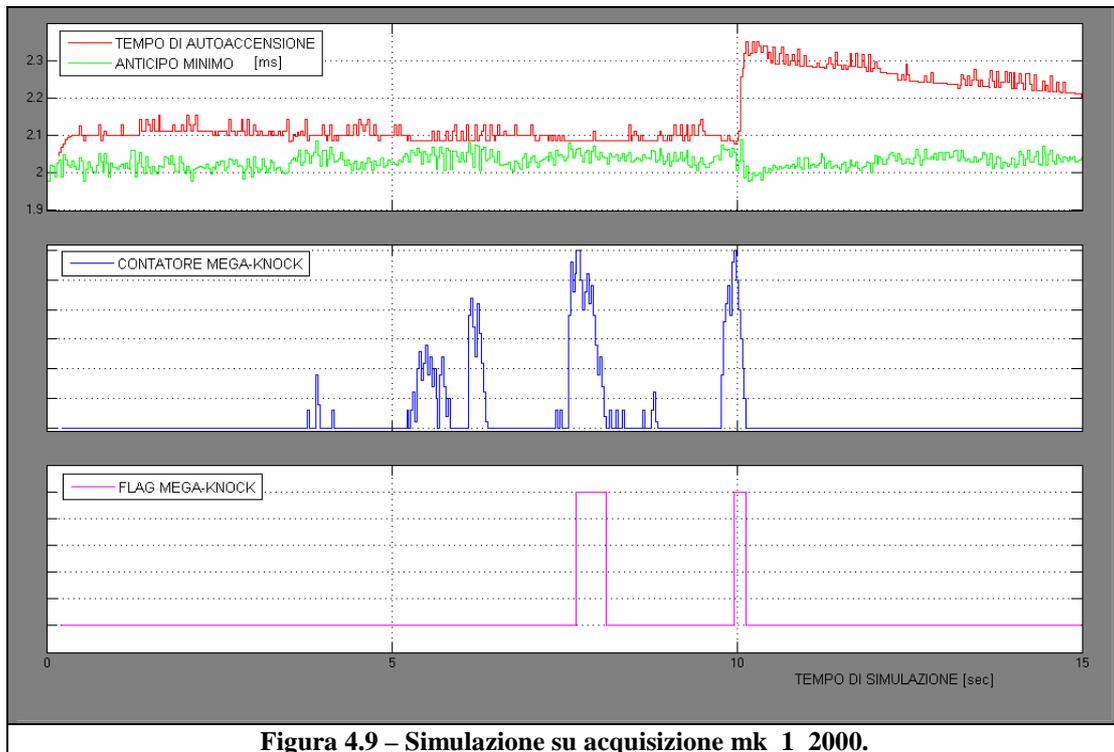
Per ciò che riguarda il coefficiente  $C_1$ , alla fine di questa prima carrellata di simulazioni off-line, sono risultati 2 valori, rispettivamente uno per ogni acquisizione, caratterizzati secondo il seguente ragionamento: partendo dal fatto che in queste prime 4 acquisizioni è stato posto un trigger, in modo tale che l'apparecchiatura attivasse la registrazione dati al verificarsi del fenomeno indesiderato, registrando i

10 secondi prima della preaccensione e i 30 secondi dopo, per stare dalla parte del sicuro ho pensato che, se al decimo secondo si ha preaccensione, bisogna che l'algoritmo intervenga un pò prima, evitando così il verificarsi del fenomeno.

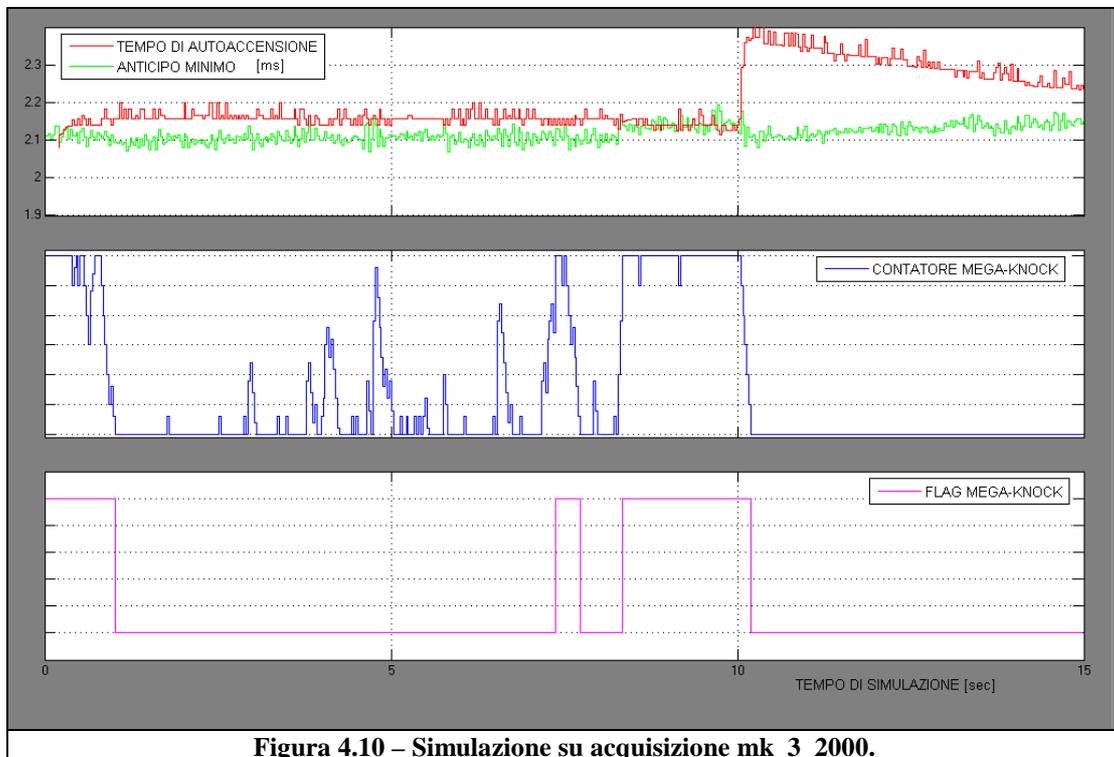
Seguendo questo ragionamento, ho cercato di calibrare l'ultimo coefficiente rimasto ancora indefinito in modo tale che il FLAG MEGA-KNOCK si attivi (in riferimento alle prove analizzate) in una finestra temporale che va da 2 a 5 secondi prima del verificarsi della preaccensione. Questo perché, siccome l'algoritmo attualmente implementato, per come è costruito, stima già di essere in condizioni critiche da un numero elevato di secondi prima, l'affinamento che introduce il nuovo algoritmo da me sviluppato, riguarda principalmente anche questo aspetto: non deve attivare la strategia di prevenzione né troppo presto (quindi evitando arricchimenti non necessari), né troppo in ritardo, finendo magari a ridosso dell'istante di effettiva insorgenza della preaccensione. Questo tenendo conto anche del fatto che il fenomeno non è prevedibile in maniera assoluta, in quanto il verificarsi delle condizioni potenzialmente critiche sono necessarie ma non sufficienti, visto l'aspetto randomico del fenomeno (non sempre al verificarsi delle condizioni potenzialmente critiche si è avuta preaccensione).

In questo modo, con la strategia di prevenzione attiva, non ci si dovrebbe trovare più in condizioni critiche e la preaccensione non dovrebbe avvenire. Ovviamente non se ne ha la certezza assoluta, in quanto non c'è altro modo di verificare la cosa se non inserendo il modello in centralina e verificandolo direttamente, ma per le dinamiche aziendali questa verifica diretta non è ancora possibile.

I risultati ottenuti sono quelli riportati in figura 4.9 e 4.10.



**Figura 4.9 – Simulazione su acquisizione mk\_1\_2000.**



**Figura 4.10 – Simulazione su acquisizione mk\_3\_2000.**

In questa prova, sappiamo che al decimo secondo è avvenuta la preaccensione (e si può apprezzare anche l'effetto della correzione del titolo in grasso che caratterizza l'aumento del tempo di autoaccensione). Seguendo il ragionamento descritto nella pagina precedente, ho ricercato un valore del coefficiente mancante  $C_1$  tale che il FLAG si alzasse in quell'intervallo temporale (sempre descritto nella pagine precedente). Attraverso queste prove, i coefficiente più idonei (uno per ogni prova), permettono l'attivazione della strategia, in entrambi i casi, circa al settimo secondo di simulazione.

Rispettivamente, per questi due casi, sono stati trovati i seguenti valori del coefficiente  $C_1$ :

|           |           |
|-----------|-----------|
| mk_1_2000 | mk_3_2000 |
| 0,00647   | 0,00651   |

Siccome però a noi interessa un valore univoco, che si comporti bene in tutti i casi, o almeno nella stragrande maggioranza di essi, è stata fatta qualche altra simulazione per determinare un unico valore:

$$C_1 = 0,00648.$$

Si è così ottenuto un valore che, nel primo caso (in riferimento alla simulazione mk\_1\_2000) funziona bene e ci si ritrova al limite, nel secondo caso (in riferimento alla simulazione mk\_3\_2000) ci troviamo la strategia attiva in anticipo rispetto al caso precedente e quindi siamo a maggior ragione più al sicuro (figura 4.11).

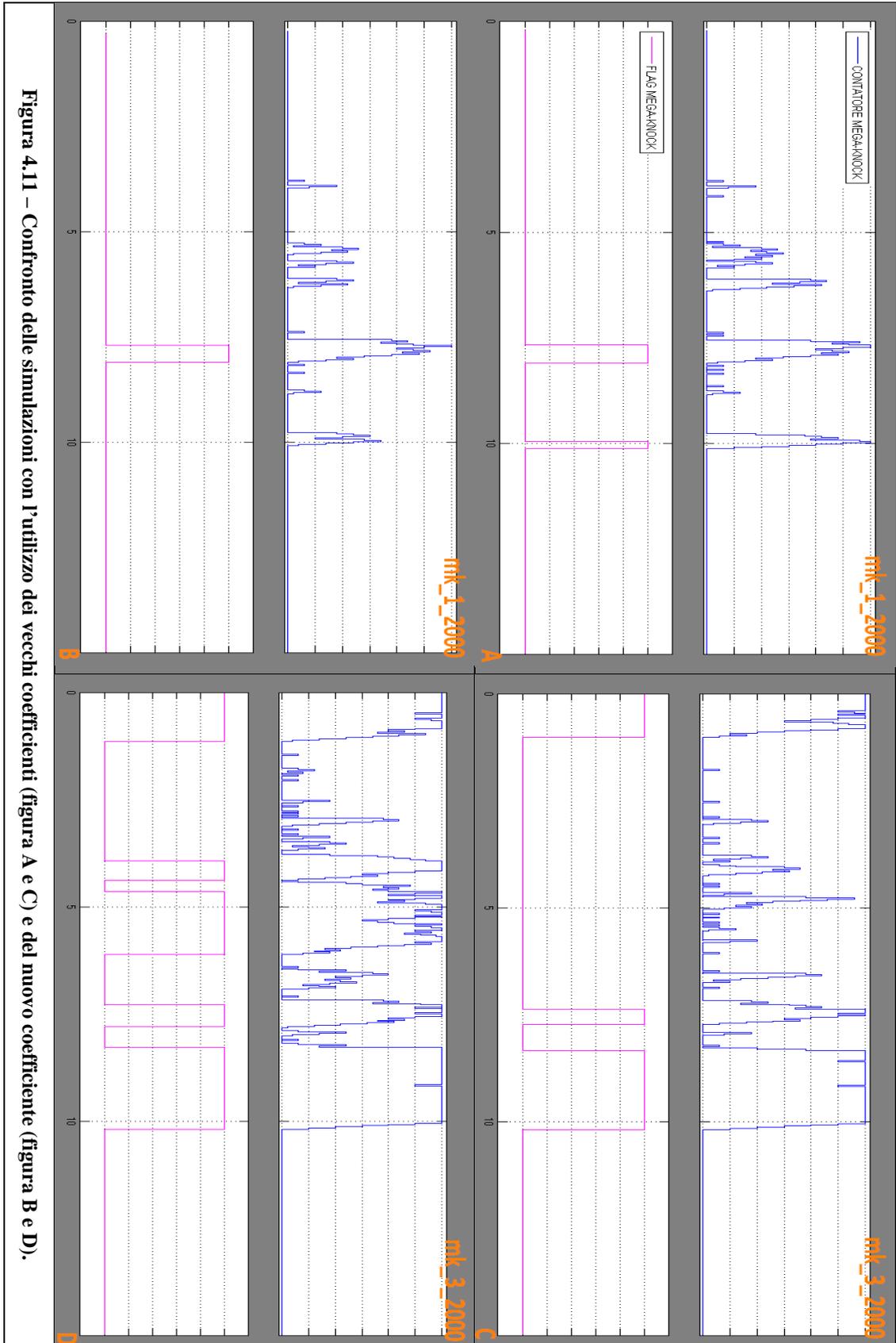


Figura 4.11 – Confronto delle simulazioni con l'utilizzo dei vecchi coefficienti (figura A e C) e del nuovo coefficiente (figura B e D).

Nella figura della pagina precedente, sono raccolti gli andamenti del CONTATORE e del FLAG, relativi alle 2 prove considerate (come riportato su ogni figura) per spiegare l'evoluzione che subisce il contatore quando si va a definire un coefficiente  $C_1$  unico, partendo dai 2 valori precedentemente determinati.

Per semplicità partiamo dalle figure A e C: mostrano gli stessi andamenti di contatore e flag di figura 4.9 e 4.10, cioè sono gli andamenti caratterizzati dai primi 2 coefficienti  $C_1$  determinati. Le figure B e D, fanno riferimento alle stesse prove, ma qui è stato utilizzato in simulazione il coefficiente  $C_1$  unico determinato in via definitiva e mostrano come una scelta diversa di un coefficiente, va a modificare il tempo di autoaccensione, di conseguenza il modo di “muoversi” del contatore e quindi del flag.

Si nota che nella figura B, la modifica non cambia di molto il funzionamento dell'algoritmo e funziona nella stesso modo definito nelle pagine precedenti. Nella figura D, la modifica porta dei cambiamenti molto più spinti che determinano un'attivazione della strategia temporalmente in anticipo rispetto al caso precedente C e quindi siamo a maggior ragione al sicuro dalla preaccensione

#### *4.4 Validazione algoritmo*

In questa ultima fase sono stati ricercati i risultati migliorativi nei confronti dell'algoritmo attualmente presente in centralina. Per arrivare a conclusione del lavoro, sono state eseguite altre acquisizioni mirate al banco prova, realizzate sia con le stesse modalità descritte nel paragrafo precedente ma con un trigger che permette la registrazione dei 30 secondi prima e dopo il verificarsi della preaccensione, sia in condizioni di transitorio di carico ma senza la strategia di prevenzione attiva.

Prima di passare all'analisi delle acquisizioni, credo sia il caso di fare una panoramica veloce dell'algoritmo attualmente presente in centralina, per comprendere le dinamiche di funzionamento e le principali differenze dal nuovo algoritmo da me sviluppato. L'attuale algoritmo in centralina, ha la parte finale relativa alle soglie del contatore e al flag (vedi figura 3.28) identica alla mia (cioè, è nel mio algoritmo che non si è reso necessario modificare quella zona, rimasta invariata); invece la parte che tratta le condizioni di abilitazione della strategia di prevenzione e gestisce l'entità degli step incrementali e decrementali è completamente diversa, molto più semplice: innanzitutto non esiste una strategia di "movimentazione" del contatore così dettagliata, ma esiste uno switch che presenta ai suoi capi, un ramo per lo step incrementale (sopra) in cui è presente una tabella calibrata con in ingresso la temperatura dei gas di scarico (che rappresentano una sorta di traccia termica di quello che è avvenuto al ciclo precedente), un ramo (sotto) in cui vi è il semplice valore di decremento del contatore (parte in azzurro). La condizione abilitativa dello switch (nel mio algoritmo sostituite dalla relazione empirica) è composta dalla somma di 3

condizioni che si devono verificare contemporaneamente, e queste ultime vengono ricavate dal confronto del carico, temperatura dell'acqua di raffreddamento e temperatura dell'aria con opportune tabelle calibrate (parte in verde).

Ora, io non conosco nello specifico come tutte queste tabelle siano state calibrate, però quello che ho constatato durante la ricerca dei risultati è che, innanzitutto il contatore (per come è strutturato qui) passa sempre dal valore minimo al valore massimo (e viceversa), alzando subito il flag, poi le condizioni di abilitazione della strategia (in relazione alle tabelle calibrate) risultano alquanto (passatemi il termine) “spartane” o comunque molto vaghe e sono tali da tenere il flag alzato, e quindi la strategia di ingrassamento della miscela, per tempo molto lunghe, aumentando in maniera spropositata i consumi.

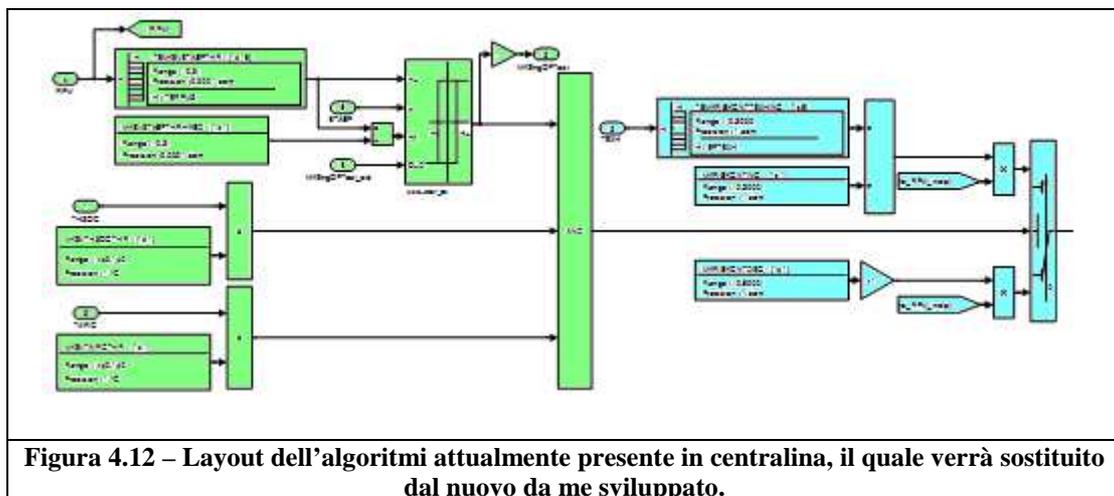


Figura 4.12 – Layout dell'algoritmi attualmente presente in centralina, il quale verrà sostituito dal nuovo da me sviluppato.

Inoltre, c'è un parametro molto importante che ha bisogno di essere spiegato:

### ***KNOCK PEAK***

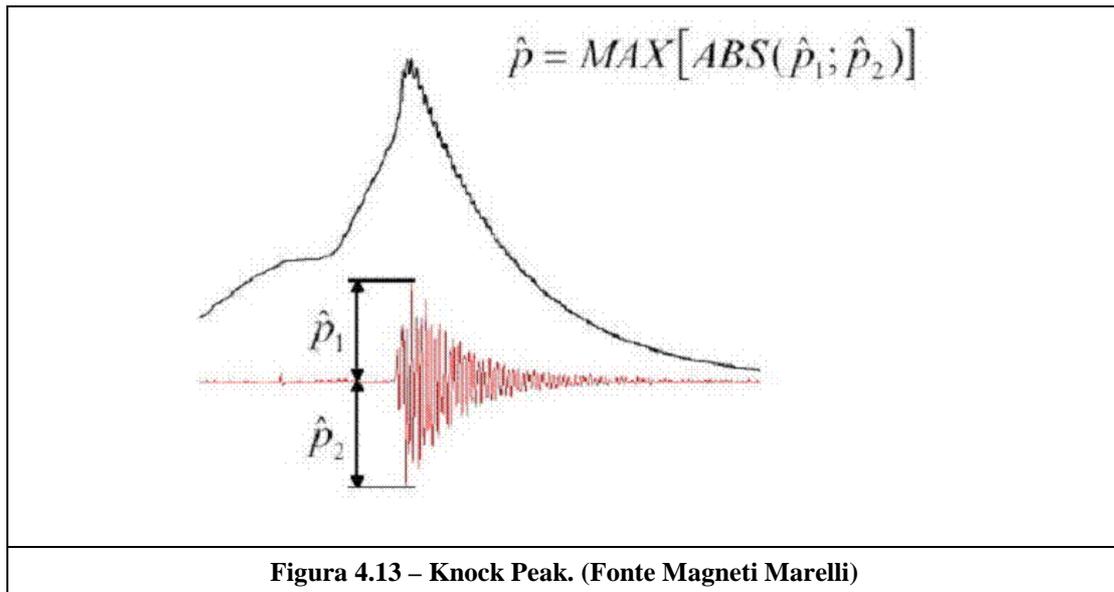


Figura 4.13 – Knock Peak. (Fonte Magneti Marelli)

È una grandezza fondamentale che fornisce un'indicazione immediata dei fenomeni indesiderati che avvengono in camera. Per arrivare a definire questa grandezza si prende il segnale di pressione in camera di combustione, lo si filtra passa-alto tra 5 e 20 kHz, ne viene calcolato il valore assoluto e di questo viene valutato il valore massimo.

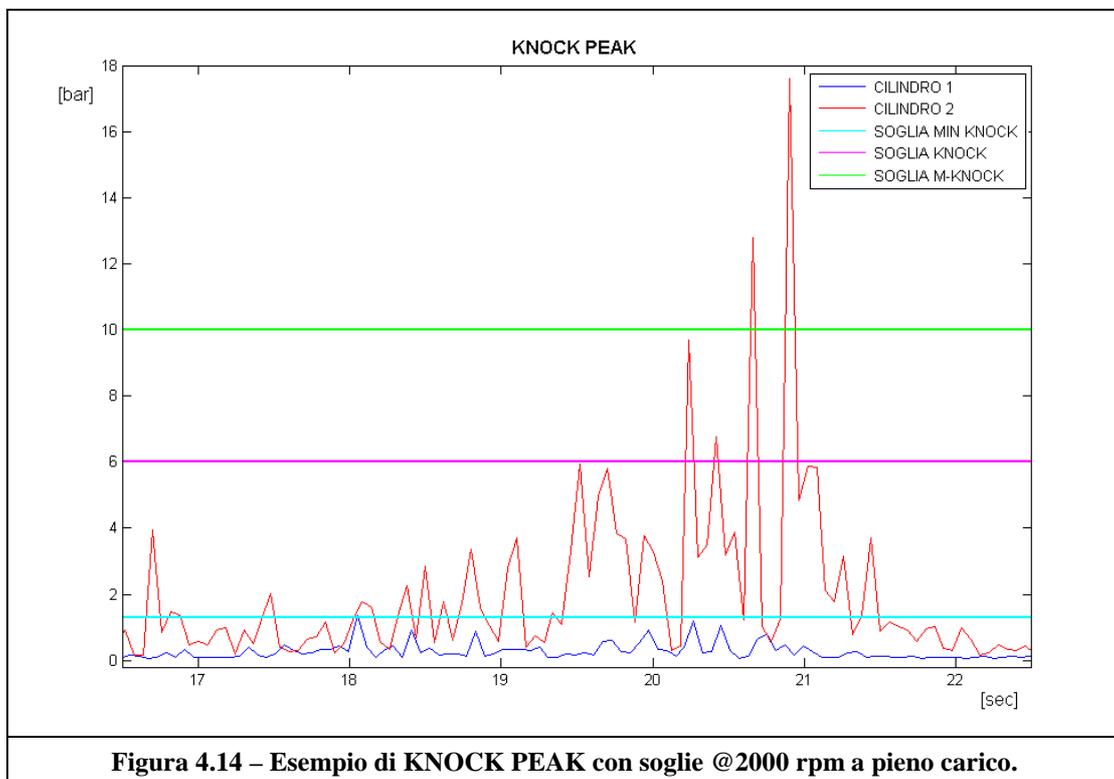


Figura 4.14 – Esempio di KNOCK PEAK con soglie @2000 rpm a pieno carico.

In figura 4.14 è rappresentato un esempio di grafico del KNOCK PEAK in cui sono state inserite anche le tre soglie “di distinzione”. Non esiste una regola precisa (cioè quelle tre soglie non sono fisse e definite in maniera assoluta, soprattutto la prima): la soglia minima limite, che distingue i cicli in cui la combustione è avvenuta normalmente da quelli detonanti, è quella azzurra; è una soglia “dinamica” che si sposta in funzione del numero di giri del motore (nell’esempio considerato a 2000 rpm viene posta uguale a 1,3 bar); fra la soglia azzurra e quella viola (6 bar) i cicli vengono considerati detonanti, così come al di sopra della soglia verde (10 bar) vengono considerati mega-detonanti (cicli con preaccensione). Nella banda fra 6 e 10 bar siamo a metà fra le due situazioni quindi, a seconda del valore di pressione, il fenomeno può essere considerato come detonazione o preaccensione.

In tabella 4.3 sono riportate le denominazioni delle acquisizioni fatte in condizioni critiche di preaccensione:

| <b>NOME PROVA</b> |
|-------------------|
| mk_5_1900         |
| mk_6_2500         |
| mk_7_2000_no_MK   |
| mk_8_2500         |

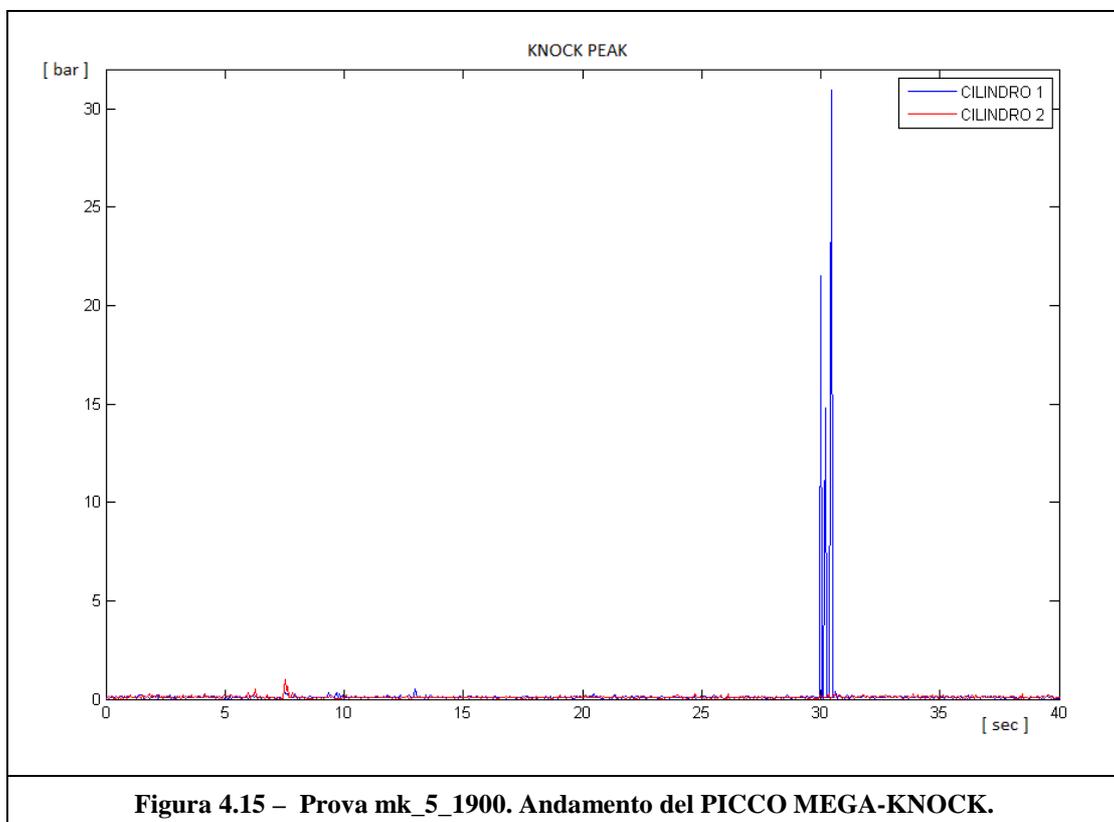
**Tabella 4.3 – Acquisizioni analizzate in condizioni di preaccensione.**

In riferimento alle prove qui sopra elencate, proprio per la presenza del fenomeno indesiderato (a parte un paio di acquisizioni), sono stati ricercati risultati in termini di risposta dell’algoritmo in relazione al fatto che sappiamo in quale punto dell’acquisizione è presente il Mega-Knock, e al solito vogliamo che la strategia intervenga

prima che si giunga in quelle condizioni; ma sono stati ricercati risultati anche in termini di riduzione dei consumi, in comune con la strategia motore applicata in questo modello. Come già spiegato, in questo modello si cerca di attuare una strategia di controllo motore mirata a ridurre i consumi ma, se necessario, sappiamo che può intervenire la strategia di prevenzione dalla preaccensione che, ingrassando la miscela, determina un aumento del consumo di combustibile. Quindi è strategico sviluppare una strategia di prevenzione che agisca solo se necessario.

Nelle pagine successive è stata riportata l'analisi dettagliata delle acquisizioni e delle simulazioni.

« *mk\_5\_1900* »

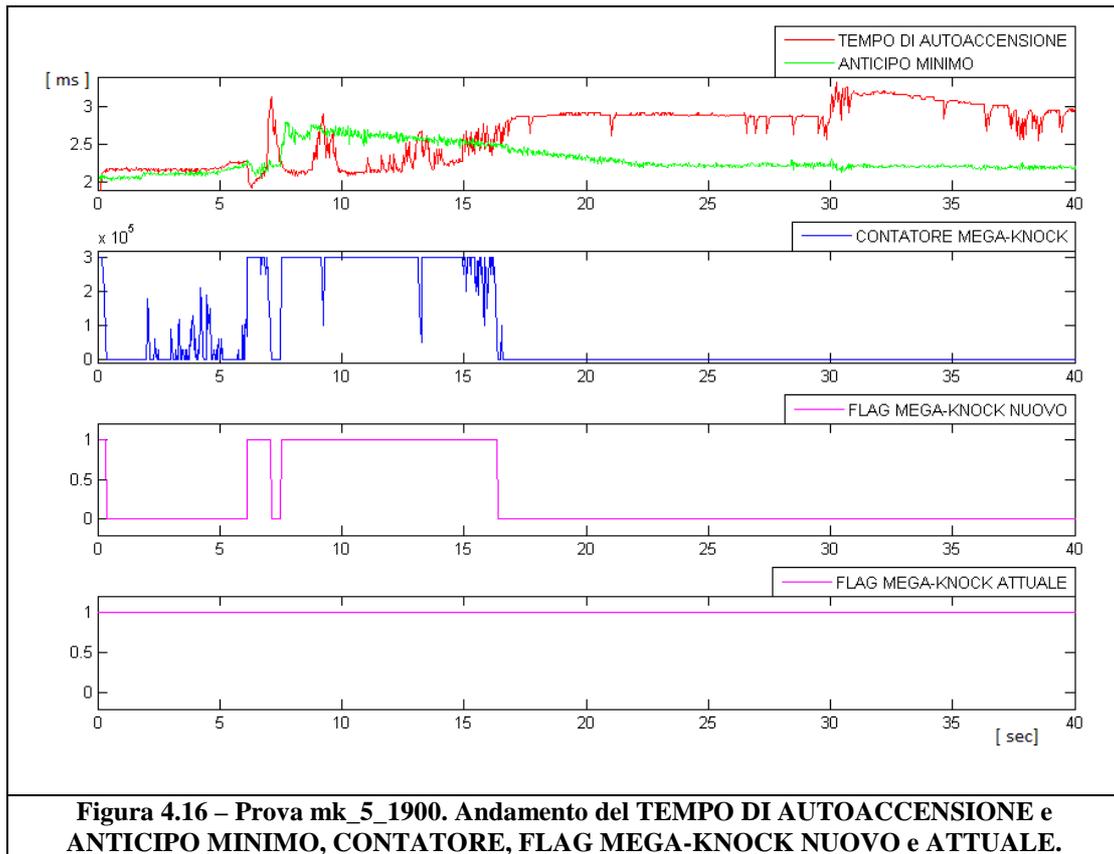


**Figura 4.15 – Prova *mk\_5\_1900*. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK.**

In figura 4.15 e 4.16 sono riportati rispettivamente il valore del knock peak e l'andamento delle grandezze principali oggetto dell'algoritmo di previsione, con all'interno il confronto fra il flag dell'algoritmo attualmente presente in centralina (FLAG MEGA-KNOCK ATTUALE) e il flag generato dal nuovo algoritmo sviluppato nell'ambito di questo lavoro di tesi (FLAG MEGA-KNOCK NUOVO).

La simulazione applicata a questa acquisizione, ci restituisce buoni risultati in termini di riduzione dei consumi, in quanto il FLAG NUOVO risulta attivo per un minor tempo rispetto al FLAG ATTUALE. L'aspetto negativo, o quasi, è il fatto che nell'intorno del intervallo di tempo in cui effettivamente si è verificata la preaccensione, la strategia non è attiva. Quel "quasi" si riferisce al fatto che, essendo la strategia attiva nei secondi precedenti, probabilmente in un funzionamento reale, la preaccensione non si sarebbe verificata; inoltre questa acquisizione sottolinea la questione della saltuaria imprevedibilità del fenomeno, in quanto in questo caso, si ha Mega-Knock in condizioni di funzionamento che non sono proprio quelle più propense a generare il fenomeno.

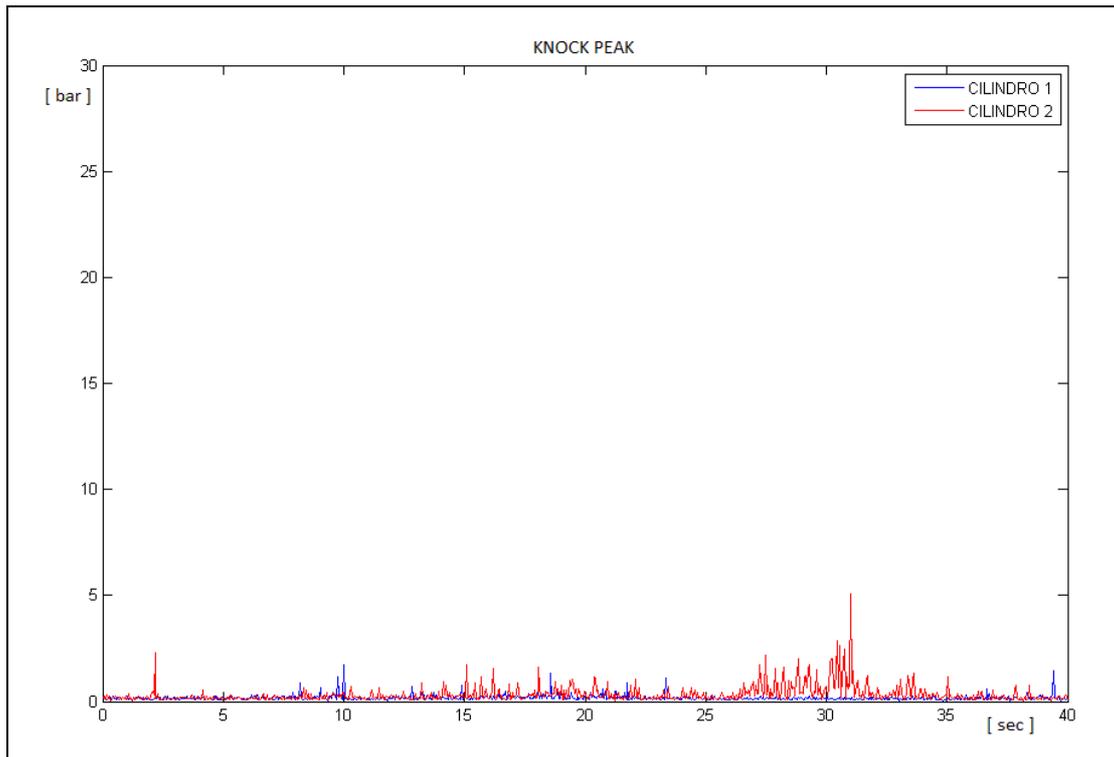
Nella figura 4.16 sono riportati: nel primo grafico gli andamenti del TEMPO DI AUTO ACCENSIONE e dell'ANTICIMO MINIMO per evidenziare la mutua posizione dei due andamenti, che poi determina tutta la strategia; nel secondo grafico è rappresentato il CONTATORE MEGA-KNOCK del nuovo algoritmo da me sviluppato; negli ultimi due grafici ci sono, rispettivamente, il FLAG "NUOVO" (generato dal nuovo algoritmo) e il FLAG "ATTUALE" (generato dall'algoritmo attualmente implementato in centralina). La struttura qui descritta si ripete in ogni figura e per ogni prova acquisita.



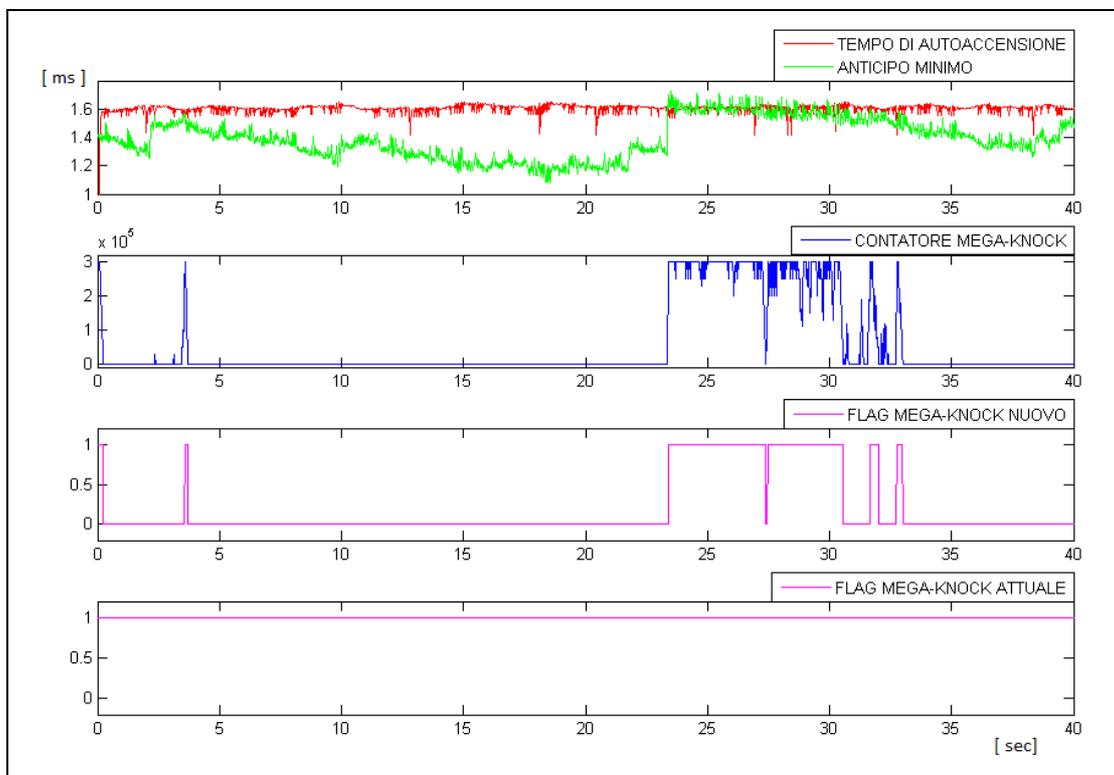
**Figura 4.16 – Prova mk\_5\_1900. Andamento del TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO, CONTATORE, FLAG MEGA-KNOCK NUOVO e ATTUALE.**

« *mk\_6\_2500* »

In figura 4.17 si può notare la sola presenza di cicli detonanti; di conseguenza il nuovo algoritmo non interviene se non nella zona in cui sono presenti questi picchi (ricordando che eventi di detonazione possono creare dei punti caldi in camera di combustione, i quali possono diventare ottime fonti per l'innesco di preaccensione). L'algoritmo attuale invece presenta il FLAG sempre alzato con notevole aumento dei consumi (figura 4.18).



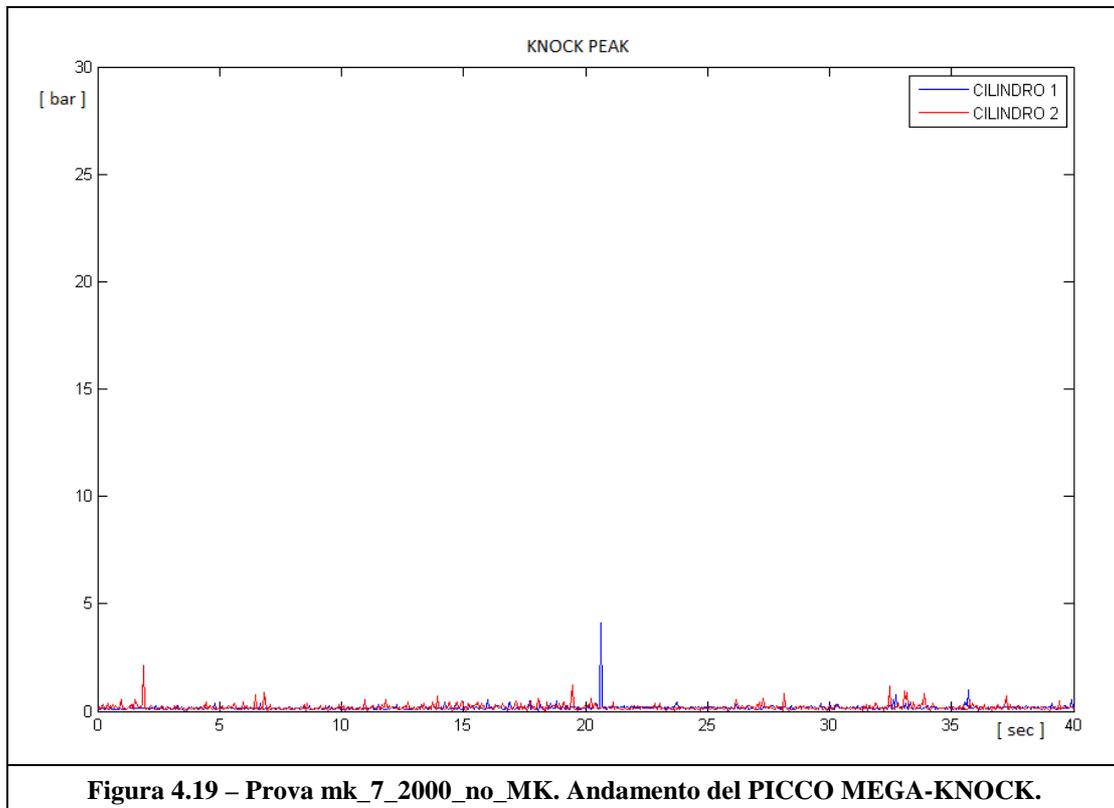
**Figura 4.17 – Prova mk\_6\_2500. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK.**



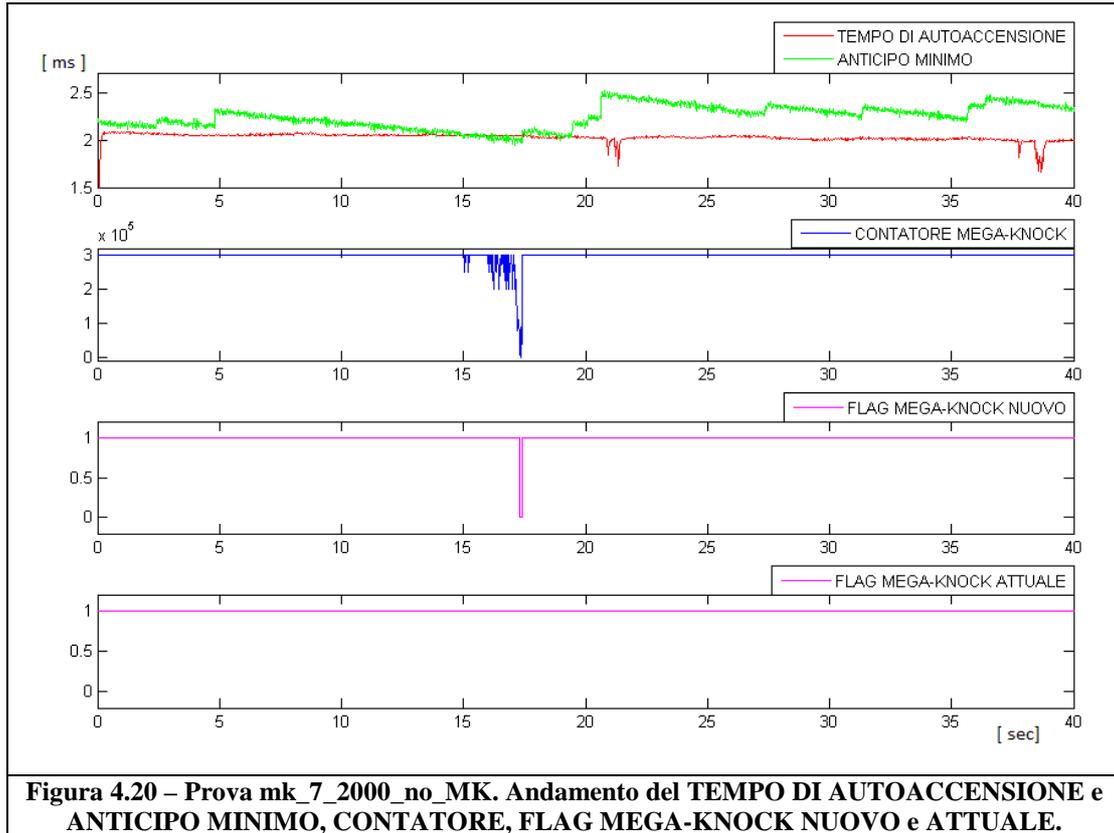
**Figura 4.18 – Prova mk\_6\_2500. Andamento del TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO, CONTATORE, FLAG MEGA-KNOCK NUOVO e ATTUALE.**

« *mk\_7\_2000\_no\_MK* »

In questa prova, come già anticipa il nome stesso, non è presente la preaccensione, ma non vi è traccia neanche di normale detonazione. Purtroppo qui la simulazione off-line ci restituisce un risultato che per certi aspetti può essere considerato negativo: non essendo presente nessun fenomeno anomalo, non ha senso che entrambi gli algoritmi abbiano attiva la strategia di prevenzione, alzando il FLAG, però questo può essere giustificato sempre considerando la non assoluta prevedibilità del fenomeno: forse siamo seriamente in condizioni critiche per la preaccensione, l'algoritmo se ne accorge, ma poi effettivamente il fenomeno non si verifica (figura 4.19 e 4.20).



**Figura 4.19 – Prova *mk\_7\_2000\_no\_MK*. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK.**



**Figura 4.20 – Prova mk\_7\_2000\_no\_MK. Andamento del TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO, CONTATORE, FLAG MEGA-KNOCK NUOVO e ATTUALE.**

« *mk\_8\_2500* »

In figura 4.21 (soprattutto nell’ingrandimento) si notano preaccensioni in entrambi i cilindri. In figura 4.22, nel grafico in alto, si può vedere come il tempo di autoaccensione, pochi istanti prima del verificarsi delle preaccensioni, cali bruscamente come conseguenza del fatto che sicuramente pressione e temperatura hanno raggiunto valori critici per la preaccensione; immediatamente l’algoritmo alza il FLAG azionando la strategia in maniera corretta. L’attuale algoritmo invece ha già il FLAG alzato sin da inizio acquisizione, nonostante non ci siano segni di preaccensione.

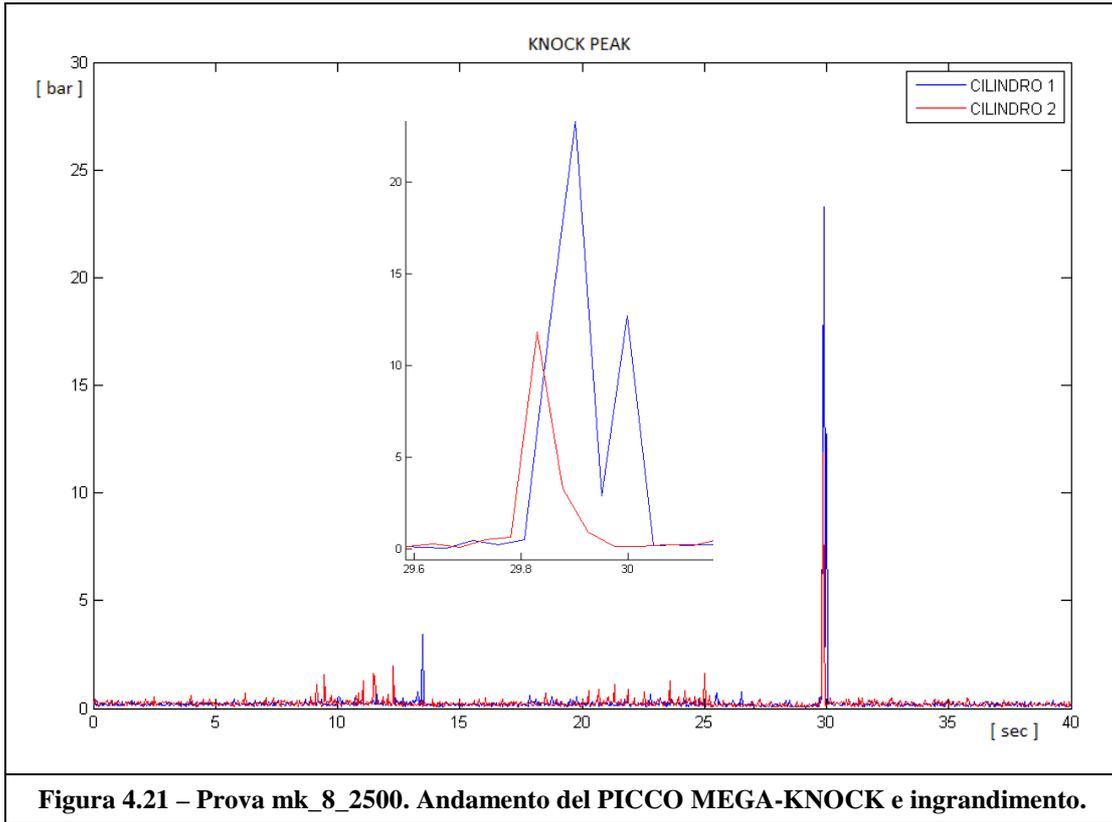


Figura 4.21 – Prova mk\_8\_2500. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK e ingrandimento.

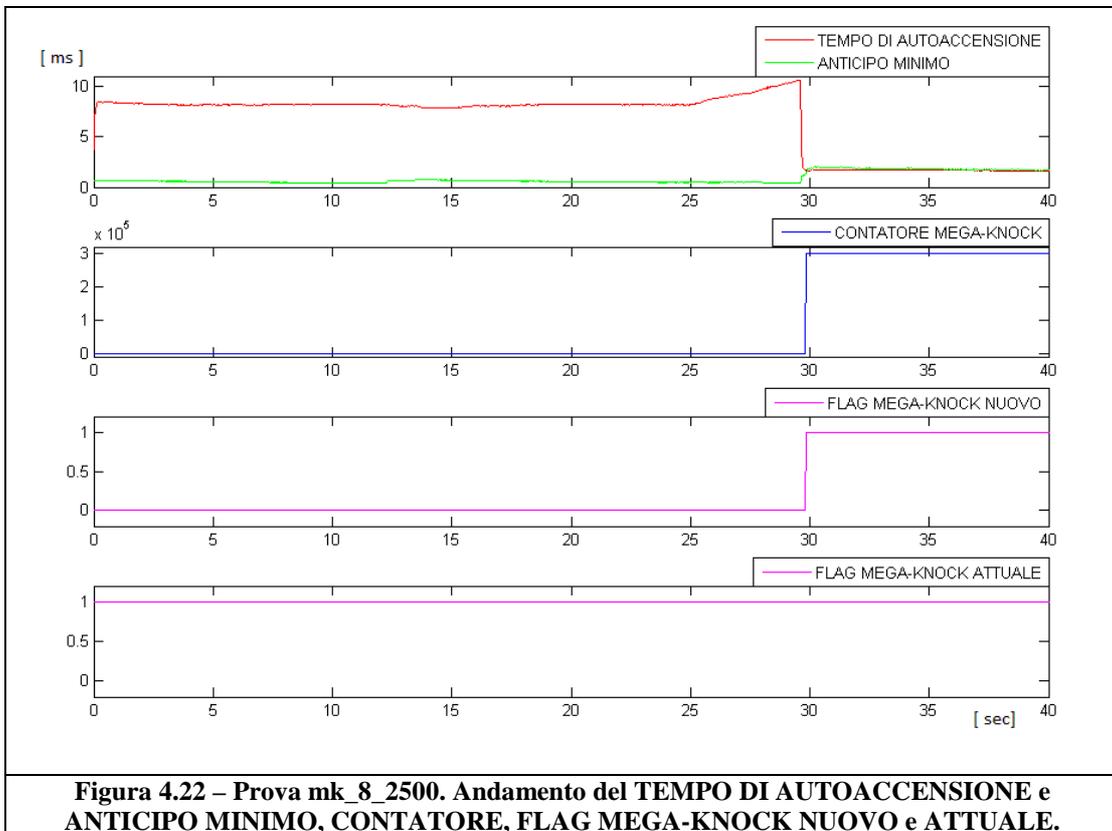


Figura 4.22 – Prova mk\_8\_2500. Andamento del TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO, CONTATORE, FLAG MEGA-KNOCK NUOVO e ATTUALE.

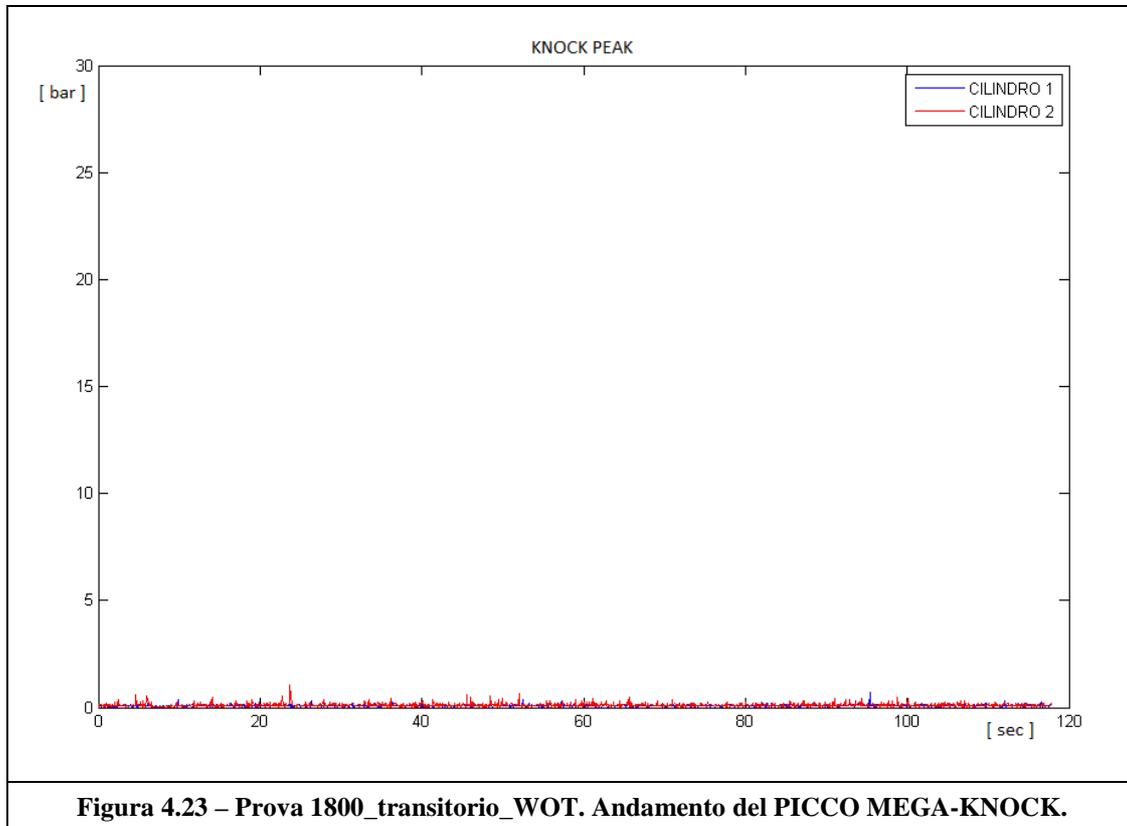
In tabella 4.4 sono riportate le denominazioni delle acquisizioni fatte in condizioni di transitorio di carico:

| <b>NOME PROVA</b>      |
|------------------------|
| 1800_transitorio_WOT   |
| 1900_transitorio_WOT   |
| 1900_transitorio_WOT_2 |
| 2000_transitorio_WOT   |
| 2000_transitorio_WOT_2 |
| 2100_transitorio_WOT   |
| 2100_transitorio_WOT_2 |
| 2200_transitorio_WOT   |
| 2200_transitorio_WOT_2 |
| 2300_transitorio_WOT   |
| 2300_transitorio_WOT_2 |
| 2500_transitorio_WOT   |
| 2500_transitorio_WOT_2 |

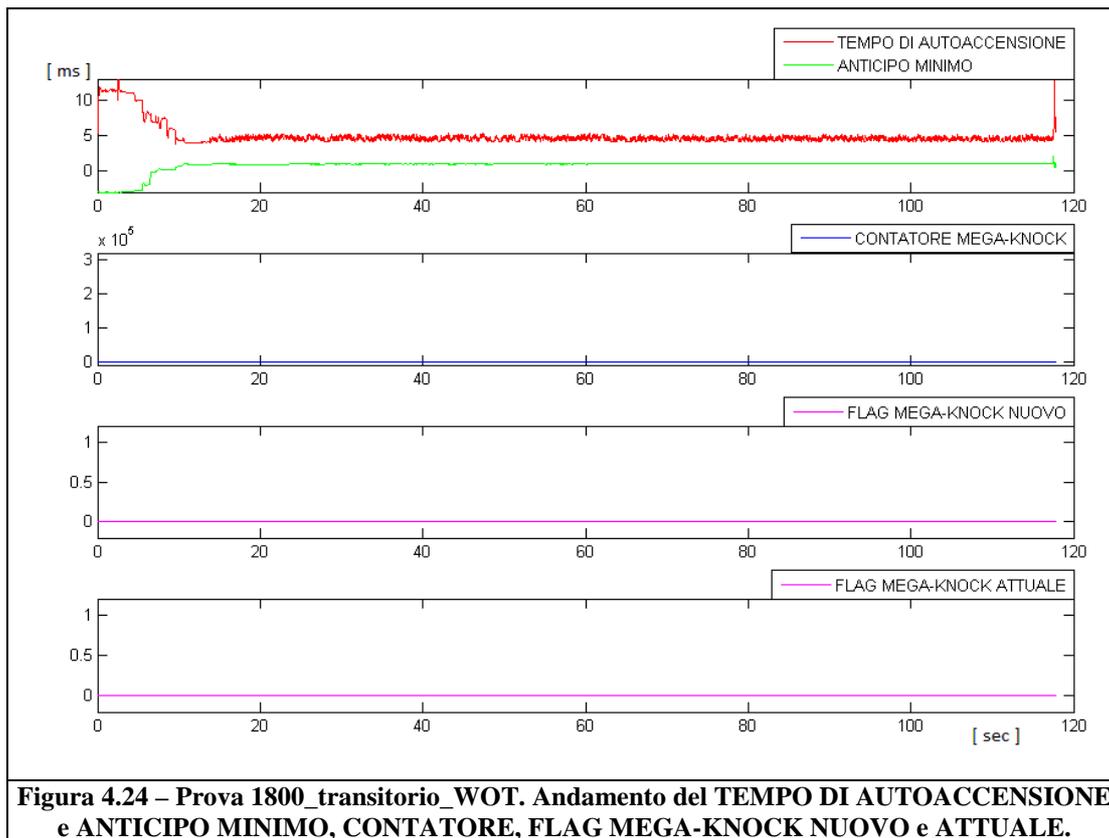
**Tabella 4.4 – Acquisizioni analizzate in condizioni di transitorio di carico.**

Anche in questa serie di acquisizioni, sono stati ricercati gli stessi risultati per la serie di prove precedenti: una risposta ottimale dell’algoritmo in presenza della preaccensione (presente in alcune prove) e una riduzione dei consumi, ricordando però che in queste prove risulta disattivata la strategia di prevenzione (cioè il FLAG si alza lo stesso segnalando la che la strategia viene attivata, ma l’effettivo comando non arriva, quindi non si ha alcuna correzione del titolo).

« 1800\_transitorio\_WOT »



Dalla figura 4.23 si può apprezzare come in questa prova non sia presente né la preaccensione né alcun fenomeno di detonazione. Come conseguenza di ciò, in relazione alle evidenti condizioni non critiche di funzionamento, ci si aspetta che l’algoritmo non intervenga in alcun modo (FLAG non attivo). E questo è ciò che effettivamente avviene, sia per ciò che riguarda la strategia introdotta col nuovo algoritmo, sia per ciò che riguarda la strategia già presente in centralina (figura 4.24).



**Figura 4.24 – Prova 1800\_transitorio\_WOT. Andamento del TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO, CONTATORE, FLAG MEGA-KNOCK NUOVO e ATTUALE.**

« 1900\_transitorio\_WOT »

Anche in questa prova, dalla figura 4.25, si può notare l’assenza sia di preaccensione che di detonazione. Come prima ci si aspetta che l’algoritmo non intervenga in alcun modo (FLAG non attivo), ma qui i due algoritmi restituiscono due risultati diversi: l’algoritmo attuale, nonostante non ci si trovi in condizioni critiche, comunque intorno al secondo 84 alza il FLAG, attivando la strategia e incrementando i consumi, mentre il nuovo algoritmo mantiene, giustamente, il FLAG inattivo con notevole risparmio di benzina (figura 4.26). La spiegazione dello strano comportamento dell’algoritmo “attuale” risiede nel fatto che le grandezze oggetto delle condizioni abilitative, sono di sicuro ricadute in un campo di funzionamento considerato potenzialmente critico.

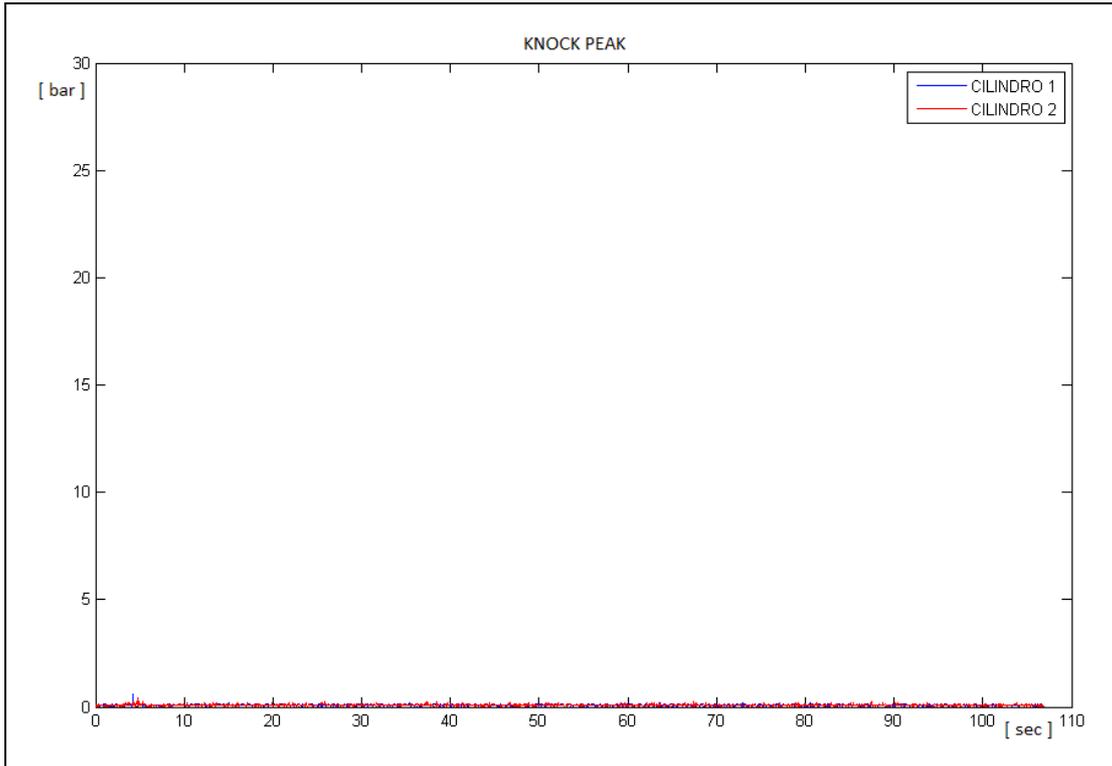


Figura 4.25 – Prova 1900\_transitorio\_WOT. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK.

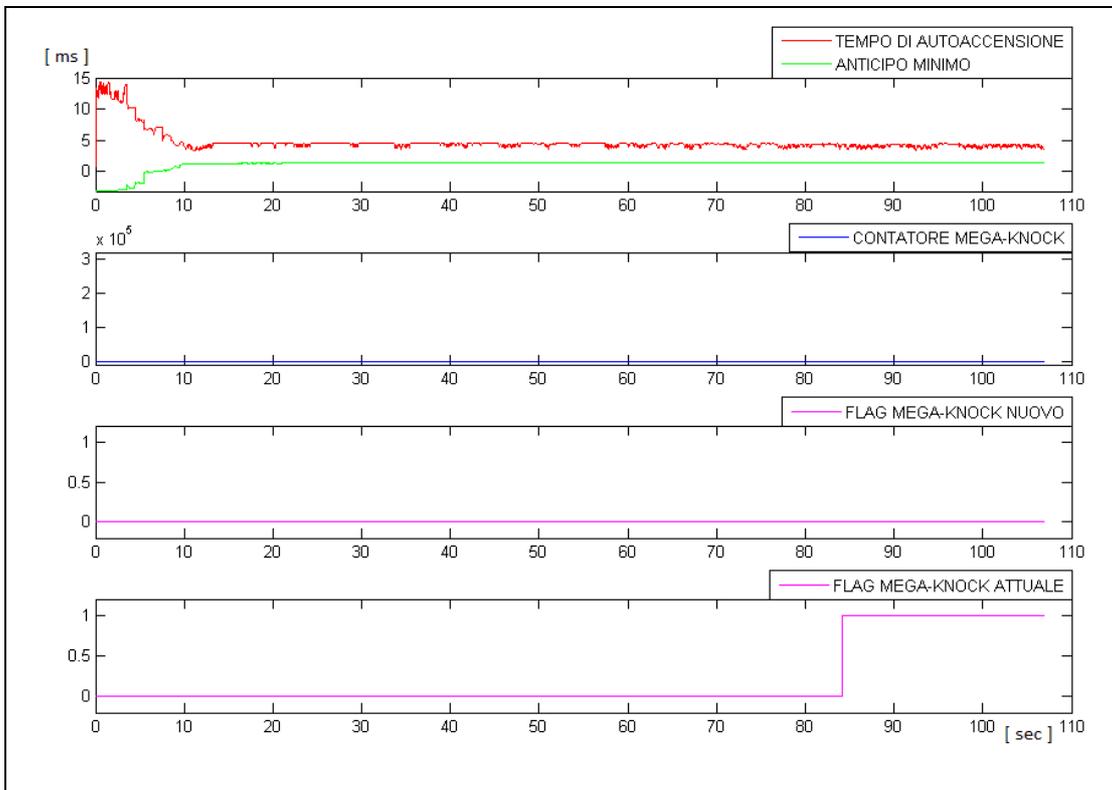


Figura 4.26 – Prova 1900\_transitorio\_WOT. Andamento del TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO, CONTATORE, FLAG MEGA-KNOCK NUOVO e ATTUALE.

« 1900\_transitorio\_WOT\_2 »

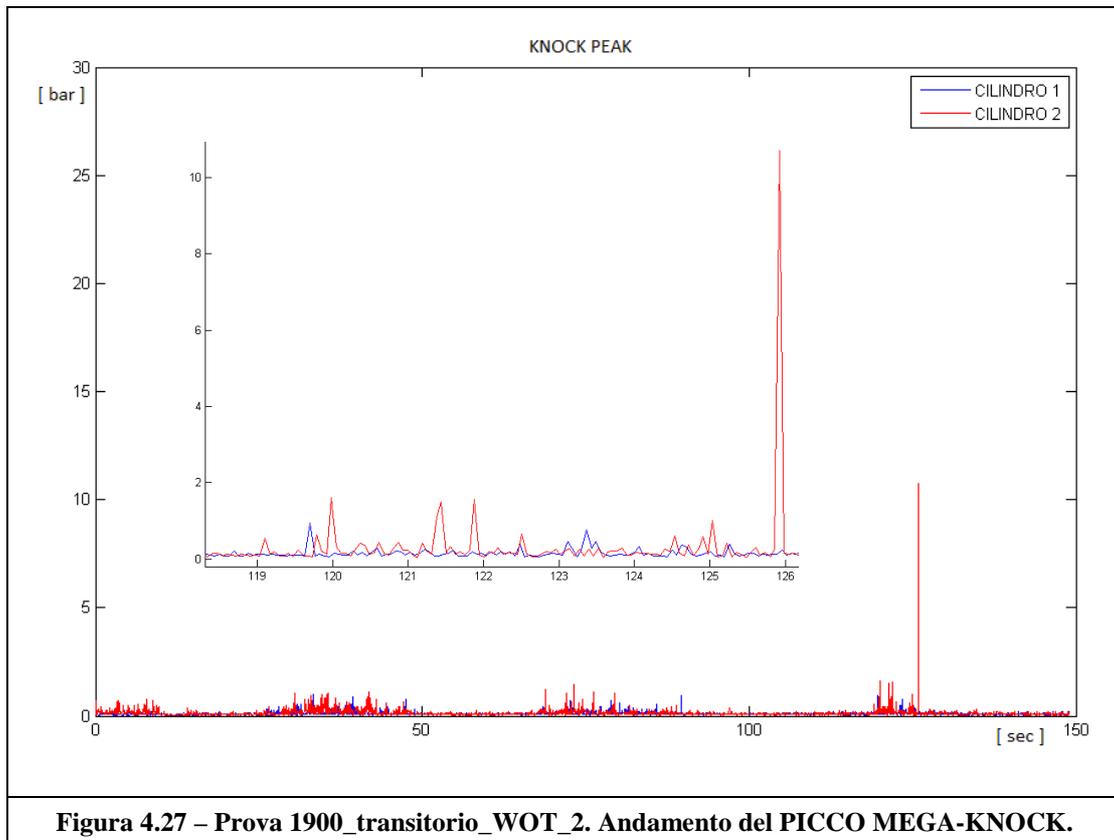
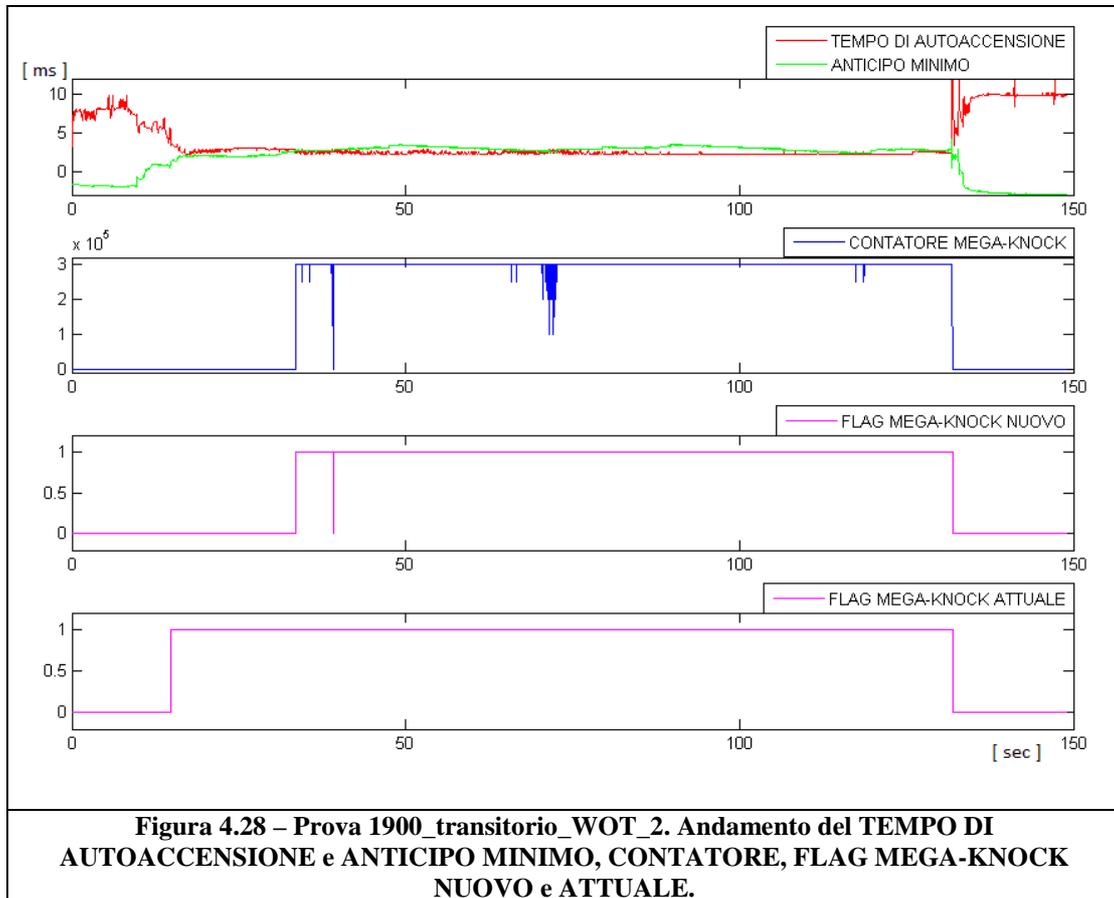


Figura 4.27 – Prova 1900\_transitorio\_WOT\_2. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK.

In questa prova si può invece notare la presenza della preaccensione, segnalata dal picco presente in figura 4.27 intorno al 125esimo secondo. Altra cosa che si può notare, rappresentata dalle piccole creste presenti nel grafico, sono delle lievi entità di detonazione, che comunque comportano un aumento delle temperature in camera di combustione e quindi possono portarci in condizioni critiche di preaccensione. Proprio per la presenza di queste, seppur lievi, detonazioni, il nuovo algoritmo stima di essere in condizioni potenzialmente critiche e alza il FLAG (che si abbassa quando a fine prova viene ridotto il carico), e giustamente la stessa cosa viene fatta dall'attuale algoritmo, che però lo alza circa 20 secondi prima, quando

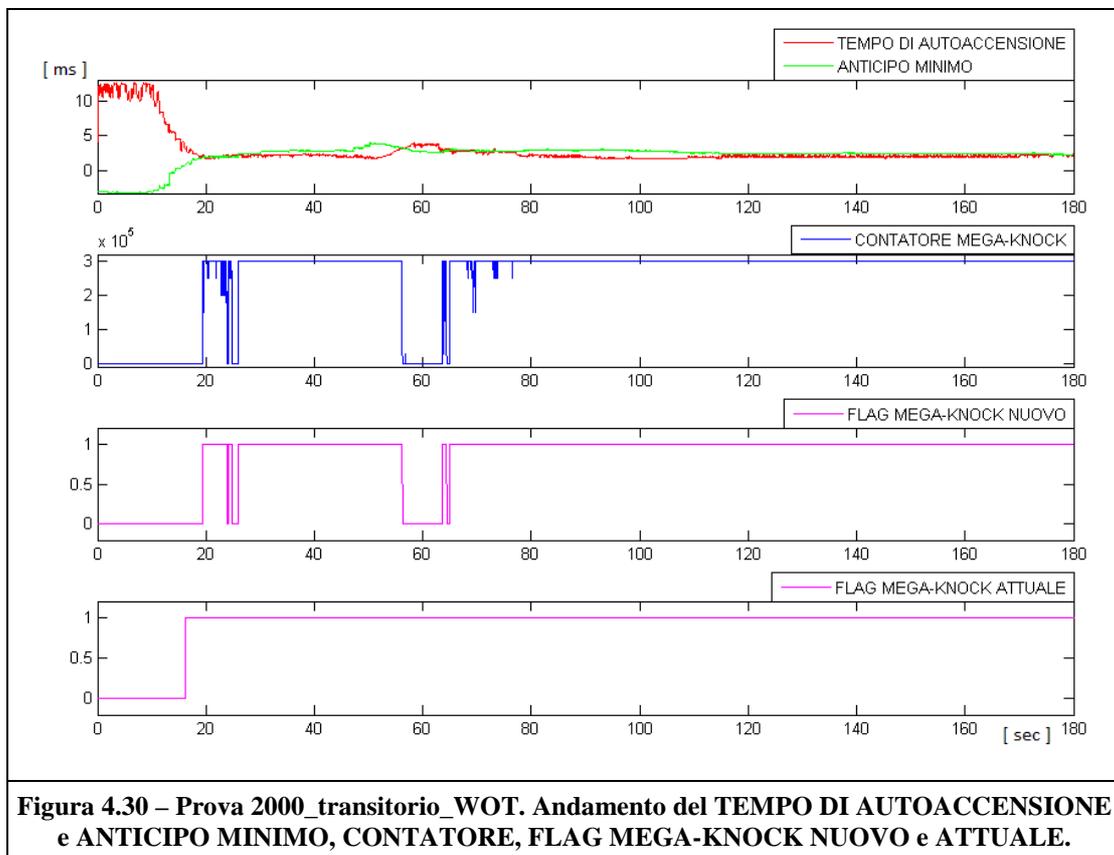
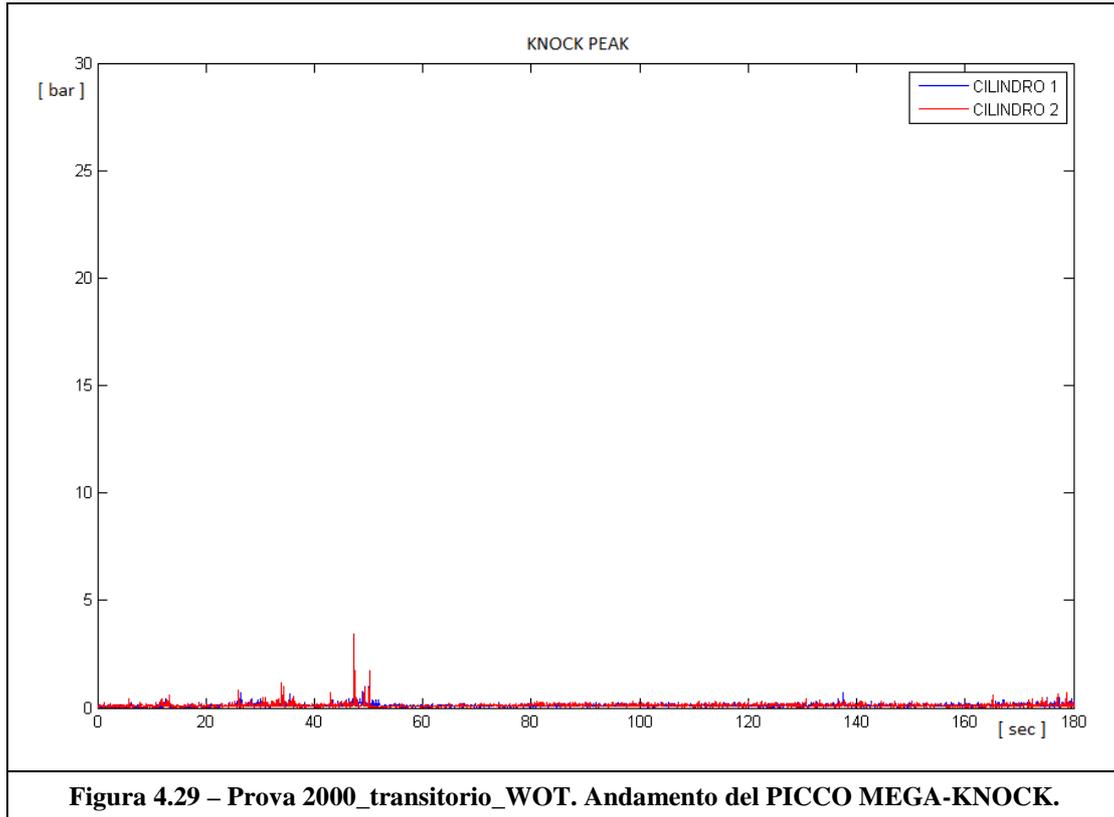
non ci sono significative motivazioni per farlo. Quindi qui il nuovo algoritmo risulta lavorare leggermente meglio del vecchio (figura 4.28).



« 2000\_transitorio\_WOT »

Qui si ha qualche detonazione nella parte iniziale dell’acquisizione, ma non è presente la preaccensione. Comunque l’algoritmo “sente” di essere in condizioni un po’ altalenanti fra il critico e il non critico e conseguentemente il FLAG viene alzato e abbassato.

Entrambi gli algoritmi sembrano reagire allo stesso modo per ciò che riguarda la parte di previsione, mentre in riferimento ai consumi, il nuovo algoritmo ne garantisce una lieve riduzione, quindi lavora leggermente meglio (figura 4.29 e 4.30).



« 2000\_transitorio\_WOT\_2 »

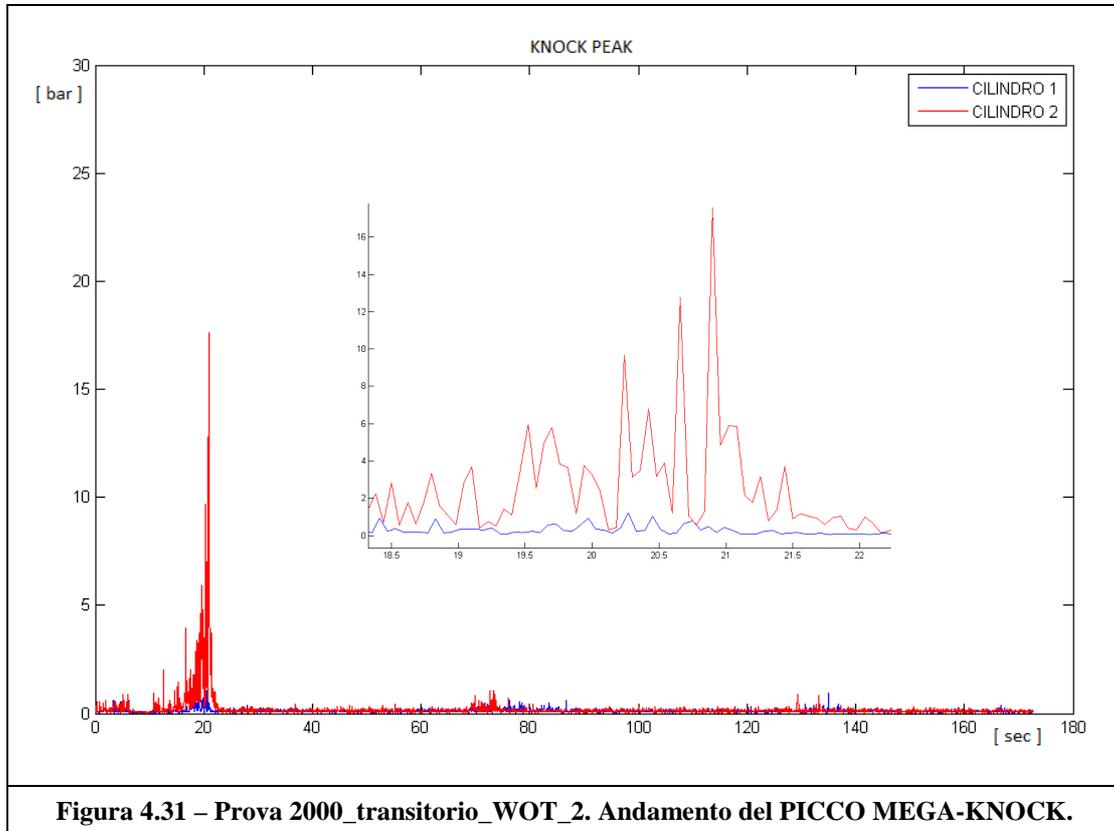
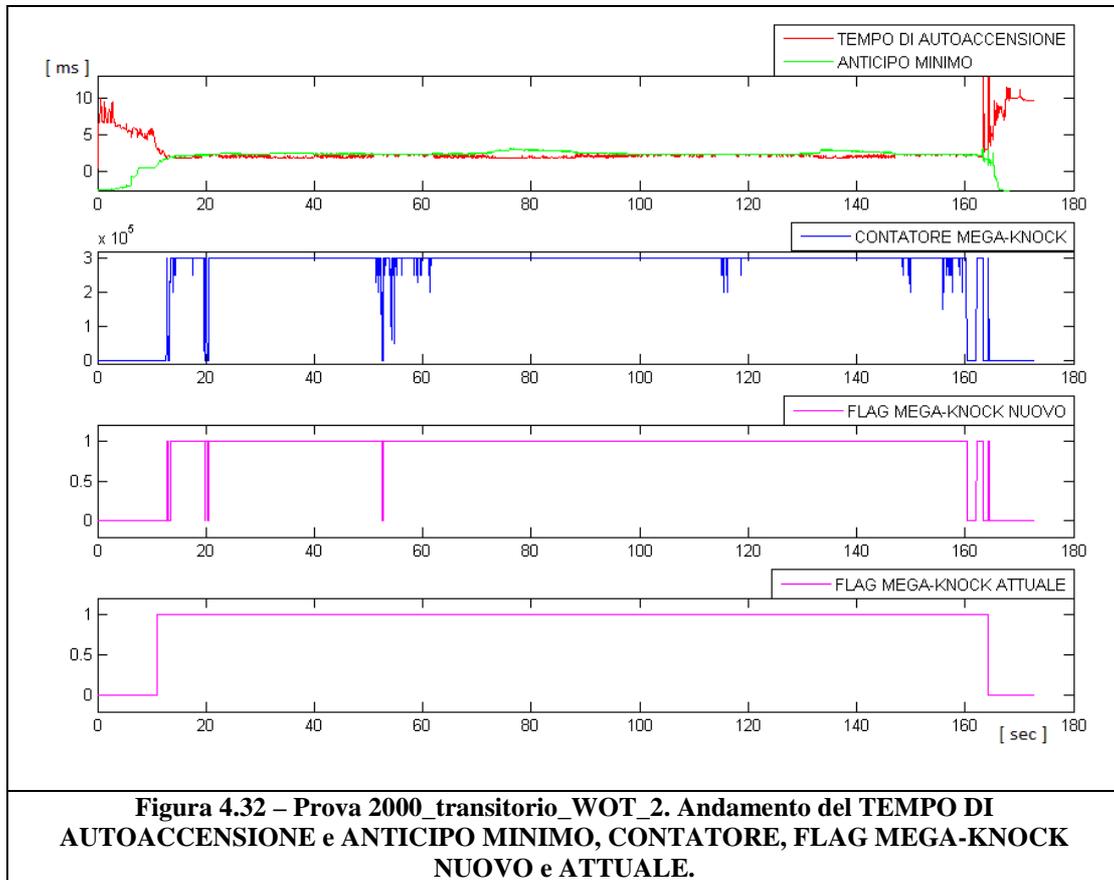


Figura 4.31 – Prova 2000\_transitorio\_WOT\_2. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK.

In questa prova è ben visibile quello che viene spiegato nei primi capitoli, cioè che i fenomeni di detonazione e preaccensione sono in grado di esaltarsi a vicenda: si vedono chiaramente alcuni cicli detonanti, seguiti dai tre picchi più alti che rappresentano tre preaccensioni. Nella restante parte di acquisizioni si intravedono altri fenomeni, molto lievi, di detonazione.

In questo caso la strategia si attiva proprio dai primi istanti in cui si presentano le prime detonazioni, e il FLAG resta alzato per tutta la durata della prova, segno forse che anche i restanti fenomeni di lieve detonazione hanno mantenuto le condizioni in camera ad un livello comunque critico. In questo caso i due algoritmi si equivalgono, sia in

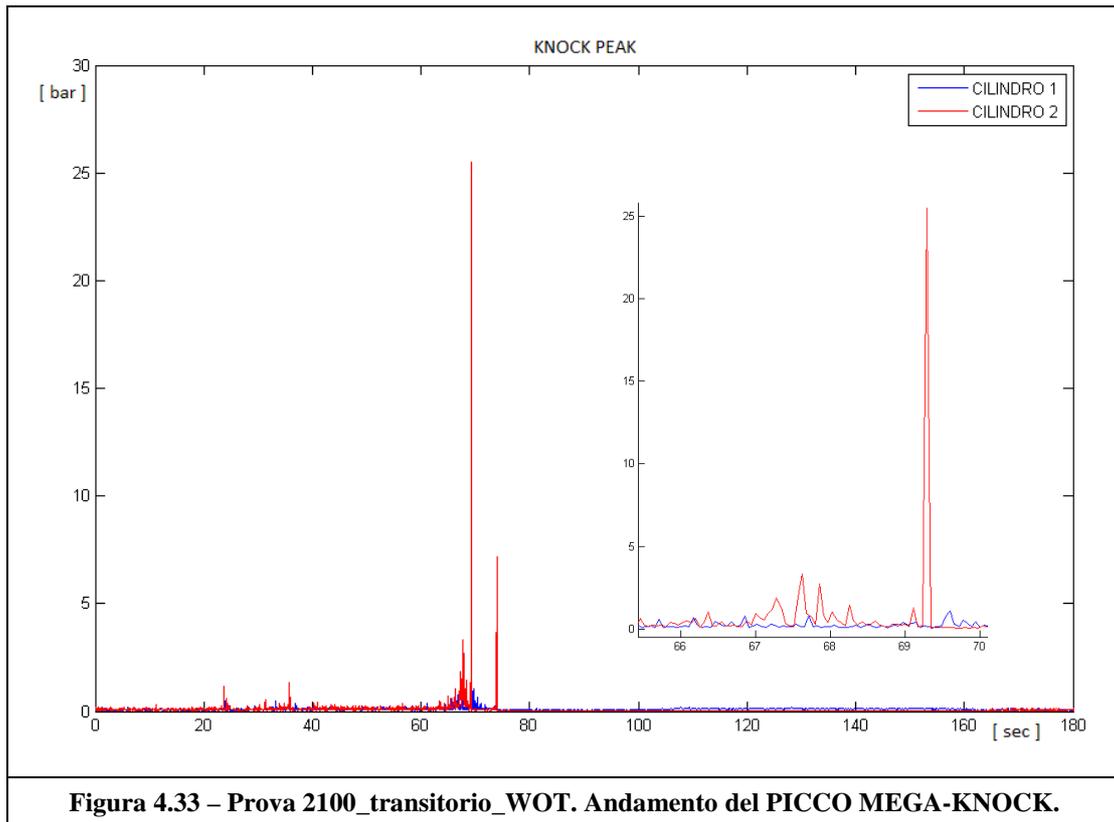
termini di risposta, sia in termini di riduzione dei consumi (figura 4.31 e 4.32).



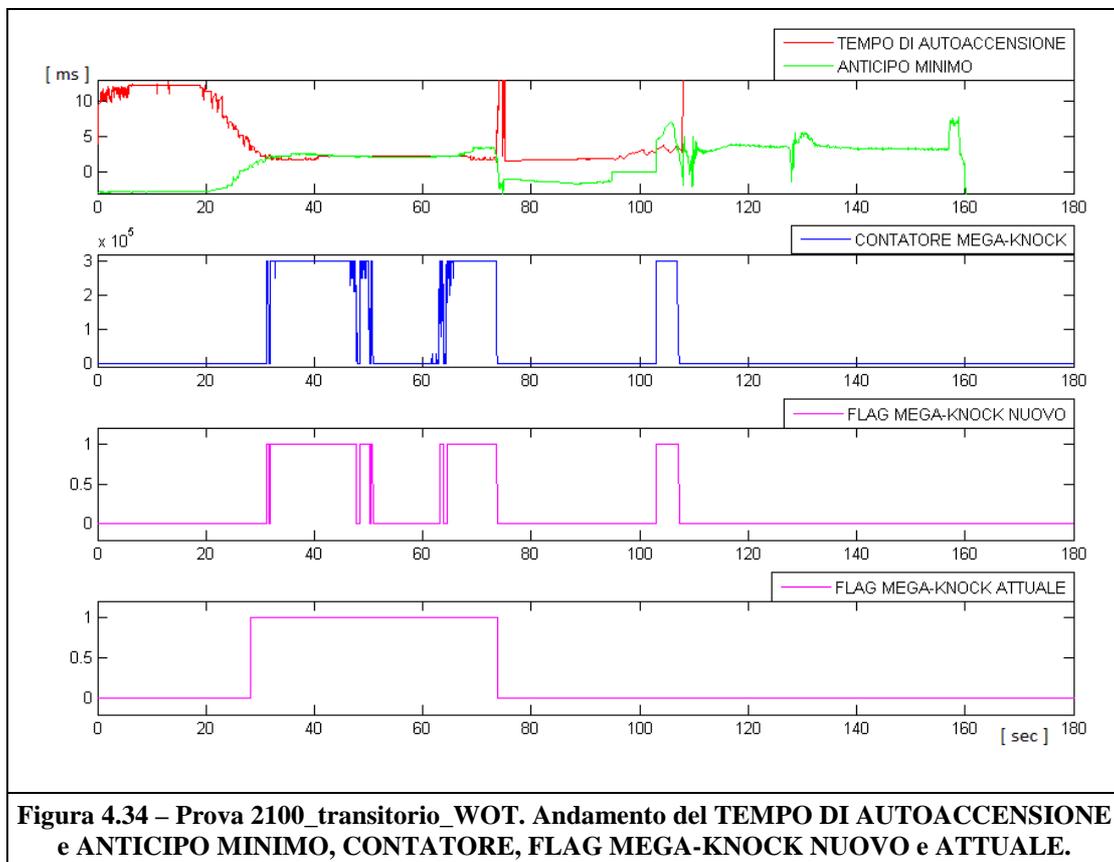
« 2100\_transitorio\_WOT »

Anche in questa prova sono ben visibili alcuni picchi di lieve detonazione seguiti da preaccensione (figura 4.33).

L’algoritmo attuale alza il FLAG a seguito dei primi episodi di detonazione, così come il nuovo algoritmo, ed entrambi lo abbassano dopo l’evento di preaccensione, con l’unica differenza che il nuovo algoritmo nella parte centrale (tra i 50 e i 60 secondi di simulazione), nella quale non vi è traccia di alcun fenomeno indesiderato, disattiva giustamente il FLAG, portando ancora una volta un liete vantaggio in termini di consumi (figura 4.34).

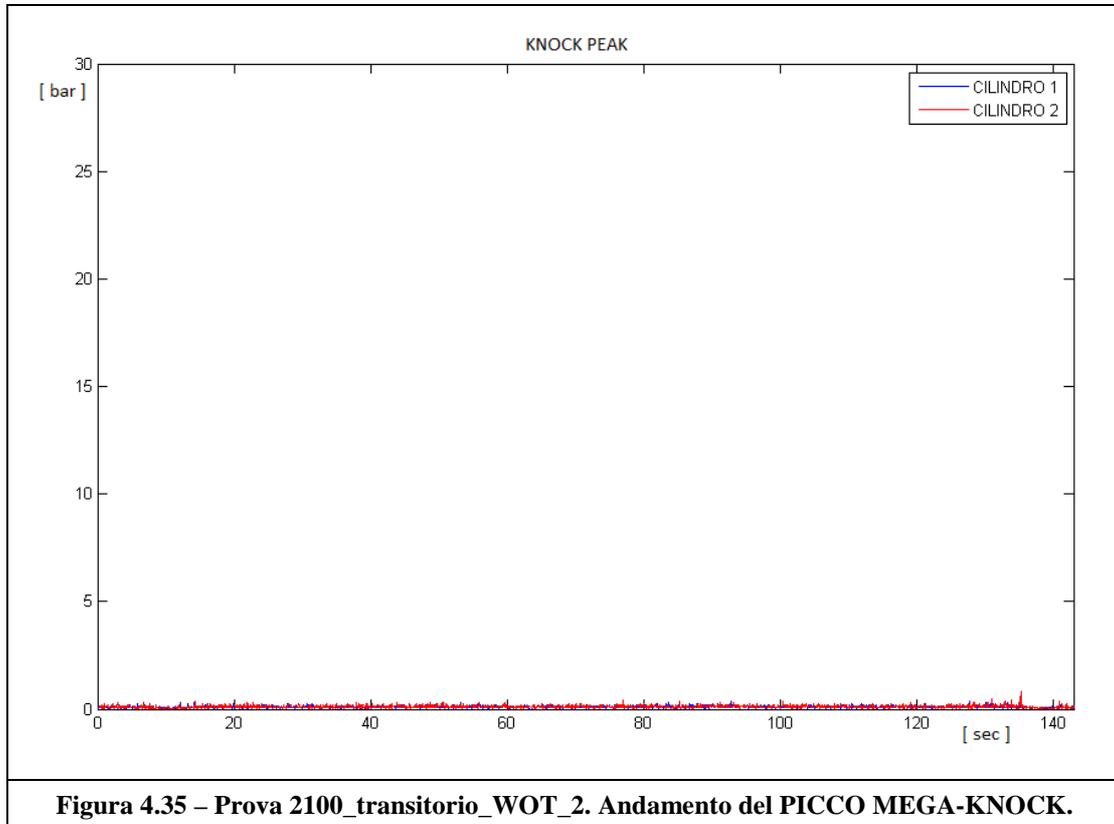


**Figura 4.33 – Prova 2100\_transitorio\_WOT. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK.**



**Figura 4.34 – Prova 2100\_transitorio\_WOT. Andamento del TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO, CONTATORE, FLAG MEGA-KNOCK NUOVO e ATTUALE.**

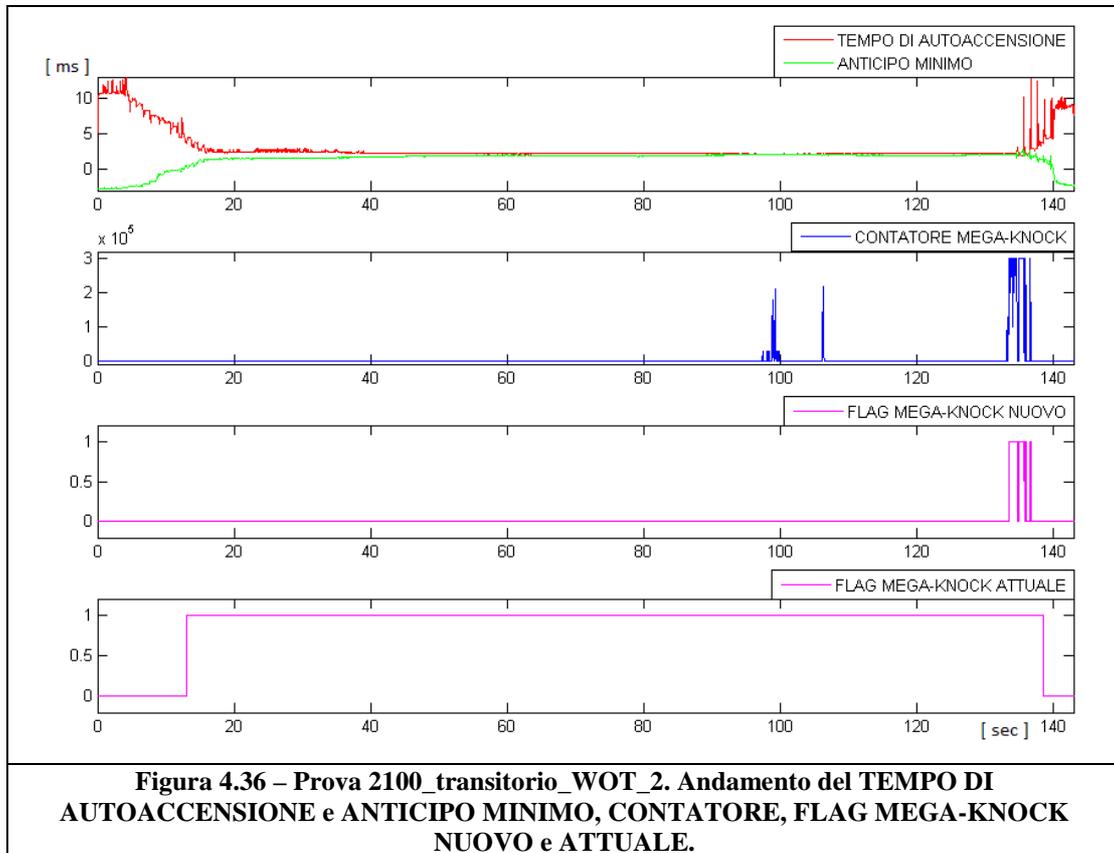
« 2100\_transitorio\_WOT\_2 »



In questa prova si vedono i primi risultati nettamente migliorativi. Dal grafico in figura 4.35 si vede che siamo chiaramente in condizioni tranquille, nessuna presenza di fenomeni indesiderati.

Questo si traduce in una situazione di “riposo” del FLAG che non dovrebbe in alcun modo muoversi. E qui abbiamo due situazioni completamente contrastanti (figura 4.36): l’algoritmo attuale sente di essere in condizioni critiche (sempre in relazione alle grandezze oggetto dell’algoritmo e alle tabella calibrate presenti al suo interno) e alza erroneamente il FLAG sin dai primi secondi di simulazione; si comporta correttamente il nuovo algoritmo, che “sente” di essere in condizioni tranquille e giustamente non alza il FLAG (a parte negl’ultimi secondi

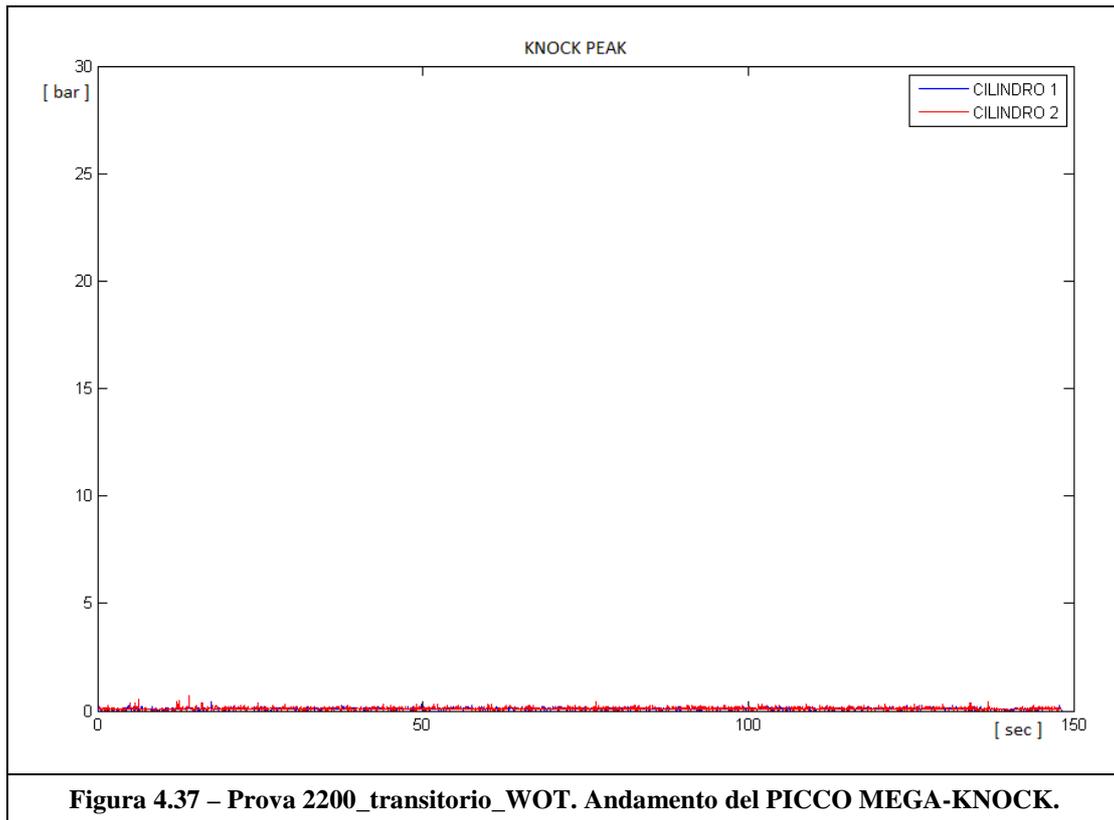
di transitorio in cui si verifica un problema con la stima di temperatura, falsando i risultati).



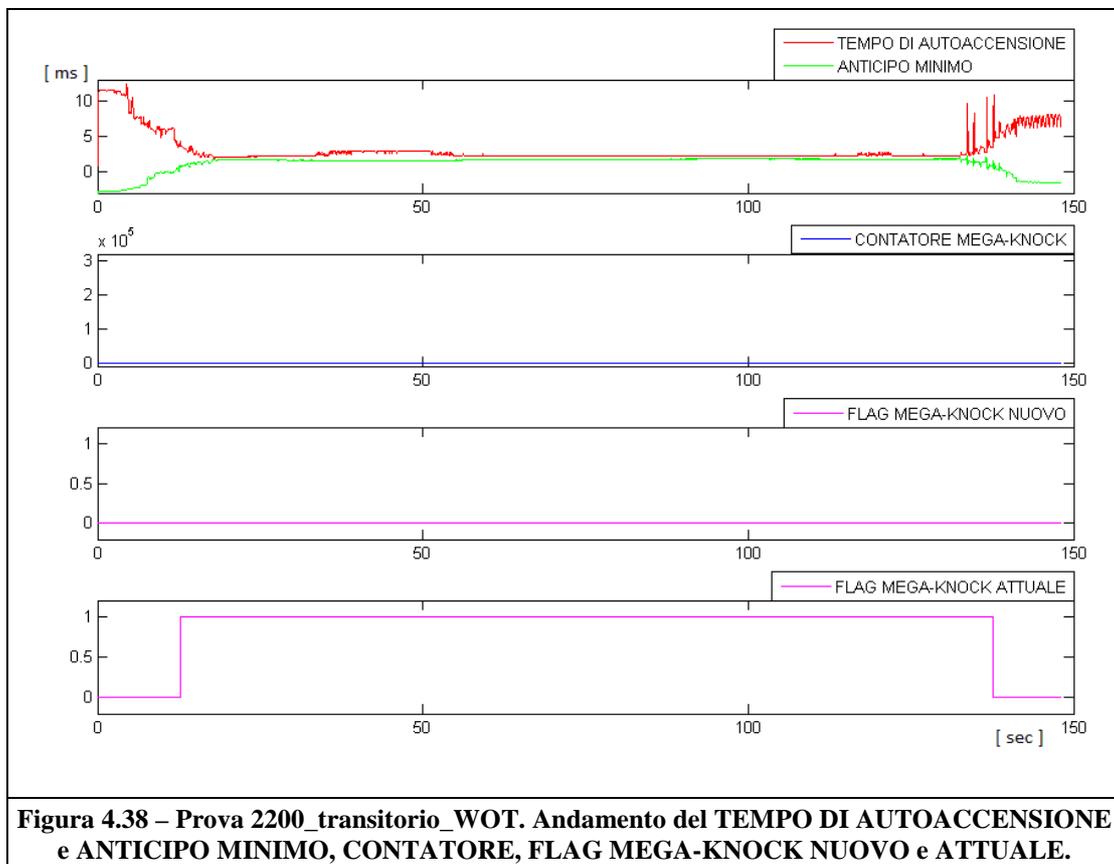
« 2200\_transitorio\_WOT »

Altra prova nettamente positiva. Dal grafico in figura 4.37 si vede chiaramente la totale assenza di fenomeni indesiderati.

Come la prova precedente, anche qui abbiamo due comportamenti diversi: il vecchio algoritmo stima di essere in condizioni critiche e alza il FLAG appena terminato il transitorio di carico, abbassandolo durante il transitorio opposto, ovviamente in maniera errata proprio per la non presenza di fenomeni indesiderati. Il nuovo algoritmo risponde invece in maniera ottimale, stimando di non essere in condizioni critiche e quindi lasciando disattivata la strategia (figura 4.38).

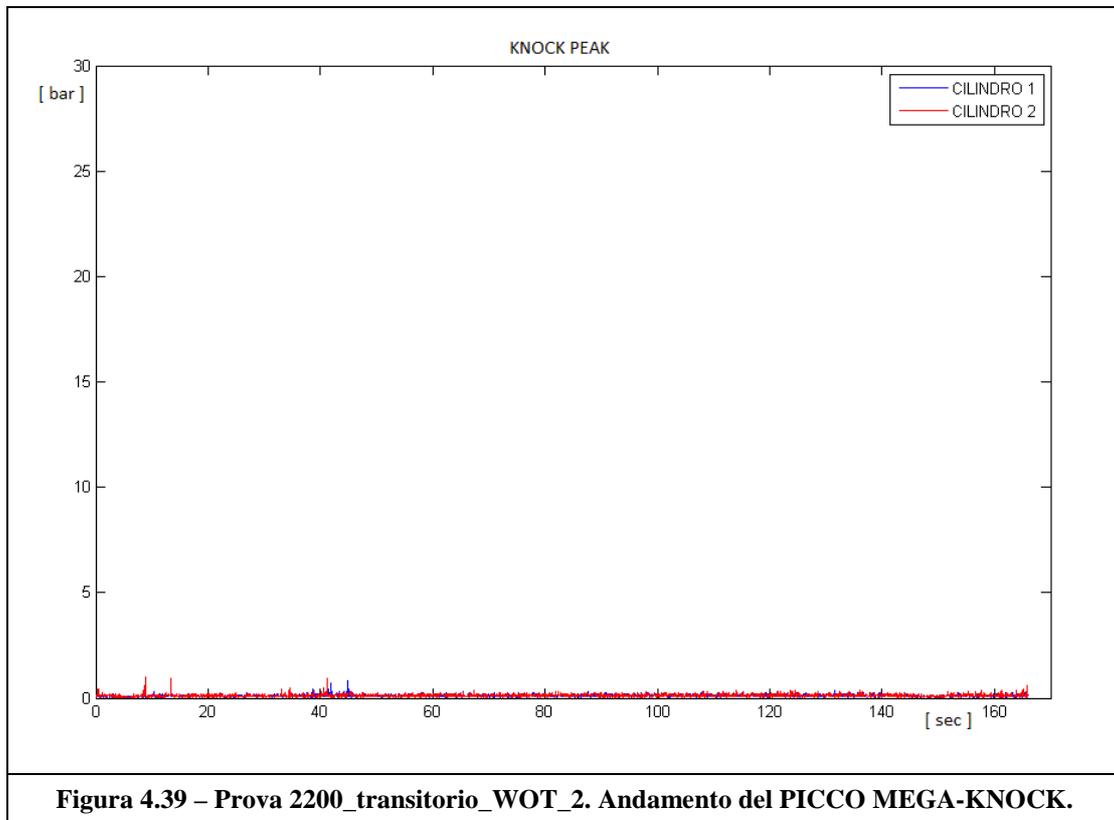


**Figura 4.37 – Prova 2200\_transitorio\_WOT. Andamento del PICCO MEGA-KNOCK.**



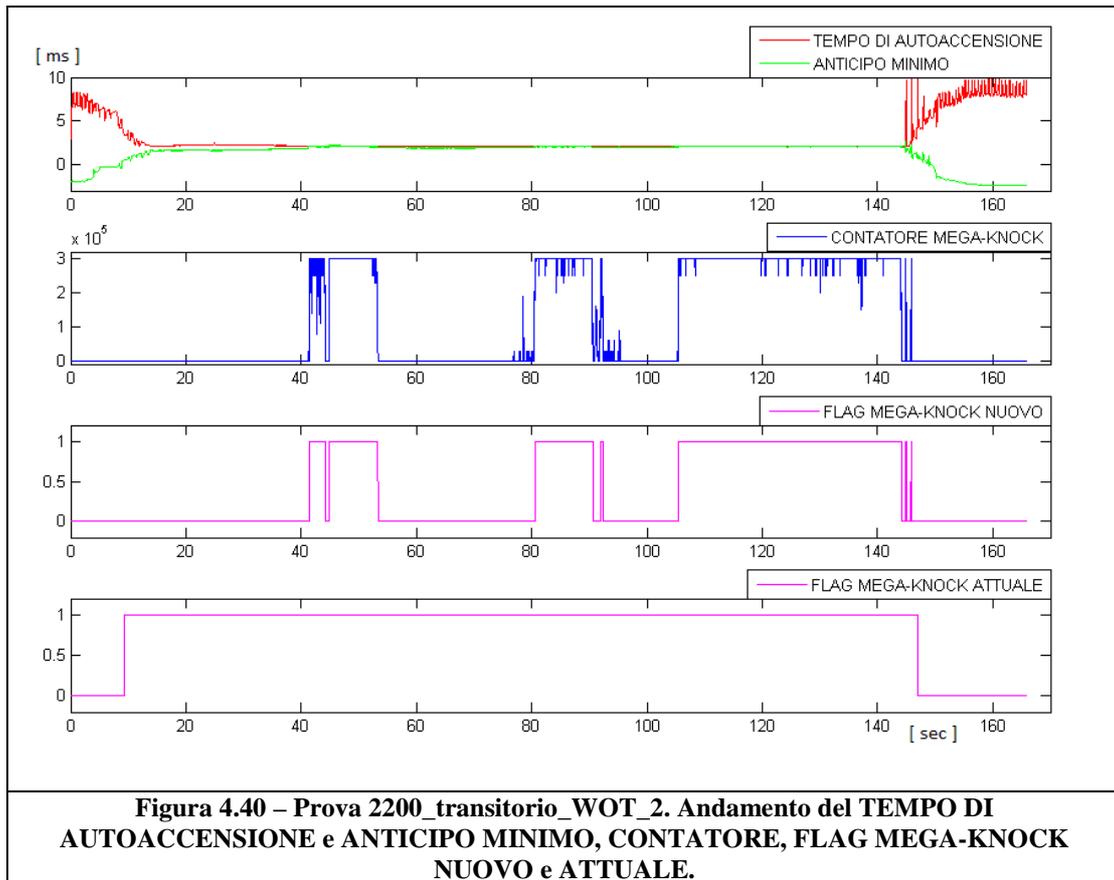
**Figura 4.38 – Prova 2200\_transitorio\_WOT. Andamento del TEMPO DI AUTOACCENSIONE e ANTICIPO MINIMO, CONTATORE, FLAG MEGA-KNOCK NUOVO e ATTUALE.**

« 2200\_transitorio\_WOT\_2 »



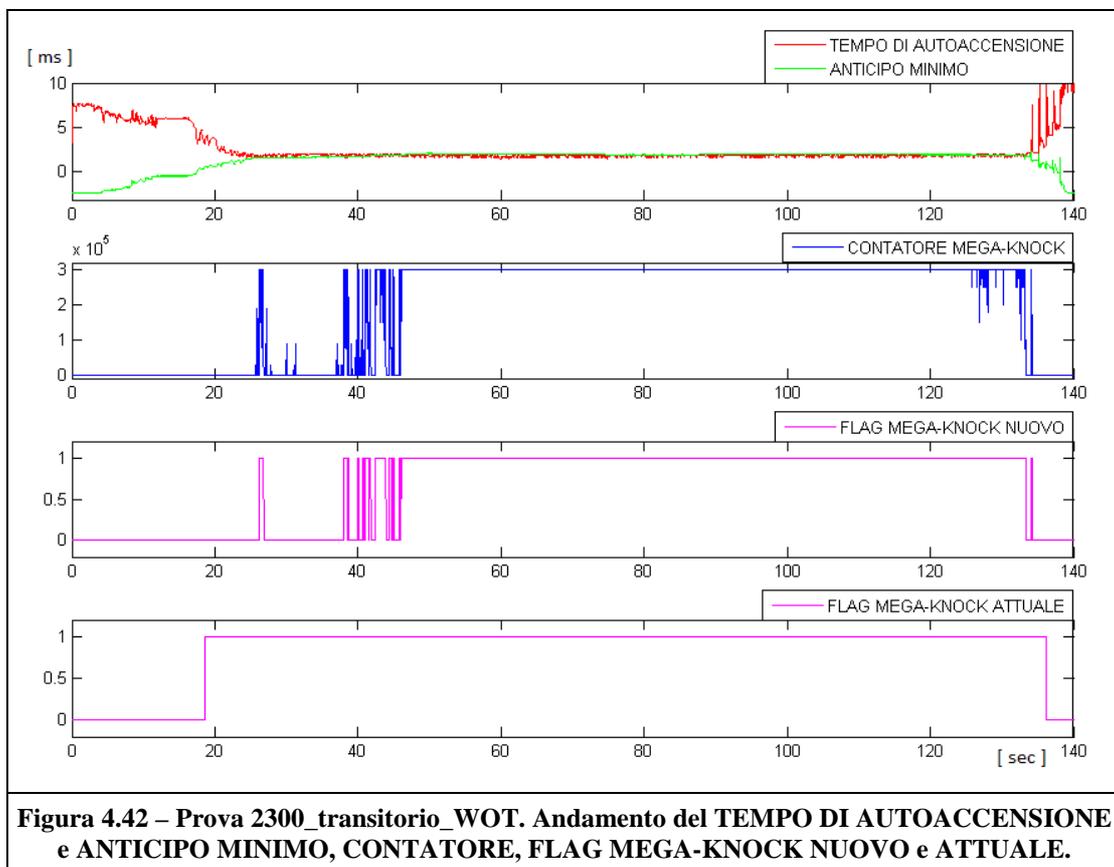
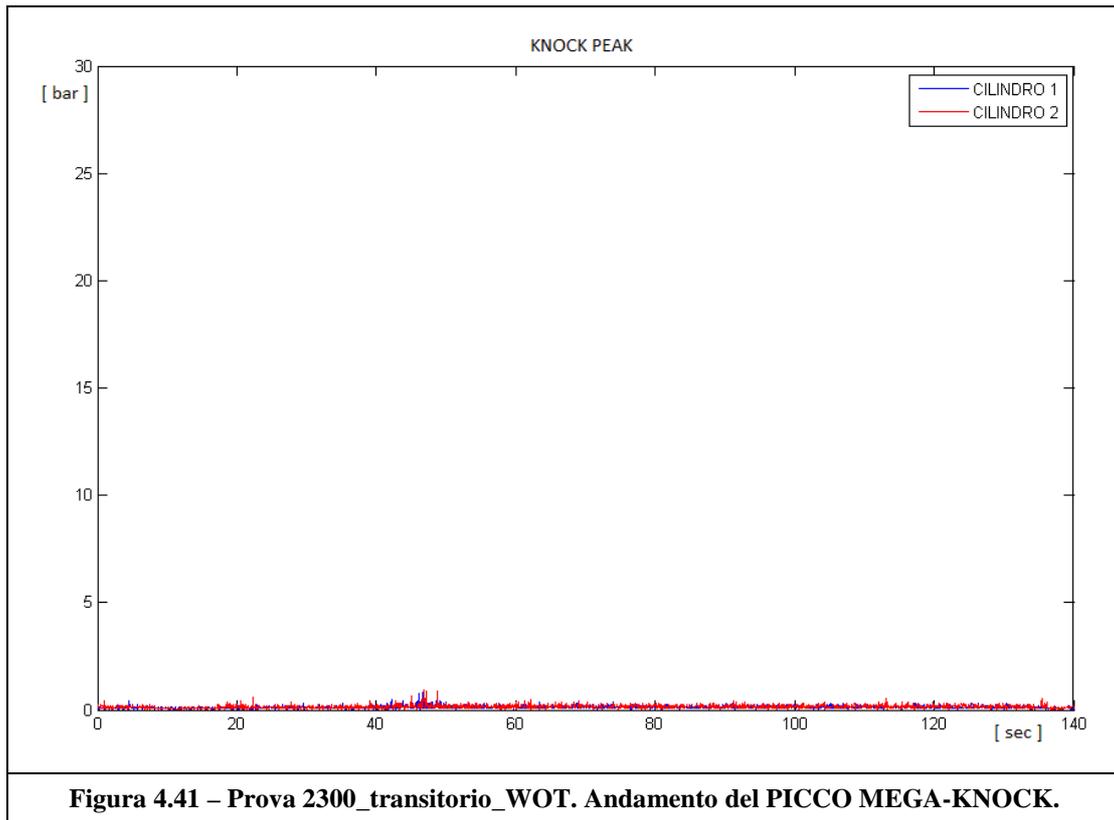
In figura 4.39 non si apprezza niente di rilevante se non qualche lievissima detonazione nella parte iniziale. Un grafico come quello raffigurato qui sopra lascia presagire una totale inerzia da parte dell’algoritmo in termini di attivazione della strategia, e invece, forse proprio quei lievi fenomeni di detonazione, alterano le condizioni in camera portandole in una probabile zona critica (probabile perché effettivamente poi non si verifica nessuna preaccensione e perché i due fenomeni indesiderati non sono propriamente collegati fra loro se non in statistica). Questo fa sì che la strategia del nuovo algoritmo venga attivata per alcuni intervalli di tempo per poi essere di nuovo disattivata. Questo comportamento potrebbe anche essere stato causato da un altro fattore: è presente in centralina un modello per il controllo della detonazione che, basandosi sul segnale di un accelerometro, va a

correggere l’anticipo riducendolo, e questa riduzione può aver causato alterazioni delle condizioni in camera, arrivando in zona critica (figura 4.40). Resta comunque il fatto che l’algoritmo “nuovo” reagisce in maniera migliore rispetto all’algoritmo attuale, che alza il FLAG già dai primi istanti incrementando i consumi.

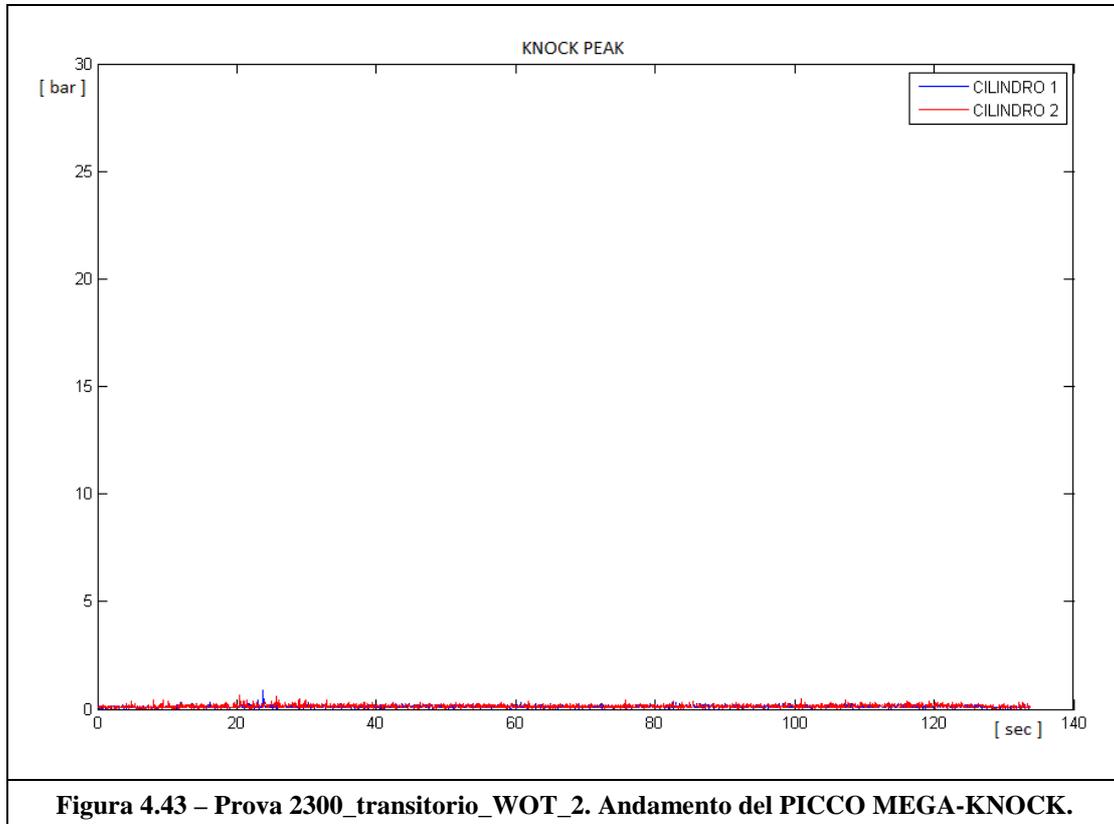


« 2300\_transitorio\_WOT »

In questa prova (figura 4.41 e 4.42), volendo si possono ripetere le stesse considerazioni della prova precedente, in cui nonostante la “calma piatta” comunque entrambi gli algoritmi stimano di trovarsi in condizioni critiche per la preaccensione e quindi alzano il FLAG (anche se il nuovo algoritmo, alzando il flag una ventina di secondi in ritardo, produce un risparmio di combustibile).

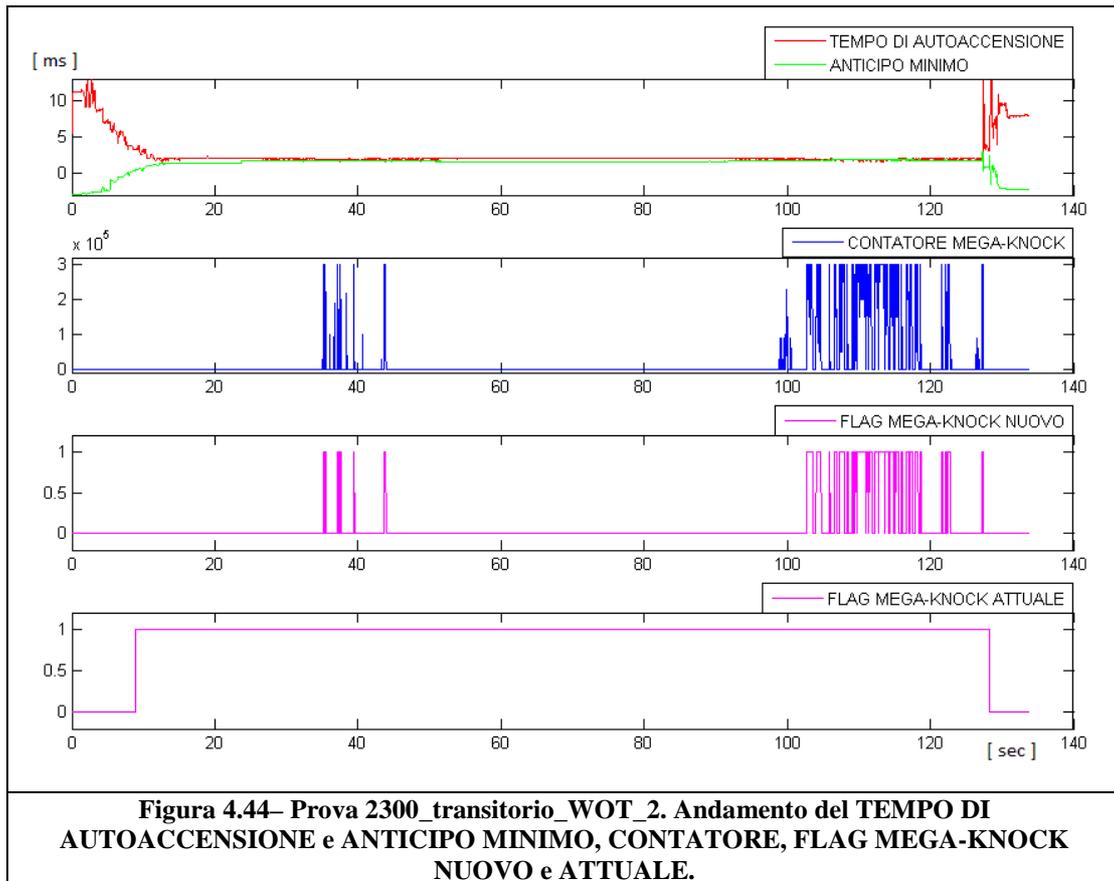


« 2300\_transitorio\_WOT\_2 »



In figura 4.43 si può notare un'altra prova in transitorio di carico caratterizzata dalla totale assenza di fenomeni anomali.

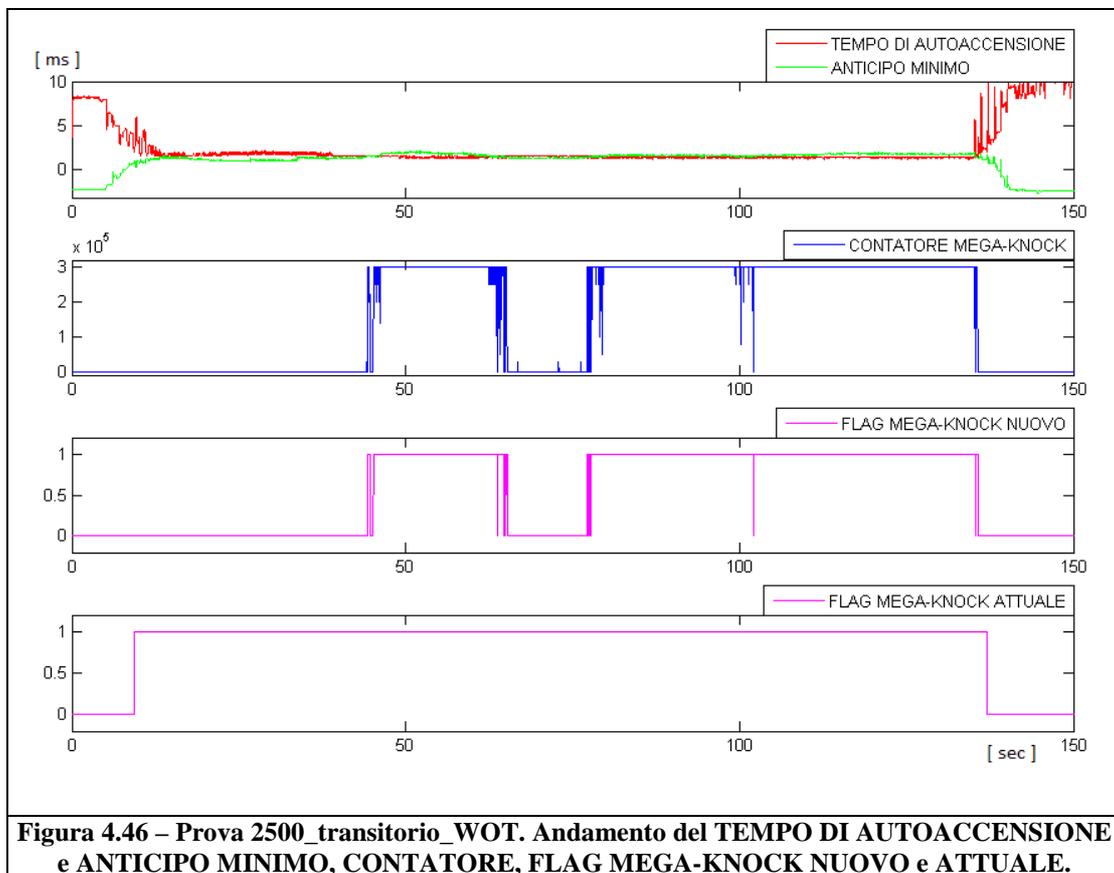
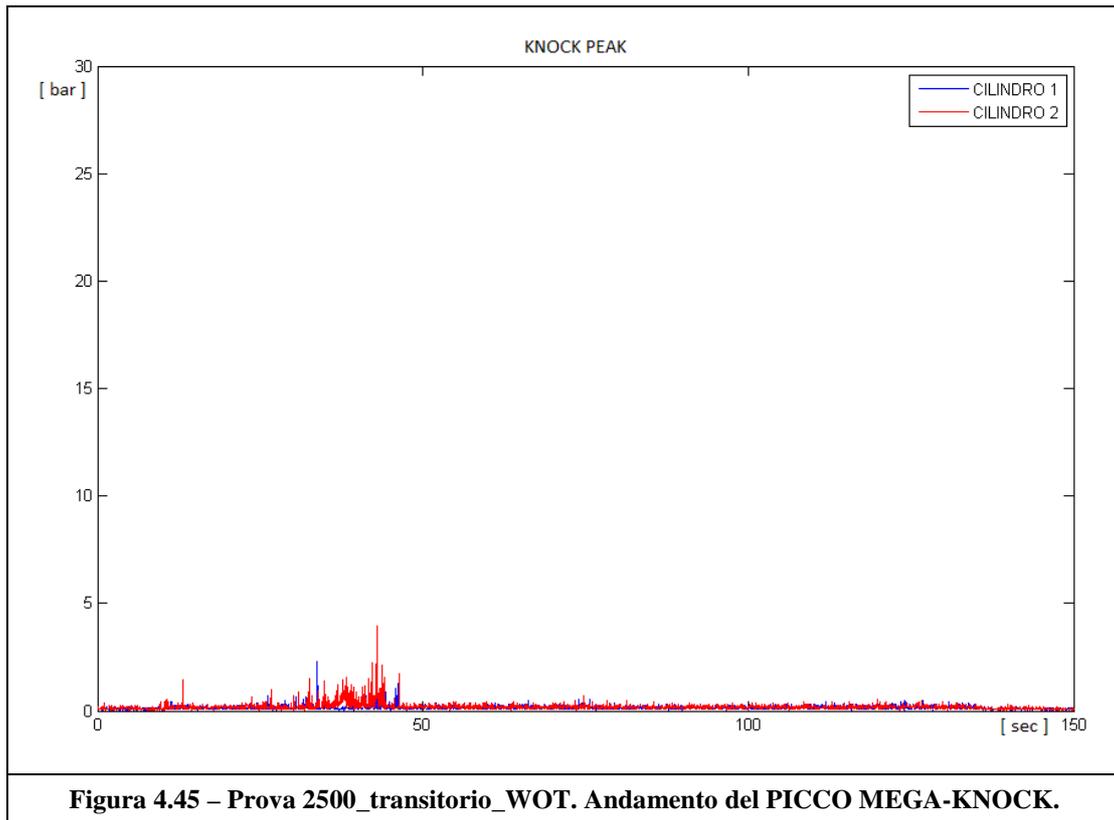
Di conseguenza nessuno dei due algoritmi dovrebbe alzare il FLAG; invece ciò che realmente succede è questo: l'attuale algoritmo, come per la maggior parte delle prove, attiva la strategia di prevenzione al termine del transitorio di carico, mantenendo la strategia attiva per tutta la parte a pieno carico (con conseguente aumento dei consumi); il nuovo algoritmo si comporta in maniera più ragionevole invece, producendo una oscillazione del FLAG dettata dal fatto che potremmo trovarci al limite fra una situazione critica e non. Ovviamente questa oscillazione porta all'attivazione a tratti della strategia di ingrassamento della miscela, ma in misura nettamente minore (figura 4.44).



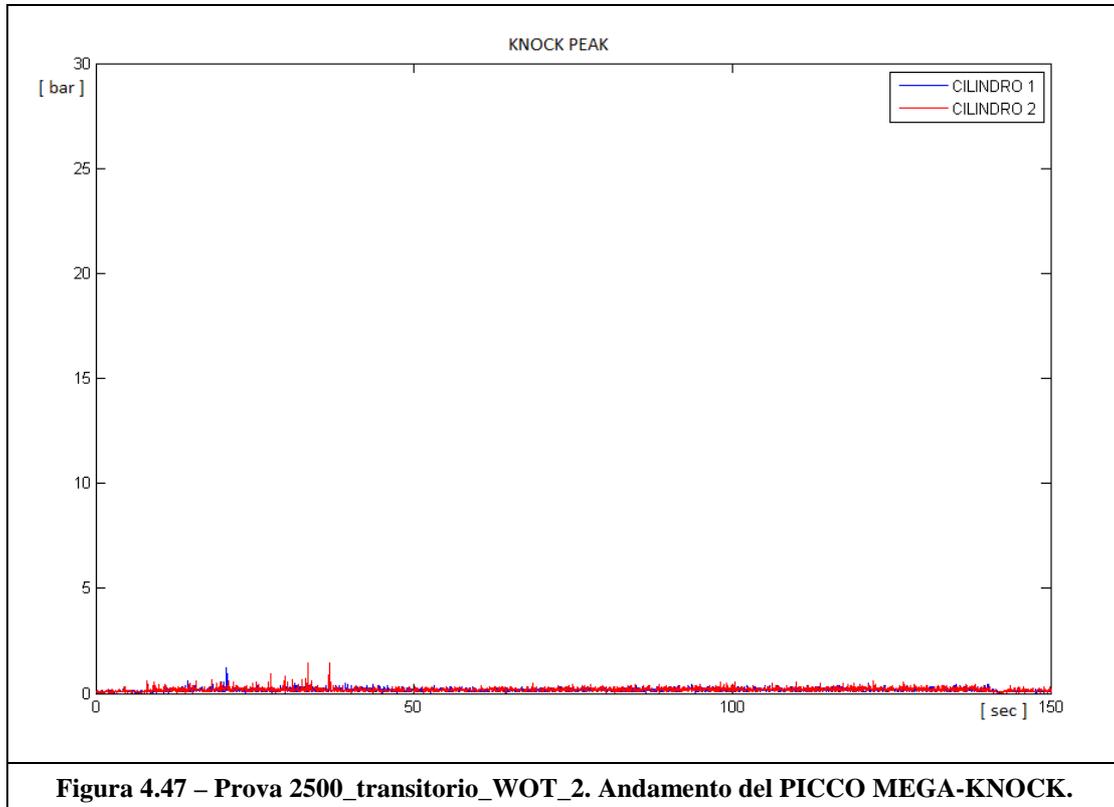
« 2500\_transitorio\_WOT »

In figura 4.45 si può notare qualche lieve fenomeno di detonazione, ma nessuna preaccensione. Anche se lievi, questi pochi eventi, e l'intervento dell'algoritmo per il controllo della detonazione, sono la probabile causa dell'attivazione della strategia (in riferimento al nuovo algoritmo), in quanto potrebbero aver portato le condizioni in camera a livelli potenzialmente critici.

Il vecchio algoritmo continua invece sulla sua quasi costante linea di azione che sfocia nell'attivazione della strategia di prevenzione (figura 4.46).

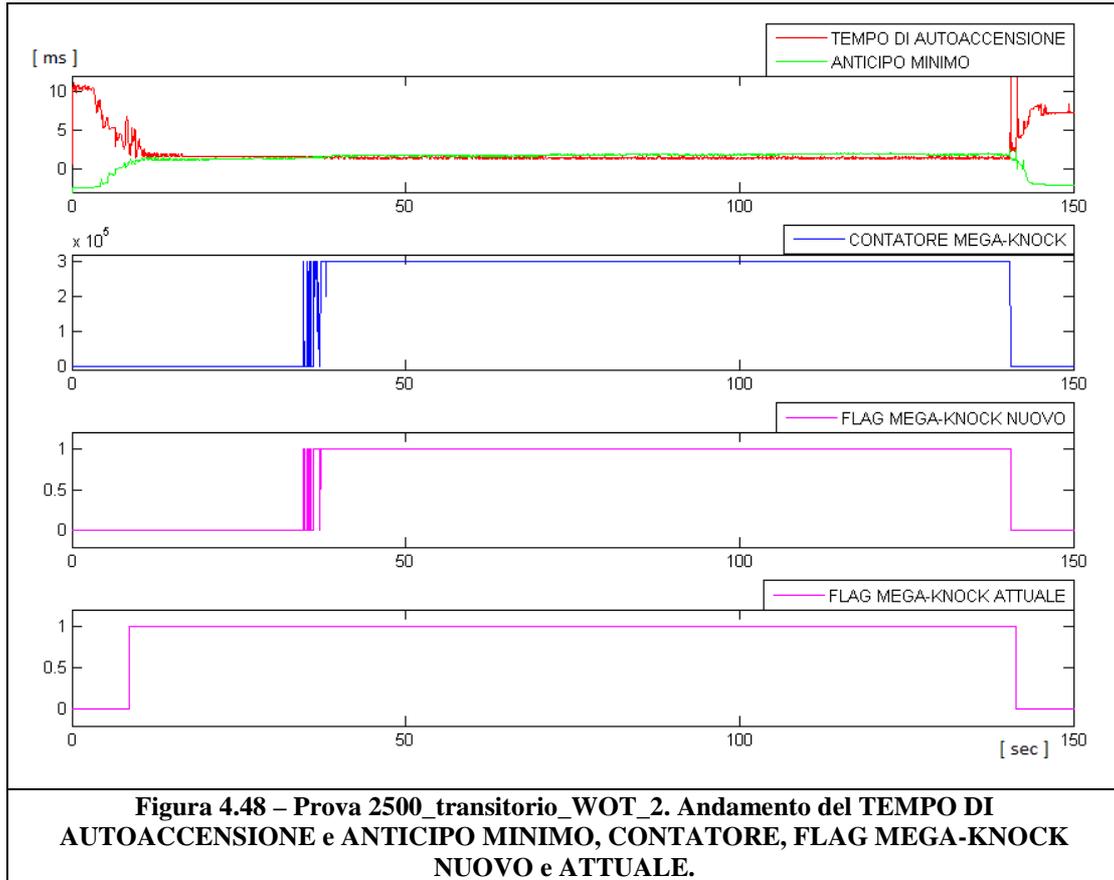


« 2500\_transitorio\_WOT\_2 »



In figura 4.47 si può notare l'ennesima prova in transitorio di carico caratterizzata dalla totale assenza di fenomeni anomali.

Di conseguenza (figura 4.48) nessuno dei due algoritmi dovrebbe attivare la strategia; invece ciò che realmente succede è questo: l'attuale algoritmo, come per la maggior parte delle prove, alza ancora il FLAG al termine del transitorio di carico, mantenendo la strategia attiva per tutta la parte a pieno carico (con conseguente aumento dei consumi); il nuovo algoritmo stima anch'esso di trovarsi in condizioni critiche per la preaccensione e quindi alza il FLAG (anche se in ritardo rispetto al precedente di una ventina di secondi, producendo un risparmio di combustibile).





# Capitolo 5

## ***Conclusioni e sviluppi futuri***

L'algoritmo per la previsione del Mega-Knock si inserisce all'interno di uno dei temi cardine dell'attuale ricerca nel campo motoristico: la minimizzazione del consumo di combustibile nei motori ad alto grado di sovralimentazione, sviluppati nell'ottica del downsizing.

La possibilità di prevedere l'innescarsi del Mega-Knock consente di ottimizzare la definizione dell'obiettivo di titolo, evitando arricchimenti non necessari (e quindi riducendo i consumi) in un range di funzionamento del motore che frequentemente viene esplorato nella normale guida su strada (basse girature ed alti carichi).

Dall'analisi dei dati acquisiti, svolta al fine di valutare potenzialità e debolezze dell'algoritmo, si è dimostrato che è possibile eseguire una previsione del fenomeno della preaccensione, pur mantenendo un certo margine di incertezza dettato dalla non assoluta possibilità di prevedere l'insorgere di questo fenomeno, che presenta elementi di casualità (esso può verificarsi in presenza di condizioni non critiche e, viceversa, non verificarsi in presenza di condizioni critiche).

Nella quasi totalità dei casi il nuovo algoritmo si dimostra comunque più performante del suo predecessore, conseguendo risultati

positivi sia in termini di precisione (nella predizione dell'insorgenza del Mega-Knock), sia in termini di consumo di combustibile.

Alla luce degli ottimi risultati fin qui ottenuti, il nuovo algoritmo sviluppato nell'ambito di questo lavoro sembra essere un ottimo candidato per la sostituzione di quello attualmente presente, e quindi l'obiettivo oggetto di questa tesi, prefissato all'inizio dell'attività, può ritenersi raggiunto in maniera più che soddisfacente.

Per ciò che riguarda gli sviluppi futuri, l'algoritmo sviluppato durante la tesi verrà ulteriormente testato al banco motore ed in vettura e sarà parte di un sistema di controllo motore che prossimamente Magneti Marelli metterà in produzione.

Successivamente l'algoritmo potrà essere ulteriormente irrobustito evolvendo la catena di calcolo che produce la stima della temperatura della miscela a fine fase compressione, seguito da un calibrazione più raffinata delle grandezze in gioco: un maggior grado di confidenza sulla robustezza dell'algoritmo assicurerà la possibilità di spingersi verso l'utilizzo di un titolo "magro" (o comunque vicino allo stechiometrico) ed ottenere prestazioni ancora più performanti nella continua sfida per la riduzione dei consumi.

---

# *Bibliografia*

- [1] Giancarlo Ferrari, “*Motori A Combustione Interna*”, Il Capitello, Torino, 2001.
- [2] Heywood, “*Internal Combustion Engine Fundamentals*”, Mcgraw-Hill, 1988.
- [3] Gian Marco Bianchi, “*Appunti Del Corso Di Fluidodinamica Dei Motori Combustione Interna – Combustione In Motori Ad Accensione Comandata*”, 2007.
- [4] Cinzio Arrighetti, “*Appunti del corso di Macchine I – Motori a combustione interna*”, 2007.
- [5] E. Winklhofer, A. Hirsch, P.Kapus, M. Kortschak, H. Philipp. “*TC GDI Engines at Very High Power Density – Irregular Combustion and Thermal Risk*”. SAE Technical Paper 2009-24-0056.
- [6] Douaud, A. M. and Eyzat, P. “*Four-Octane-Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of Fuels and Engines*”, SAE 780080, SAE Transactions, v87, 1978.
- [7] C. Elmqvist, F. Lindström and H. E. Ångström, B. Grandin, G. Kalghatgi. “*Optimizing Engine Concepts by Using a Simple Model for Knock Prediction*”, SAE 2003-01-3123.
- [8] W.S. Wayne, N.N. Clark, C.M. Atkinson,. "A Parametric Study of Knock Control Strategies for a Bi-Fuel Engine", SAE Technical Paper Series, SAE 980895, 1998.
- [9] F. Lindström. “*Empirical Combustion Modeling in SI Engines*”. Licentiate Thesis, KTH Department of Machine Design, 2005.

- [10] C. Elmqvist-Möller. “*1-D Simulation of Turbocharged SI Engines – Focusing on a New Gas Exchanged System and Knock Prediction*”. Licentiate Thesis, KTH Department of Machine Design, 2006.
- [11] R. Worret, S. Bernhardt, F. Schwarz, and U. Spicher. “*Application of Different Cylinder Pressure Based Knock Detection Methods in Spark Ignition Engines*”. SAE Technical Paper Series No. 2002-01-1668, 2002.
- [12] Enciclopedia Virtuale Wikipedia.
- [13] W. P. Attard, E. Toulson, H. Watson, F. Hamori. “*Abnormal Combustion including Mega Knock in a 60% Downsized Highly Turbocharged PFI Engine*”. SAE Technical Paper 2010-01-1456.