

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 M

**SVILUPPO E VALIDAZIONE SPERIMENTALE DI
STRATEGIE PER LA DIAGNOSI DELLA SONDA
LAMBDA A VALLE CATALIZZATORE**

Tesi di Laurea di:
JACOPO BUCCHI

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ing. NICOLÒ CAVINA

Correlatori:
Ing. STEFANO SGATTI
Ing. LUIGI DE LUCA
Ing. LUCA BETTOLI
Ing. ENRICO CORTI
Chiar.mo Prof. Ing. DAVIDE MORO

Sessione III

Anno Accademico 2010-2011

Indice

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Introduzione | 1 |
| | |
| Capitolo 1 – Emissioni, normativa e sonda lambda | 3 |
| ➤ 1.1 – L’inquinamento atmosferico e le emissioni inquinanti | 3 |
| ➤ 1.2 – Cicli di omologazione | 5 |
| ➤ 1.3 – Storia della normativa | 9 |
| ➤ 1.4 – La normativa EOBD (European On Board Diagnostic) | 11 |
| ▪ 1.4.1 – <i>Type V Test (endurance test)</i> | 17 |
| ➤ 1.5 – La sonda lambda | 19 |
| ▪ 1.5.1 – <i>HEGO (Heated Exhaust Gas Oxygen)</i> | 20 |
| ▪ 1.5.2 – <i>UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen)</i> | 22 |
| | |
| Capitolo 2 – Sonda lambda nella diagnosi catalizzatore | 25 |
| ➤ 2.1 – Il catalizzatore trivalente | 25 |
| ➤ 2.2 – L’Oxygen Storage Capacity (OSC) | 29 |
| ➤ 2.3 – Strategia di diagnosi catalizzatore | 30 |
| | |
| Capitolo 3 – Analisi e caratterizzazione sperimentale delle transizioni della sonda lambda | 37 |
| ➤ 3.1 – Dinamiche della sonda lambda a valle catalizzatore | 37 |
| ➤ 3.2 – Modalità di spegnimento cilindri (cut-off) | 41 |
| ➤ 3.3 – Studio dei tempi caratteristici del segnale della sonda | 43 |
| ➤ 3.4 – Caratterizzazione influenza del carico, regime e marcia | 47 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ➤ 3.5 – Ottimizzazione della frequenza di campionamento del segnale in tensione della sonda | 53 |
| ➤ 3.6 – Conclusioni fase sperimentale di caratterizzazione | 55 |
| Capitolo 4 – Scelta e ottimizzazione dell'indice di detezione . | 57 |
| ➤ 4.1 – Indice base | 57 |
| ▪ 4.1.1 – <i>Indici base ottenuti con sonda e catalizzatore nuovi</i> | 59 |
| ▪ 4.1.2 – <i>Indici base ottenuti con sonda e catalizzatore invecchiati</i> | 63 |
| ➤ 4.2 – Analisi di sensitività alla portata d'aria | 68 |
| ▪ 4.2.1 – <i>Normalizzazione rispetto all'integrale della portata d'aria</i> | 69 |
| ▪ 4.2.2 – <i>Normalizzazione rispetto alla media della portata d'aria</i> | 70 |
| ➤ 4.3 – Introduzione della soglia dinamica | 74 |
| Capitolo 5 – Elaborazione del modello diagnostico | 77 |
| ➤ 5.1 – Struttura del modello | 77 |
| ➤ 5.2 – Schedulatore | 79 |
| ➤ 5.3 – Abilitazione strategia naturale | 80 |
| ➤ 5.4 – Abilitazione strategia forzata | 83 |
| ➤ 5.5 – Calcolo e gestione della soglia dinamica | 85 |
| ➤ 5.6 – Macchina di diagnosi | 92 |
| ➤ 5.7 – Blocchi ausiliari | 98 |
| ▪ 5.7.1 – <i>Gestione del tempo rilascio pedale</i> | 98 |
| ▪ 5.7.2 – <i>Comunicazione al gestore diagnostico</i> | 99 |
| Capitolo 6 – Simulazioni e test di validazione della strategia . | 101 |
| ➤ 6.1 – Introduzione all'attività | 101 |
| ➤ 6.2 – Risultati della diagnosi | 102 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| ▪ 6.2.1 – <i>Evoluzione della soglia dinamica</i> | 102 |
| ▪ 6.2.2 – <i>Evoluzione della macchina di diagnosi</i> | 103 |
| ➤ 6.3 – <i>Dispersione degli indici di detezione</i> | 106 |
| ▪ 6.3.1 – <i>Dispersione indici delle acquisizioni a disposizione</i> | 107 |
| ▪ 6.3.2 – <i>Dispersione indici sulle nuove acquisizioni</i> | 108 |
| ➤ 6.4 – <i>Diagnosi sul ciclo ECE-EUDC</i> | 111 |
| ➤ 6.5 – <i>Auto-calibrazione delle soglie FT ed ST</i> | 113 |
| | |
| Conclusioni e sviluppi futuri | 119 |
| | |
| Bibliografia | 121 |

Introduzione

La presente tesi, sviluppata presso la Magneti Marelli Powertrain S.p.A. di Bologna, si occupa dello sviluppo di una strategia destinata al riconoscimento del malfunzionamento della sonda lambda posizionata a valle catalizzatore di un motore endotermico alternativo a combustione interna ad accensione comandata.

Le normative antinquinamento impongono ai costruttori limiti sempre più stringenti sulle emissioni e ormai, da molti anni, vi è anche l'obbligo di rilevare, mediante un sistema di autodiagnosi a bordo del veicolo, i componenti del sistema controllo motore in stato di avaria o invecchiamento. In particolare, la normativa richiede la diagnosi di quei componenti, il cui malfunzionamento produce un innalzamento delle emissioni inquinanti al di sopra delle soglie imposte sul ciclo di riferimento ECE-EUDC.

Il segnale in tensione del sensore di ossigeno posizionato a valle catalizzatore ed acquisito dalla centralina, viene attualmente utilizzato nella diagnosi del principale componente del sistema di abbattimento emissioni: il catalizzatore. Questa considerazione serve a giustificare la necessità di eseguire la diagnosi del sensore in esame per assicurarci una corretta stima dell'efficienza del catalizzatore. Diventa quindi indispensabile disporre di un algoritmo diagnostico per monitorare lo stato di degrado della sonda lambda a valle catalizzatore.

La dissertazione è stata organizzata in capitoli strutturati come segue:

- *Capitolo I:* Storia della normativa ed attuali richieste in ambito di omologazione per diagnosi on board. Richiami teorici sul funzionamento della sonda lambda.
- *Capitolo II:* Strategia di diagnosi del catalizzatore attualmente implementata, con particolare attenzione alle modalità di utilizzo del segnale della sonda lambda a valle catalizzatore.
- *Capitolo III:* Studio e analisi delle attività sperimentali volte all'identificazione della strategia di diagnosi della sonda e alle condizioni di abilitazione della stessa.
- *Capitolo IV:* Ottimizzazione dell'indice di detezione scelto come risultato della diagnosi e studi di sensitività su nuovi indici candidati alla sostituzione della versione base.
- *Capitolo V:* Implementazione del modello di diagnosi in Simulink e descrizione della struttura e delle funzionalità dei blocchi che lo costituiscono.
- *Capitolo VI:* Risultati ottenuti dall'attività sperimentale di validazione del modello.

Un ultimo capitolo riassume i risultati ottenuti durante l'attività di stage e propone alcuni spunti per eventuali sviluppi futuri sul modello.

Capitolo 1

Emissioni, normativa e sonda lambda

1.1 – L'inquinamento atmosferico e le emissioni inquinanti

Sempre maggiore importanza sta assumendo, all'interno delle nostre società, l'attenzione all'ambiente e all'impatto che l'attività umana ha sull'ecosistema. La crescente sensibilizzazione verso le problematiche ambientali ha portato alla ricerca di uno sviluppo che possa coniugare le esigenze quotidiane con la tutela dell'ambiente. Tra i principali possibili effetti dell'inquinamento atmosferico su scala internazionale ricordiamo "l'effetto serra" prodotto dalle crescenti emissioni di anidride carbonica, la distruzione di boschi e foreste ad opera delle "piogge acide", derivanti dalle crescenti emissioni di composti chimici a prevalente reazione acida (come gli ossidi di azoto e gli ossidi di zolfo), o infine, ma non ultimo come importanza, il cosiddetto "buco dell'ozono", cioè l'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico a causa delle emissioni di idrocarburi.

La causa principale dell'inquinamento atmosferico delle aree urbane è da ricondursi ai gas di scarico degli autoveicoli che concorrono, almeno nelle realtà più evolute, ad un maggiore contributo rispetto al riscaldamento domestico e alle attività industriali e/o tecnologiche.

Con il termine "emissioni", nel caso di autoveicoli, si intende tutto ciò che è contenuto nei gas di scarico di un motore a combustione interna in funzione, ossia i prodotti di combustione completa o incompleta. Durante il processo di combustione, i principali elementi che reagiscono convertendo energia chimica in energia termica e meccanica sono l'ossigeno (O₂) e l'azoto (N₂) contenuti nell'aria aspirata e l'idrogeno (H₂) e il carbonio (C) che costituiscono gli idrocarburi contenuti nella benzina. Se i prodotti della

combustione fossero vapor d'acqua (H_2O), anidride carbonica (CO_2) e azoto (N_2), cioè sostanze considerate non direttamente dannose per l'ambiente e per l'uomo, l'autoveicolo sarebbe ritenuto non inquinante. Allo scarico però si trovano altri prodotti legati alla parziale combustione dei reagenti ed a reazioni di diversa natura avvenute sia durante, sia dopo il processo di combustione.

I principali gas inquinanti ritenuti dannosi e oggetto di limitazione dalle normative imposte dai Governi di alcuni paesi sono:

- il monossido di carbonio (CO);
- gli idrocarburi incombusti (HC);
- gli ossidi di azoto (NO_x);

Il monossido di carbonio (CO) è inodore, ha una densità simile a quella dell'aria e si forma a causa della combustione incompleta della benzina aspirata dal motore; nell'uomo causa mal di testa, vertigini ed anche morte in quanto altera la capacità del sangue di trasportare e rilasciare ossigeno ai tessuti. E' altamente tossico per gli esseri umani, anche in basse concentrazioni.

Gli idrocarburi incombusti (HC) si formano anch'essi dalla combustione incompleta della benzina; alcuni idrocarburi possono risultare cancerogeni, altri possono causare irritazioni ed altri ancora sono altamente tossici.

Gli ossidi di azoto (NO_x) comprendono il monossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO_2); le modalità di formazione di questi ossidi sono differenti, ma la quota più importante è generata dall'azoto contenuto nell'aria che, alle alte temperature raggiunte in camera di combustione, si lega con l'ossigeno. Gli ossidi di azoto risultano irritanti per le vie respiratorie, possono essere tossici, sono responsabili del "buco dell'ozono" e, se esposti alle radiazioni solari, si combinano con gli idrocarburi incombusti formando smog; una successiva reazione di questi

ossidi con l'acqua genera l'acido nitrico, uno dei responsabili del fenomeno delle "piogge acide".

L'anidride carbonica (CO₂) costituisce un prodotto ineliminabile della combustione, generato dall'ossidazione del combustibile per la conversione in energia meccanica di parte della sua energia chimica. Non è nociva né tossica per l'uomo, ma ultimamente viene considerata come un clima-alterante perché le grandi quantità prodotte dall'attività umana contribuiscono al riscaldamento globale.

I primi tre componenti della lista precedente sono, invece, in una certa quantità, eliminabili (anche se non completamente) e smaltibili attraverso un efficace sistema catalitico di trattamento dei gas di scarico, presente sulle vetture.

Tra le emissioni inquinanti ritroviamo anche composti solidi come il particolato (PM – Particulate Matter). Con questo termine s'indica l'insieme di particelle solide e liquide generate dal processo di combustione e portate in sospensione dai gas di scarico. Si tratta di particelle di carbonio su cui si sono condensati alcuni idrocarburi provenienti dal carburante e dal lubrificante. La loro pericolosità deriva dalle ridotte dimensioni, tra 0,1 e 1 µm, che ne facilita l'inalazione ed il trattenimento negli alveoli polmonari. La formazione di questo inquinante è legata ad una combustione di tipo diffusivo, tipica delle applicazioni diesel e GDI.[1]

1.2 – Cicli di omologazione

Per misurare le emissioni inquinanti di un'auto e poterle comparare con quelle di altre vetture nelle stesse condizioni d'uso (o con specifiche soglie predefinite) si utilizzano particolari test, i cosiddetti "cicli di omologazione". Tali test avvengono in apposite camere climatizzate, con il veicolo fermo e le ruote motrici collocate su speciali rulli, la cui resistenza

al rotolamento può essere regolata per simulare la potenza motrice assorbita dall'inerzia del sistema, dal rotolamento dei pneumatici e dalle resistenze aerodinamiche. La vettura viene guidata seguendo un tracciato che fissa in modo rigoroso, istante per istante, la velocità da mantenere e la marcia del cambio da utilizzare. Al terminale dell'impianto di scarico viene collegata un'attrezzatura che consente di raccogliere i gas combusti in appositi sacchi. Successivamente l'analisi chimica di questi gas permette di individuare la quantità, in grammi, di ogni elemento inquinante; tale valore viene poi rapportato alla lunghezza del percorso, ottenendo così la quantità di sostanza inquinante mediamente emessa per chilometro, espressa in g/km.

Attualmente esistono diversi cicli standard, tra cui i più importanti sono 5 e riproducono l'utilizzo medio delle vetture in Europa, Stati Uniti e Giappone.

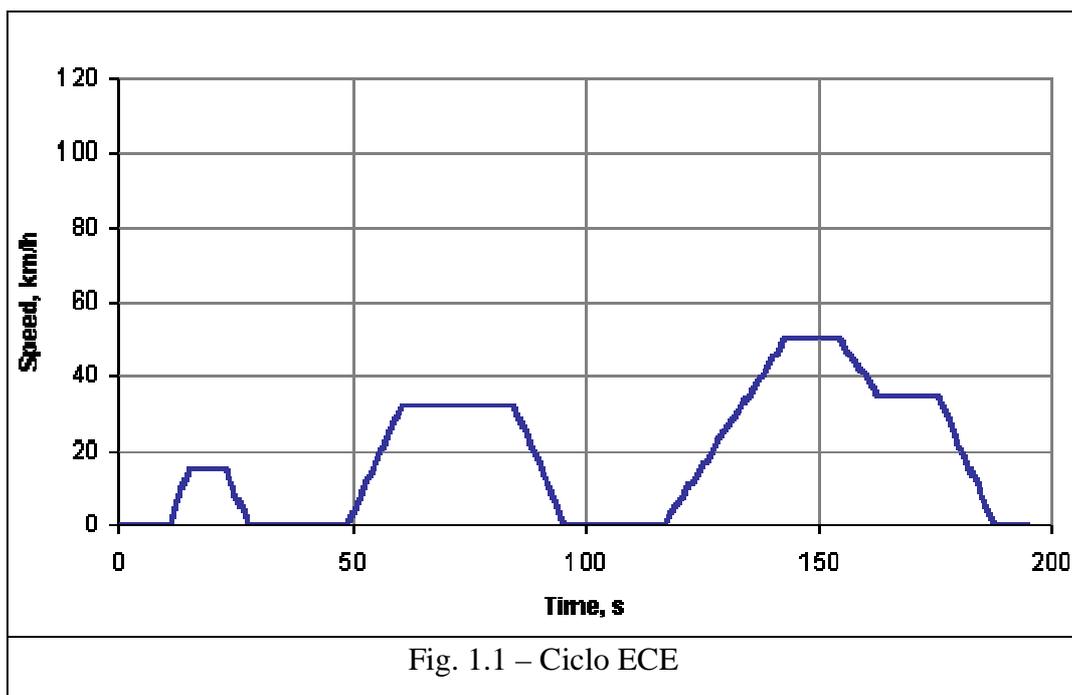
Fino a qualche tempo fa, in Europa veniva utilizzato il ciclo di omologazione ECE R15-04 che prevedeva la percorrenza di una distanza di 1013 metri da ripetere quattro volte consecutivamente, con velocità media di 18,7 Km/h, velocità massima di 50Km/h e con il motore funzionante al minimo per il 31% del tempo di prova. Per tenere conto anche del comportamento a velocità più elevate, è stato introdotto un nuovo ciclo di omologazione, il 91/441, che in pratica aggiunge al percorso precedente un tratto a maggiore velocità, così da portare la distanza totale a 11 Km, la velocità media a 32,5 Km/h e la massima a 120 Km/h.

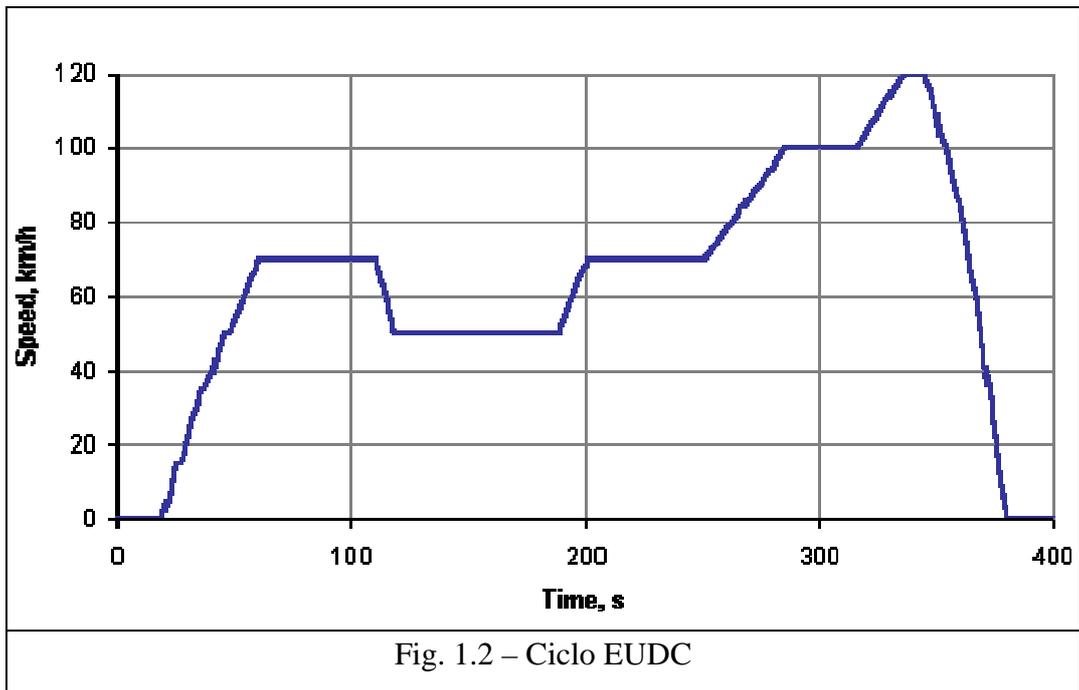
Questo ciclo viene identificato con la sigla ECE-EUDC (o NEUDC, New European Driving Cycle), dove ECE sta per "Economic Commission for Europe" e rappresenta la parte di ciclo urbano a bassa velocità, mentre EUDC sta per "Extra Urban Driving Cycle" e rappresenta la parte extra-urbana del ciclo realizzata a velocità maggiori. Il ciclo ECE 15 (Fig. 1.1),

noto anche come UDC (Urban Driving Cycle), è stato scelto per rappresentare le condizioni di guida in città; è caratterizzato da basse velocità del veicolo, bassi carichi motore e basse temperature dei gas di scarico.

Il ciclo EUDC (Fig. 1.2) è stato aggiunto dopo quattro ripetizioni del ciclo ECE 15, per simulare le condizioni di guida extraurbane con modalità di guida più aggressive e a velocità più elevate.

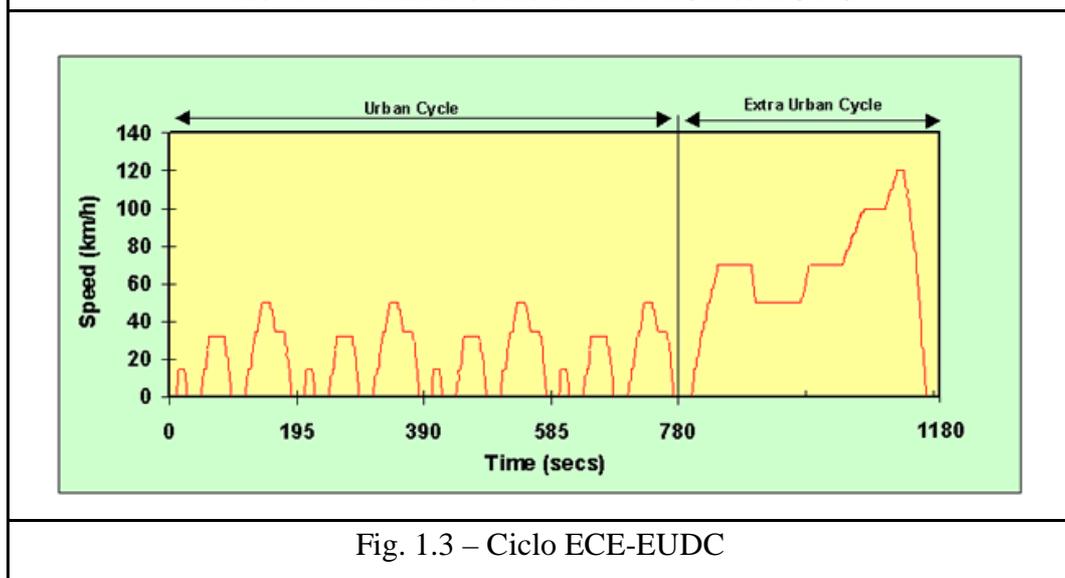
La Fig. 1.3 riporta il ciclo ECE-EUDC nel suo complesso, mentre la Tab. 1.1 riassume i parametri di entrambi i cicli, ECE ed EUDC. [9]





| Caratteristica | Unità di misura | ECE 15 | EUDC |
|------------------|-----------------|---------------|-------|
| Distanza | Km | 4×1.013=4.052 | 6.955 |
| Durata | sec | 4×195=780 | 400 |
| Velocità media | Km/h | 18.7 | 62.6 |
| Velocità massima | Km/h | 50 | 120 |

Tab. 1.1 – caratteristiche dei cicli ECE ed EUDC



1.3 – Storia della normativa

L'entità degli effetti negativi prodotti dai veicoli ha da tempo orientato le autorità governative nazionali e sovranazionali a sviluppare e perfezionare una serie di norme e regolamenti il cui obiettivo è quello di rendere sempre più compatibile l'uso di veicoli stradali con una logica di sviluppo che non produca danni irreversibili né alla collettività né all'ecosistema.

L'Unione Europea ha emanato una serie di norme caratterizzate da numeri progressivi che identificano i passaggi di adattamento per realizzare vetture sempre meno inquinanti:

- Euro I [12]

E' la direttiva che ha introdotto l'obbligatorietà del catalizzatore per l'abbattimento delle emissioni inquinanti. La rispettano tutti i veicoli immatricolati a partire dal 1 gennaio 1993. In pratica costituisce lo spartiacque tra vetture ecologiche e non.

- Euro II [13]

Rappresenta il secondo step nella corsa alla limitazione degli inquinanti ed è rispettata da tutti i veicoli immatricolati all'incirca dal '96. Un'auto Euro II produce una quantità inferiore di specie inquinanti rispetto ad una vettura Euro I e potrà continuare a circolare anche in futuro.

- Euro III [14]

Dal 1° gennaio 2001 le auto nuove possono essere immatricolate solo se rispettano la direttiva 98/69. Viene introdotta l'obbligatorietà di un sistema di autodiagnosi a bordo che segnali i malfunzionamenti di quei componenti definiti "emission relevant" cioè che incrementano le emissioni nocive (EOBD – European On Board Diagnostic). La

presenza di una spia deve segnalare che l'auto sta inquinando più del consentito. Questo obbligo vale per le vetture a benzina, mentre a quelle diesel viene dato tempo fino al 2003 per installare il sistema EOBD.

▪ Euro IV [15]

Dal 1° gennaio 2006 le auto nuove sono immatricolabili solo se rispettano il nuovo valore di soglia di inquinamento definito dalla direttiva 98/69 B. I limiti d'inquinanti concessi sul ciclo sono nettamente inferiori ed i costruttori vengono costretti a grandi sforzi per rientrare nei valori di tolleranza. Inoltre, viene stabilito che non sarà possibile aggiornare alle nuove direttive auto omologate nel rispetto di direttive precedenti.

▪ Euro V [16]

Dal 1° gennaio 2011 tutte le auto immatricolate devono rispettare questa direttiva sempre più stringente dal punto di vista delle emissioni.

| Emissioni | | | CO (g/km) | | NO _x (g/km) | | NMHC (g/km) | | HC+NO _x (g/km) | | PM (g/km) | |
|----------------------------------------------|-------|---------|--------------------------------|------|---------------------------|---|-----------------------------------|---|-------------------------------------------|------|----------------------|------|
| Tipo di motore: B = Benzina D = Diesel | | | B | D | B | D | B | D | B | D | B | D |
| Normative | | | Massa di monossido di carbonio | | Massa di ossidi di azoto | | Massa di idrocarburi non metanici | | Somma delle masse di HC e NO _x | | Massa di Particolato | |
| 1993 | 93/59 | Euro I | 2.72 | 2.72 | - | - | - | - | 0.97 | 0.97 | - | 0.14 |
| 1997 | 96/69 | Euro II | 2.2 | 1.0 | - | - | - | - | 0.5 | 0.7 | - | 0.08 |

| | | | | | | | | | | | | |
|------|--------|----------|-----|------|------|------|-------|---|---|------|--------|--------|
| 2000 | 98/69 | Euro III | 2.3 | 0.64 | 0.15 | 0.5 | 0.2 | - | - | 0.56 | - | 0.05 |
| 2005 | 98/69 | Euro IV | 1.0 | 0.5 | 0.08 | 0.25 | 0.1 | - | - | 0.3 | - | 0.025 |
| 2009 | 98/69 | Euro V | 1.0 | 0.5 | 0.06 | 0.18 | 0.068 | - | - | 0.23 | 0.005 | 0.005 |
| 2011 | 70/156 | Euro V+ | 1.0 | 0.5 | 0.06 | 0.18 | 0.068 | - | - | 0.23 | 0.0045 | 0.0045 |
| 2016 | 70/156 | Euro VI | 1.0 | 0.5 | 0.06 | 0.08 | 0.068 | - | - | 0.17 | 0.0045 | 0.0045 |

Tab. 1.2 – Limiti europei di emissione per autovetture (veicoli di peso inferiore a 2,5 t)

- Euro VI [17]

Rappresenta la normativa futura che riguarderà tutti i veicoli omologati dal 1° gennaio 2014 e tutti quelli immatricolati dal 1° Gennaio 2016.

Va precisato che con l'avvento dell'Euro III sono stati eliminati i 40 secondi di preriscaldamento catalizzatore a inizio ciclo ECE-EUDC, comportando necessariamente un aumento delle sostanze inquinanti emesse durante il ciclo. Inoltre a partire dall'Euro V è previsto un limite sulle emissioni di particolato dei motori a benzina a iniezione diretta che funzionano a miscela magra (GDI). [1,3]

1.4 – La normativa EOBD (European On Board Diagnostic)

Il veicolo, nel corso della sua vita utile, può andare incontro a malfunzionamenti di alcuni componenti o moduli, con conseguente aumento delle emissioni e superamento dei valori di soglia imposti dalla normativa di omologazione. Per questo motivo è necessario imporre degli standard per tutte le case automobilistiche per quanto riguarda la diagnosi e il riconoscimento di alcune tipologie di guasto dei sottoinsiemi “emission relevant”, cioè di quei componenti che, se non funzionanti, possono peggiorare significativamente le emissioni (catalizzatore, sonda

lambda,ecc.); per gli altri sistemi quali ad esempio airbag e climatizzatore, l'autodiagnosi invece non è standard e viene definita a piacimento da ogni costruttore automobilistico.

Dal 1988 il “California Air Resources Board” (CARB) [2] impose a tutti i veicoli a benzina un autocontrollo (OBD: On Board Diagnostic) di alcuni componenti fondamentali nella limitazione delle emissioni inquinanti. Questa richiesta faceva capo allo standard OBD-I, che costituiva il primo input normativo alla diagnostica degli apparati costituenti il veicolo. Questa prima iniziativa fu limitata dalla carenza di specifiche tecniche comuni per quanto riguardava il tipo di connettore da utilizzare per ottenere le informazioni diagnostiche dal veicolo e dalle difficoltà tecniche nell'ottenere informazioni affidabili e standardizzate riguardo le emissioni per ogni tipo di veicolo allora in commercio.

Nel 1994 venne introdotta la OBD-II [3]che andò a sostituire la precedente OBD-I, imponendo l'utilizzo di un connettore diagnostico standardizzato suggerito dalla Society of Automotive Engineers (SAE) e imponendo una serie di test diagnostici da eseguire.

Il nuovo connettore (Fig. 1.4) presenta 16 pin, alcuni dei quali con funzioni preposte costanti per tutti i veicoli (pin 4 e 5 terra, pin 16 tensione di batteria), mentre gli altri sono a discrezione del costruttore.

La normativa fornisce un elenco di parametri motoristici da controllare assieme alle modalità con cui codificarli.

La segnalazione della natura dei problemi avviene tramite codici standard “Diagnostic Trouble Codes” (DTC), che permettono di identificare e risolvere rapidamente i malfunzionamenti del veicolo. Accanto alle segnalazioni di avarie base imposte obbligatoriamente dalla normativa è possibile aggiungerne altre, a discrezione del costruttore.



Fig. 1.4 – Connettore OBD Mercedes classe A del '99
(fonte Internet)

A partire dagli anni 2000 per le omologazioni e dal 2001 per quanto riguarda le immatricolazioni dei soli veicoli a benzina, anche la Comunità Europea, con l'ingresso della Euro III, ha deciso di regolamentare

l'autodiagnosi a bordo introducendo la "European On Board Diagnostic" (EOBD) che trae origine dalla "OBD-II" concepita dagli Stati Uniti e che prevede la presenza di una spia sul quadro strumenti (MIL-Malfunction Indicator Lamp) di colore arancione che indica l'eventuale malfunzionamento dei sistemi di controllo elettronico del motore.

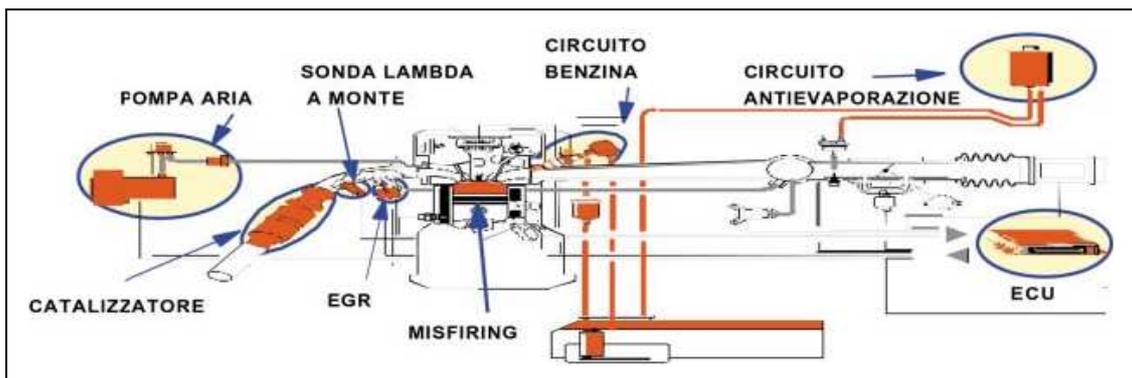


Fig. 1.5 – Principali elementi "emission relevant" oggetto di diagnosi
(fonte Magneti Marelli)

La suddetta normativa non sancisce soltanto l'obbligatorietà della segnalazione ottica dello stato di avaria, ma la estende anche alla

rilevazione del tipo di avaria in corso e all'applicazione di un'adeguata strategia di emergenza (“recovery”) volta a compensare il funzionamento difettoso assicurando una guidabilità accettabile del veicolo anche se con prestazioni ridotte. Per verificare il rispetto della normativa EOBD, l'autorità certificatrice deve accertare che nei veicoli che abbiano percorso una distanza maggiore rispetto alla Type V durability distance (che verrà trattato in seguito) il sistema OBD segnali il malfunzionamento all'utente prima che le emissioni del veicolo superino le soglie consentite, che differiscono da quelle relative all'omologazione sul ciclo ECE-EUDC.

Le Tab. 1.2 e 1.3 riportano i valori di soglia per gli idrocarburi non metanici NMHC che vengono inseriti, in sostituzione dell'intera classe degli idrocarburi, a partire dalla normativa Euro V. La scelta di non porre vincoli circa la quantità di metano si spiega tenendo conto che si tratta di un gas normalmente presente e prodotto in natura, meno dannoso per l'essere umano rispetto agli altri idrocarburi utilizzati come carburanti. [9]

| Emissioni EOBD | | | CO (mg/km) | | NO _x (mg/km) | | NMHC (mg/km) | | PM (mg/km) | |
|----------------------------------------------|--------|-------------|--------------------------------|------|----------------------------|------|-----------------------------------|-----|----------------------|-----|
| Tipo di motore: B = Benzina D = Diesel | | | B | D | B | D | B | D | B | D |
| Normative | | | Massa di monossido di carbonio | | Massa di ossidi di azoto | | Massa di idrocarburi non metanici | | Massa di particolato | |
| 2000/05 | 98/69 | Euro III/IV | 3200 | 3200 | 600 | 1200 | 400 | 400 | - | 180 |
| 2009 | 98/69 | Euro V | 1900 | 1900 | 300 | 540 | 250 | 320 | 50 | 50 |
| 2016 | 70/156 | Euro VI | 1500 | 750 | 90 | 140 | 100 | 140 | 9 | 9 |

Tab. 1.3 Limiti di emissioni per autovetture (veicoli di peso inferiori a 2,5 t) secondo EOBD

Le nuove specifiche introdotte dalla EOBD rispetto alle normative statunitensi possono così riassumersi:

- la diagnosi è unificata per tutti i costruttori (modello a 16 vie);
- i codici di errore sono unificati per tutti i costruttori, il che significa che lo stesso tipo di guasto assume lo stesso codice di errore per qualsiasi modello di qualsiasi marca di autovettura;
- lo stesso strumento diagnostico generico (SCAN TOOL) può essere utilizzato per rilevare i codici di errore di tutti i veicoli omologati a norma EOBD;
- i codici di errore non forniscono delle indicazioni generiche sul componente, ma specificano anche il tipo di avaria che si è verificata (interruzione, corto circuito, compatibilità segnale, ecc..) permettendo una diagnosi più veloce e accurata;
- sono state implementate nel sistema di gestione motore quattro nuove tipologie di diagnosi:
 - a) Diagnosi catalizzatore: consiste nella capacità del sistema di diagnosticare l'efficienza del catalizzatore nel corso del suo invecchiamento. Il deterioramento dell'efficienza di conversione può essere evidenziato per mezzo dell'analisi del segnale proveniente dal sensore di ossigeno posto a valle catalizzatore (in particolare confrontandolo con il segnale della sonda a monte): al diminuire dell'efficienza catalizzatore esso passa da un andamento poco variabile nel tempo ad oscillazioni sempre più simili a quelle del sensore a monte;
 - b) Diagnosi fuel system: con questa diagnosi il sistema segnala che la centralina non è in grado di mantenere il valore stechiometrico, senza poter associare il problema ad un elemento specifico;

- c) Diagnosi misfire: il sistema deve essere in grado di diagnosticare le mancate combustioni che, se non individuate e gestite di conseguenza (inibizione iniezione del dato cilindro e controllo alimentazione fuel in catena aperta), provocano il danneggiamento del catalizzatore e la deriva delle emissioni;
- d) Diagnosi sonda lambda: capacità del sistema di diagnosticare il corretto funzionamento del sensore di ossigeno nei gas di scarico, per ora (EuroV) limitato al solo sensore posto a monte del catalizzatore.



Fig. 1.6 – Strumento diagnostico SCAN TOOL [8]

Il sensore di ossigeno, rilevando le rapide variazioni di ricchezza della miscela elaborata dal motore, emette segnali di tensione continuamente variabili nel tempo alla centralina elettronica che regola di conseguenza la durata di apertura degli iniettori. Con il suo invecchiamento, la risposta ai cambiamenti di titolo diventa sempre più lenta, con ovvie conseguenze sulla prontezza di intervento nelle correzioni del rapporto di miscela aria-combustibile.

- La diagnosi viene disattivata in alcune particolari condizioni di funzionamento del veicolo, nelle quali viene meno l'affidabilità del risultato diagnostico:
 - livello di carburante inferiore al 20%;
 - temperatura ambiente inferiore a -7°C ;

- altitudine superiore a 2500 metri sul livello del mare;
- in veicoli flex fuel o veicoli a gas mono/bi-fuel per un minuto dopo il rifornimento, in modo tale che la ECU possa riconoscere la qualità e la composizione del combustibile;
- in veicoli bi-fuel per i 5 secondi successivi al cambio di combustibile per permettere l’aggiustamento dei parametri del motore.

Inoltre il costruttore può disabilitare la diagnosi in altre condizioni di temperatura atmosferica e/o per un tempo più lungo dopo il cambio di combustibile se può dimostrare con dati e valutazioni ingegneristiche che in queste particolari condizioni si potrebbero avere mancate diagnosi. [9]

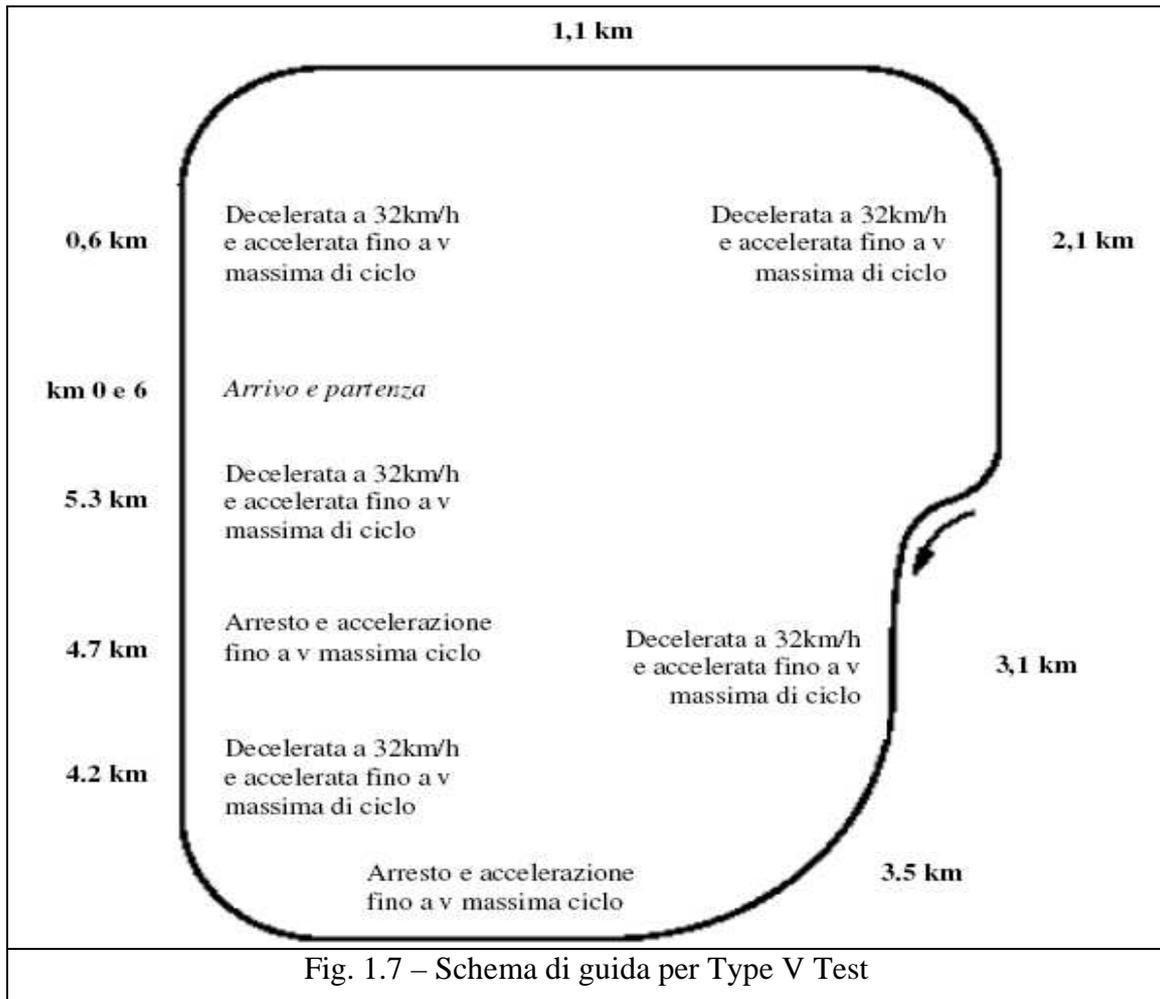
1.4.1 – Type V test (endurance test) [9]

Questo test effettua un invecchiamento tramite utilizzo del veicolo per 80.000 km che può essere realizzato su apposito circuito, su strada o al banco a rulli. Il totale della distanza viene percorso ripetendo serie di 11 cicli da 6 km ciascuno; durante i primi 9 cicli di ogni serie il veicolo viene fermato a metà del ciclo, con il motore tenuto al regime minimo per 15 secondi. All’interno di ogni ciclo sono presenti 5 decelerazioni dalla velocità massima di ciclo (Tab. 1.4) fino alla velocità di 32 km/h.

| CICLO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| VELOCITA’ [km/h] | 64 | 48 | 64 | 64 | 56 | 48 | 56 | 72 | 56 | 89 | 113 |

Tab. 1.4 – Massime velocità di ciclo

Il percorso seguito durante uno dei cicli ripetuti è riportato di seguito:



Nel caso il test venga effettuato al banco a rulli e non su strada è necessario che vengano riprodotte e simulate le inerzie e le resistenze aerodinamiche del veicolo. Il sistema di raffreddamento del veicolo deve inoltre garantire temperature di funzionamento simili a quelle ottenibili nella prova su strada.

All'inizio della prova ed ogni 10.000 km (± 400 km) le emissioni allo scarico vengono misurate. Se il veicolo è equipaggiato con un sistema di rigenerazione, la misurazione deve essere effettuata quando la rigenerazione non è in corso.

Tutte le rilevazioni delle emissioni sono poi rappresentate su un grafico in funzione della distanza percorsa e interpolate tramite il metodo dei minimi quadrati.

I dati ottenuti vengono ritenuti accettabili ai fini del calcolo del fattore di deterioramento delle emissioni, solo se i punti interpolati da questa linea a 6400 e a 80.000km sono al di sotto di un certo valore di soglia.

Per ogni specie inquinante rilevata allo scarico viene calcolato un fattore di deterioramento delle emissioni:

$$D.E.F.=Mi_2 / Mi_1$$

dove Mi_1 indica la massa di inquinanti emessi (in g/km) per la specie considerata, ottenuta dall'interpolazione a 6.400km, analogamente Mi_2 è ottenuto dall'interpolazione a 80.000km. [9]

1.5 – La sonda lambda

La sonda lambda è un sensore indispensabile per conoscere la composizione dei gas di scarico e quindi per mantenere il rapporto di miscela (kg aria/kg combustibile) entro l'intervallo di efficienza ottimale del catalizzatore. Il compito di questo sensore, introdotto negli anni '80 per il controllo motore, è quello di facilitare la regolazione del rapporto di miscelazione, identificato, appunto, con la lettera greca lambda:

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

Lambda assume valore unitario quando la miscela è stechiometrica, minore dell'unità quando c'è un eccesso di combustibile (miscela grassa) e maggiore dell'unità quando c'è un eccesso d'aria (miscela magra).

La sonda lambda è in grado di rilevare la concentrazione di ossigeno all'interno dei gas di scarico; questa informazione viene trasmessa alla centralina sotto forma di segnale elettrico, che contribuisce a regolare l'immissione di carburante e aria all'interno della camera di combustione.

Esistono due tipologie principali di sonde lambda:

- ❖ HEGO – Heated Exhaust Gas Oxygen
- ❖ UEGO – Universal Exhaust Gas Oxygen

1.5.1 – HEGO (Heated Exhaust Gas Oxygen)

La sonda HEGO, detta anche sonda on/off, è stato il primo sensore di ossigeno ad essere costruito. Il cuore del sensore è costituito da un elettrolita solido che è separato dalla zona di transito dei fumi da uno strato di materiale ceramico; quest'ultimo è permeabile agli ioni di ossigeno a partire da una temperatura di 350°C che viene raggiunta grazie al riscaldatore (può anche non esserci).

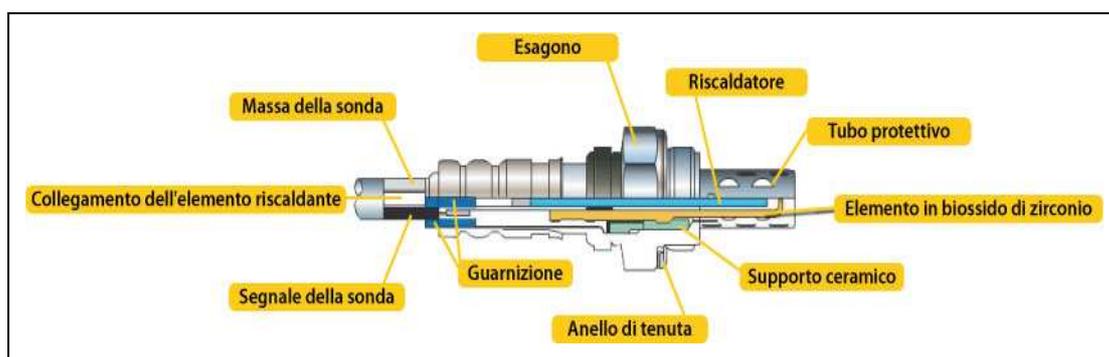


Fig. 1.8 – Sonda lambda on/off al biossido di zirconio [4]

L'elettrolita fornisce una differenza di tensione (circa 800 mV) quando l'ambiente di misura presenta un titolo grasso ($\lambda < 1$), ovvero quando la differenza di concentrazione di ossigeno tra gas di scarico e aria ambiente è

elevata, viceversa il voltaggio si azzera quando la miscela presenta un eccesso d'aria ($\lambda > 1$). Il segnale elettrico in uscita dal sensore in funzione di λ , ovvero la sua caratteristica statica, si presenta in questo modo:

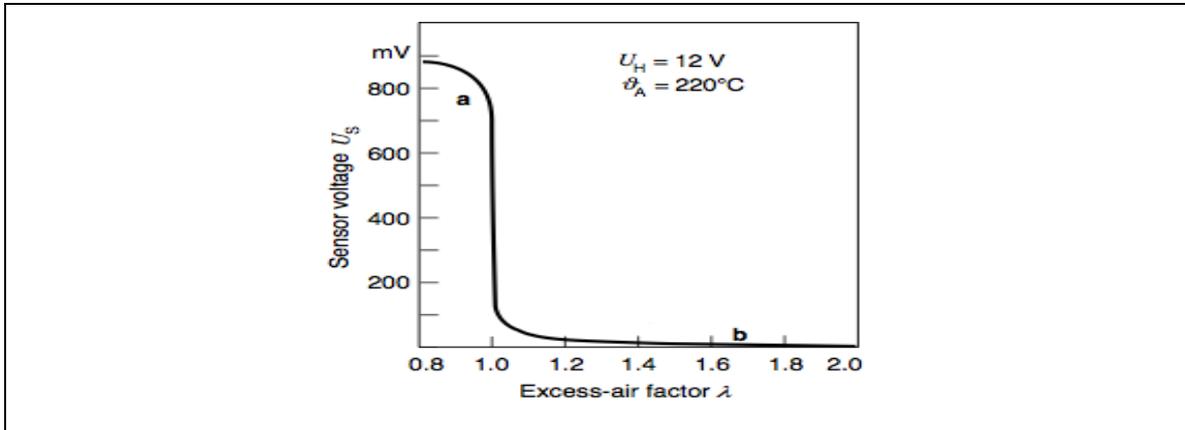


Fig. 1.9 – Curva caratteristica del range di funzionamento di una sonda HEGO

a. Miscela Ricca b. Miscela Magra (fonte Internet)

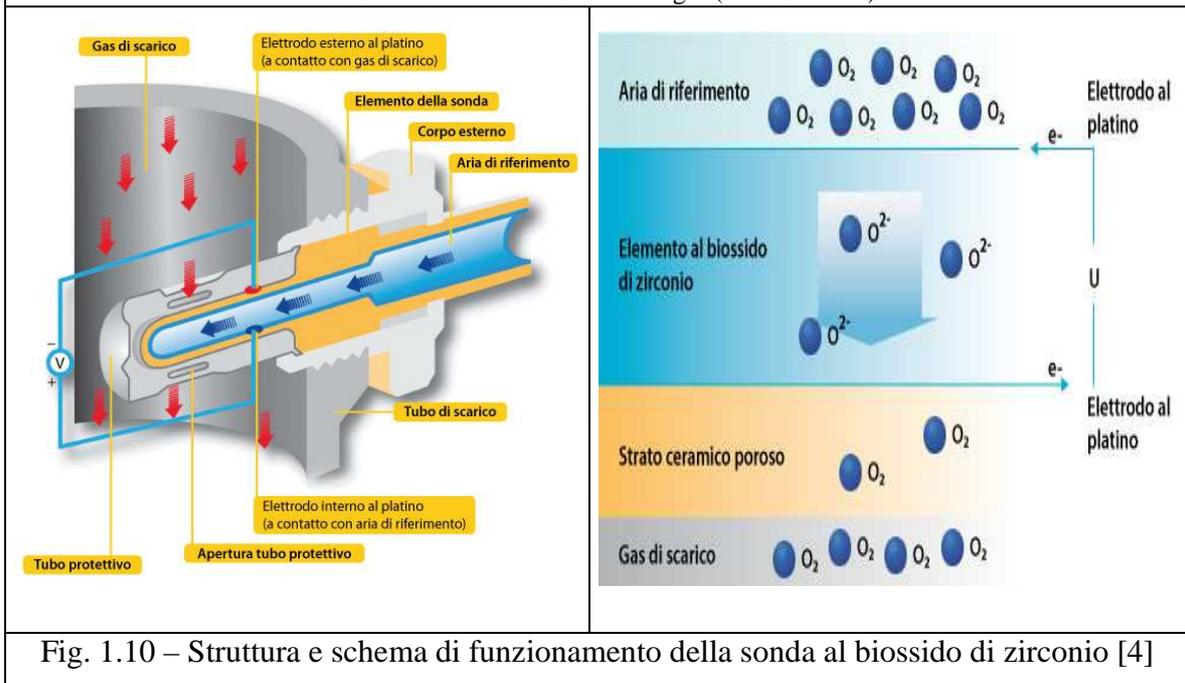


Fig. 1.10 – Struttura e schema di funzionamento della sonda al biossido di zirconio [4]

Il lato interno del sensore è a contatto con l'aria dell'ambiente (di riferimento), mentre il lato esterno si trova a contatto con i gas combustibili. Entrambi i lati sono rivestiti da un sottile strato poroso di platino che funge da elettrodo. L'ossido di zirconio favorisce la transizione degli ioni ossigeno, permettendo la generazione di un potenziale tra i due elettrodi di

platino. Infatti, quando la sonda raggiunge la temperatura di esercizio, gli ioni ossigeno si spostano all'interno dell'elettrolita generando una differenza di potenziale elettrico.

Questa tipologia di sonda permette prestazioni limitate nel controllo del motore, in quanto permette di mantenere efficiente il sistema di controllo titolo solo per valori stechiometrici.

Nel layout di un attuale sistema di scarico questa sonda la ritroviamo posizionata a valle del catalizzatore, e viene utilizzata per scopi di diagnosi del catalizzatore.

1.5.2– UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen)

Con l'esigenza di ridurre i consumi e le emissioni inquinanti è emersa la necessità di controllare il funzionamento dei motori ad accensione comandata anche al di fuori del punto di funzionamento stechiometrico ($\lambda=1$). A tale scopo è stata sviluppata la sonda UEGO, detta anche sonda lineare o a banda larga, la quale misura con maggiore precisione le variazioni di concentrazione di ossigeno all'interno dei gas di scarico. In particolare, è in grado di fornire un segnale proporzionale al titolo della miscela, permettendo controlli in catena chiusa anche con lambda non stechiometrici ($\lambda \neq 1$).

Il sensore è costituito da due celle: una di misura e una di pompaggio. Con l'ausilio della cella di misura, il tenore di ossigeno del gas di scarico che si trova nella camera di rivelazione viene misurato e confrontato con un valore nominale di 450 mV, per determinare se la miscela analizzata è grassa o magra.

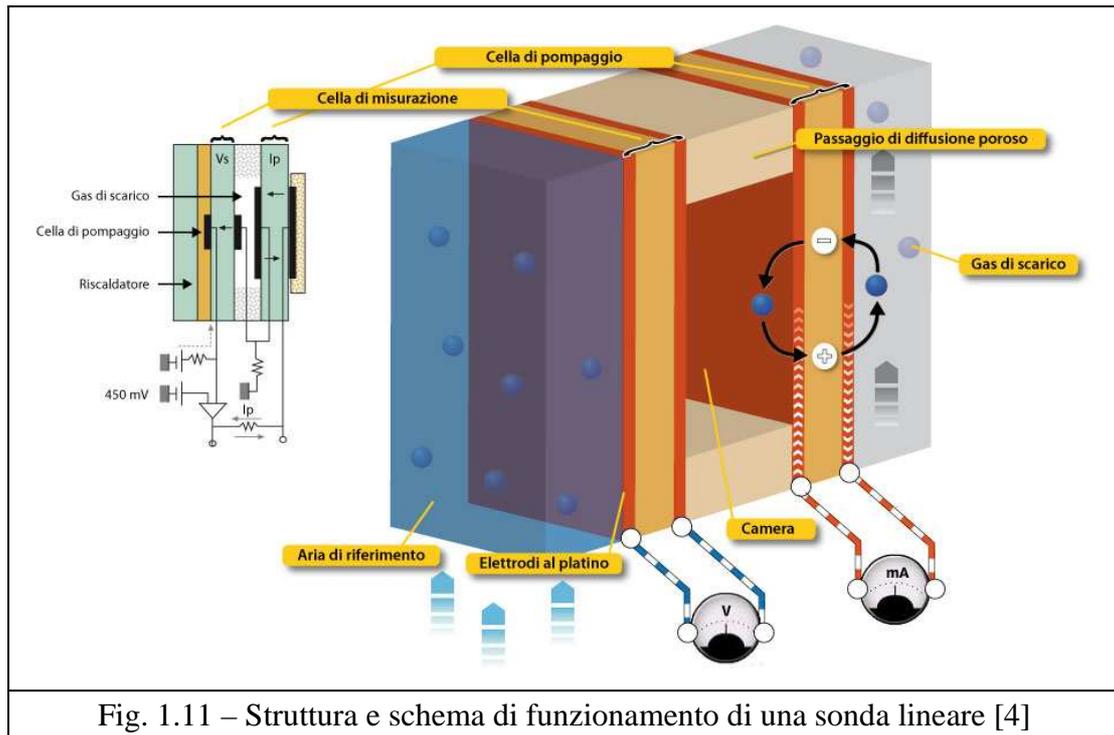


Fig. 1.11 – Struttura e schema di funzionamento di una sonda lineare [4]

In caso di divergenza da questo valore, mediante l'attivazione di un flusso di pompaggio positivo o negativo (rispettivamente per miscela magra o ricca) sull'apposita cella, vengono pompati ioni di ossigeno in entrata o in uscita dalla camera di rilevazione, finché il valore della tensione della cella di misurazione non corrisponde

nuovamente a 450 mV. La corrente pompata (I_p) è la grandezza di misura che descrive in modo lineare l'esatto valore della concentrazione di ossigeno della miscela e quindi del titolo (Fig. 1.12). Spesso il segnale viene convertito in una tensione facendo circolare la corrente

pompata all'interno di una resistenza di caratteristiche note.

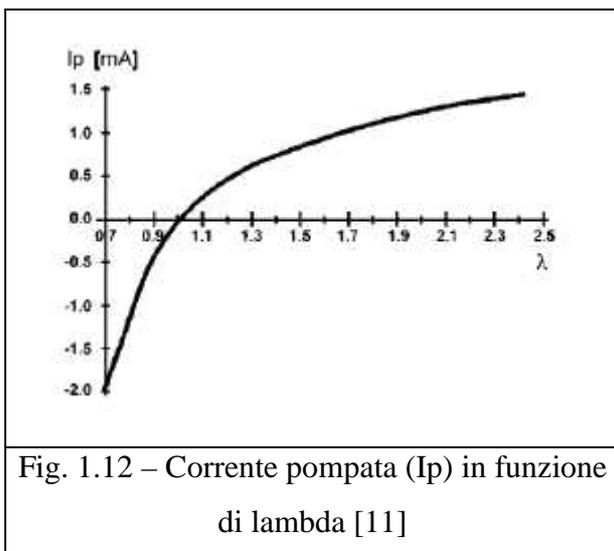


Fig. 1.12 – Corrente pompata (I_p) in funzione di lambda [11]

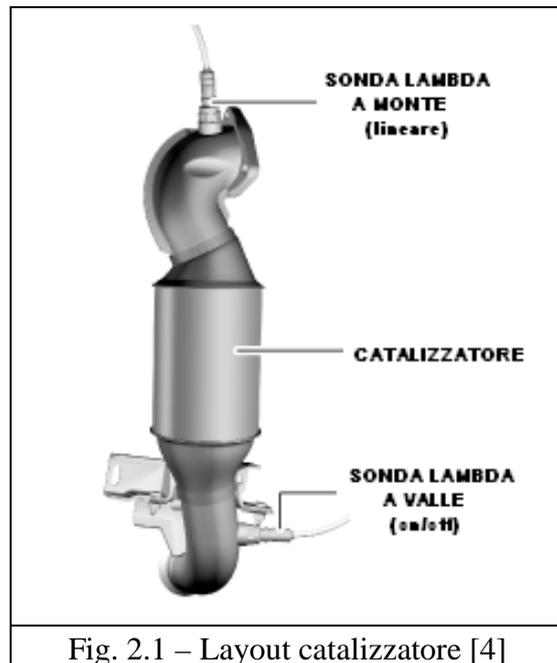
Questo tipo di sonda è utilizzata nei motori a benzina come sonda di regolazione ed è posizionata alla confluenza dei condotti di scarico, a monte del catalizzatore; trova sempre più applicazione anche nei motori diesel.

Capitolo 2

Sonda lambda nella diagnosi catalizzatore

2.1 – Il catalizzatore trivalente

L'utilizzo dei convertitori trivalenti, detti brevemente TWC (Three Way Catalyst) [6], ha un ruolo determinante nel rispetto dei limiti sulle emissioni previste dalle normative; essi hanno la funzione di purificare i gas di scarico, favorendo le reazioni dei componenti indesiderati. Sfruttando il principio della catalisi chimica permettono di ossidare CO e HC e allo stesso tempo ridurre gli ossidi di azoto non eliminabili per via termica. Dal punto di vista chimico, il catalizzatore è una sostanza impiegata per facilitare reazioni chimiche alle quali non partecipa e che senza di esso non avrebbero luogo o si svolgerebbero con estrema lentezza. I prodotti delle suddette reazioni chimiche sono vapor d'acqua (H₂O), anidride carbonica (CO₂) e azoto, composti non nocivi per la salute umana. Questo strumento di abbattimento delle emissioni viene normalmente installato nel primo



tratto del sistema di scarico, in prossimità del motore, per ridurre i tempi di light-off (condizione termica in corrispondenza della quale si raggiunge il 50% dell'efficienza di conversione). E' costituito da un involucro esterno metallico che guida i gas combusti attraverso un letto di catalisi in cui

vengono a contatto con il materiale attivo distribuito su una vasta area in modo da favorire l'adsorbimento dei reagenti gassosi. In genere si utilizza un supporto poroso (monolite ceramico a celle passanti o supporto in lamiera di acciaio fittamente pieghettata e avvolta) sulla cui superficie viene depositato un materiale refrattario ad alta porosità (washcoat, in genere a base di allumina, cerio e zirconio), a sua volta impregnato di materiale catalizzante. Quest'ultimo è una combinazione di tre metalli nobili: palladio (Pd) e platino (Pt), per catalizzare le reazioni di ossidazione di HC e CO, e rodio,

per catalizzare le reazioni di riduzione degli NO_x .

La quantità di metalli attivi presente nel catalizzatore è circa l'1-2% in peso rispetto al washcoat. [18]

La cinetica chimica delle

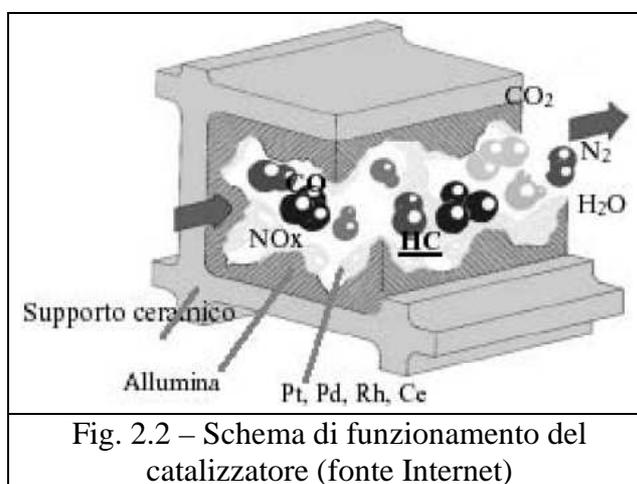


Fig. 2.2 – Schema di funzionamento del catalizzatore (fonte Internet)

reazioni di ossidoriduzione realizzate nei convertitori catalitici impone un set di condizioni necessarie al funzionamento ottimale del dispositivo; esso, infatti, perde rapidamente efficacia se si opera al di fuori di un certo intervallo di temperature e di un campo ristretto del rapporto aria-combustibile. Per far sì, quindi, che il convertitore catalitico possa svolgere la sua funzione trivalente con un'elevata efficacia, è necessario che il motore sia alimentato con un rapporto di miscela molto vicino allo stechiometrico: un eccesso di ossigeno libero nei gas combusti renderebbe difficile la riduzione degli NO_x , mentre un suo difetto farebbe diminuire la probabilità di ossidazione di CO ed HC. Più precisamente, l'efficienza di conversione (definita con la relazione sotto riportata) di tutti e tre gli inquinanti si mantiene superiore all'80% (Fig. 2.3) solo se il motore viene

alimentato con un rapporto aria-combustibile attorno al valore stechiometrico, variabile tra 14,6 e 14,7 (a seconda della composizione della benzina).

$$\eta_{TWC,\chi} = \frac{\chi_{IN} - \chi_{OUT}}{\chi_{IN}}$$

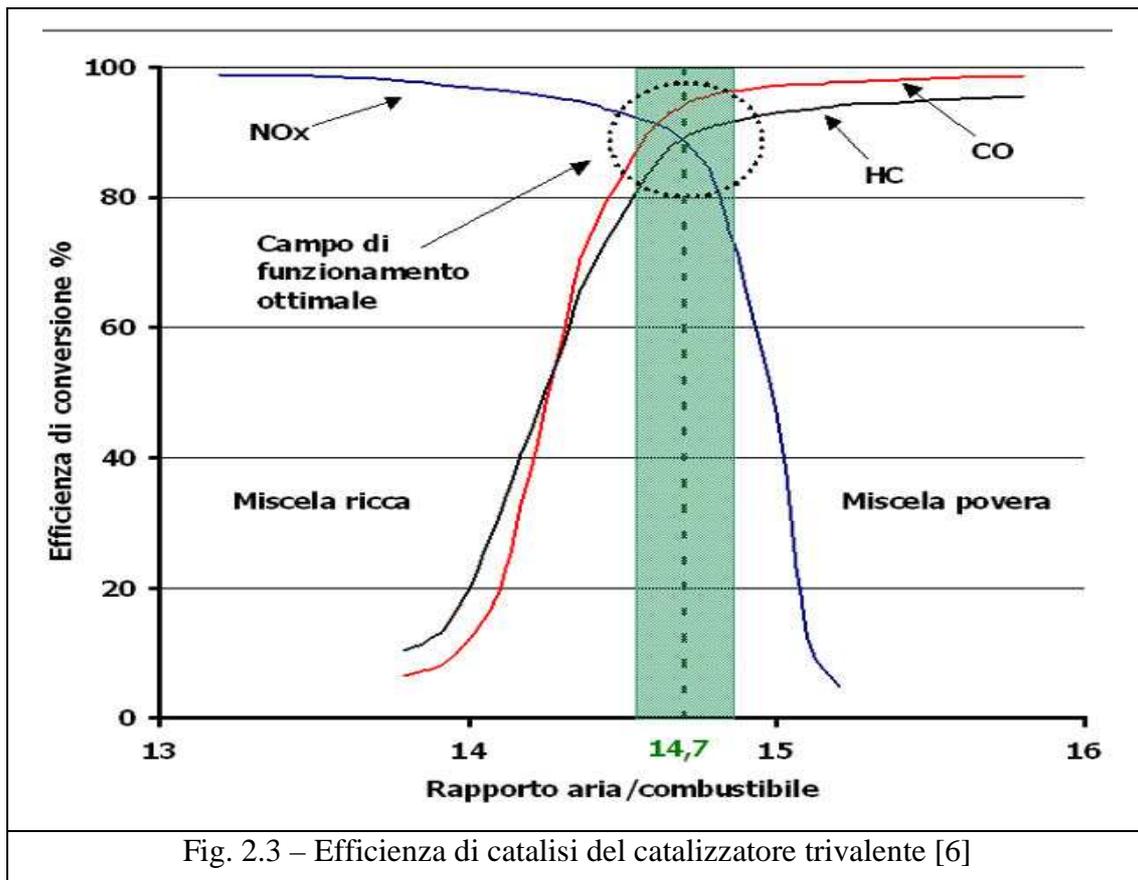


Fig. 2.3 – Efficienza di catalisi del catalizzatore trivalente [6]

Nonostante i tempi di risposta dei sistemi di iniezione diretta si siano cospicuamente ridotti, per particolari condizioni di guida ottenute spesso su un ciclo di guida urbano (rapide accelerazioni e decelerazioni), il rapporto aria-combustibile si allontana dal valore ottimale, causando un aumento delle emissioni inquinanti [11].

Inoltre nel tempo, diversi fattori provocano una progressiva perdita di funzionalità del convertitore catalitico, tra cui:

- ❖ sinterizzazione termica: fenomeno provocato dalle alte temperature raggiunte nel catalizzatore in condizioni di carico elevato, per cui si avvia un processo di ricristallizzazione dei metalli nobili. A questo proposito le mancate accensioni (misfire), portando la miscela incombusta al catalizzatore, degradano il catalizzatore in conseguenza del fatto che la miscela brucia al suo interno.
- ❖ avvelenamento dei siti catalitici e conseguente disattivazione chimica: esso è dovuto all'inevitabile presenza, nei gas che attraversano il convertitore, di sostanze che reagiscono con la sua parte attiva o che semplicemente si depositano lentamente su di essa; tali sostanze sono contenute per esempio nell'olio lubrificante (fosforo e zinco), nella benzina o nella stessa aria prelevata dall'ambiente esterno.

In definitiva, l'efficienza è massima solo quando la marmitta catalitica è nuova e in condizioni di guida stazionaria, tipicamente su percorsi autostradali.

I punti deboli di questo componente, che sottolineano l'importanza di un'autodiagnosi a bordo, possono essere così riassunti:

- efficacia solo all'interno di un preciso range di temperature. Nelle cosiddette partenze a freddo, la temperatura è molto bassa e gli inquinanti prodotti rappresentano la maggior parte delle emissioni prodotte durante l'intero "trip". Viceversa, in condizioni di pieno carico, temperature eccessivamente elevate provocano la ricristallizzazione e la distruzione dei metalli catalizzatori. Inoltre, cut-off prolungati provocano un forte calo della temperatura dei gas e quindi del catalizzatore, con conseguente riduzione dell'efficienza di conversione.
- reazioni indesiderate possono portare alla formazione di acido solforico (a causa dello zolfo presente nella benzina), di ammoniaca e di protossido di azoto (N_2O).

- rilascio di metalli nobili nell'atmosfera. Nonostante le quantità di platino, palladio e rodio impiegate siano minime e nonostante questi metalli non siano consumati durante il funzionamento, studi europei hanno dimostrato che una minima parte di essi viene rilasciata nell'ambiente in seguito a processi di degradazione sia termica che meccanica. Fenomeno da non trascurare vista l'estrema tossicità di questi metalli.
- l'abbattimento teorico dei gas tossici per un dispositivo perfettamente funzionante su ciclo extraurbano è al 90% sul CO e all'80 % sugli NO_x, ma la completa ossidoriduzione delle specie inquinanti non impedisce la loro degradazione e ricombinazione chimica a valle del sistema di abbattimento di emissioni. L'aggiunta, nella benzina cosiddetta verde, di metilterbutiletere (MTBE) ed etilterbutiletere (ETBE) determina inoltre la liberazione di formaldeide ed acetaldeide, in conseguenza della quale aumenta anche il protossido di azoto, uno dei principali responsabili dell'effetto serra.

2.2 L'Oxygen Storage Capacity (OSC)

L'OSC rappresenta la capacità del catalizzatore di immagazzinare ossigeno in condizioni di titolo magro e di rilasciarlo in condizioni di titolo ricco. Questo parametro presenta il suo valore massimo con un catalizzatore a inizio vita, grazie all'azione dell'ossido di cerio che durante il funzionamento oscilla tra lo stato ossidato e quello ridotto a seconda del contatto con gas in eccesso o difetto di ossigeno. Durante il normale funzionamento e con il conseguente deterioramento, la quantità di ossido di cerio all'interno della matrice catalizzante tende a ridursi (a causa dei

fenomeni descritti nel paragrafo precedente) e di conseguenza diminuisce la sua capacità di immagazzinare e rilasciare ossigeno.

L'Oxygen Storage Capacity può essere stimata misurando il ritardo che presenta il segnale in tensione della sonda a valle nell'inseguire quello della sonda a monte a seguito di una transizione ricco-magro del titolo:

$$OSC = \dot{Q}_{O_2,free} \cdot \Delta t = \frac{\lambda_{magro} - 1}{\lambda_{magro}} \cdot 0,23 \cdot \dot{Q}_{aria} \cdot \Delta t$$

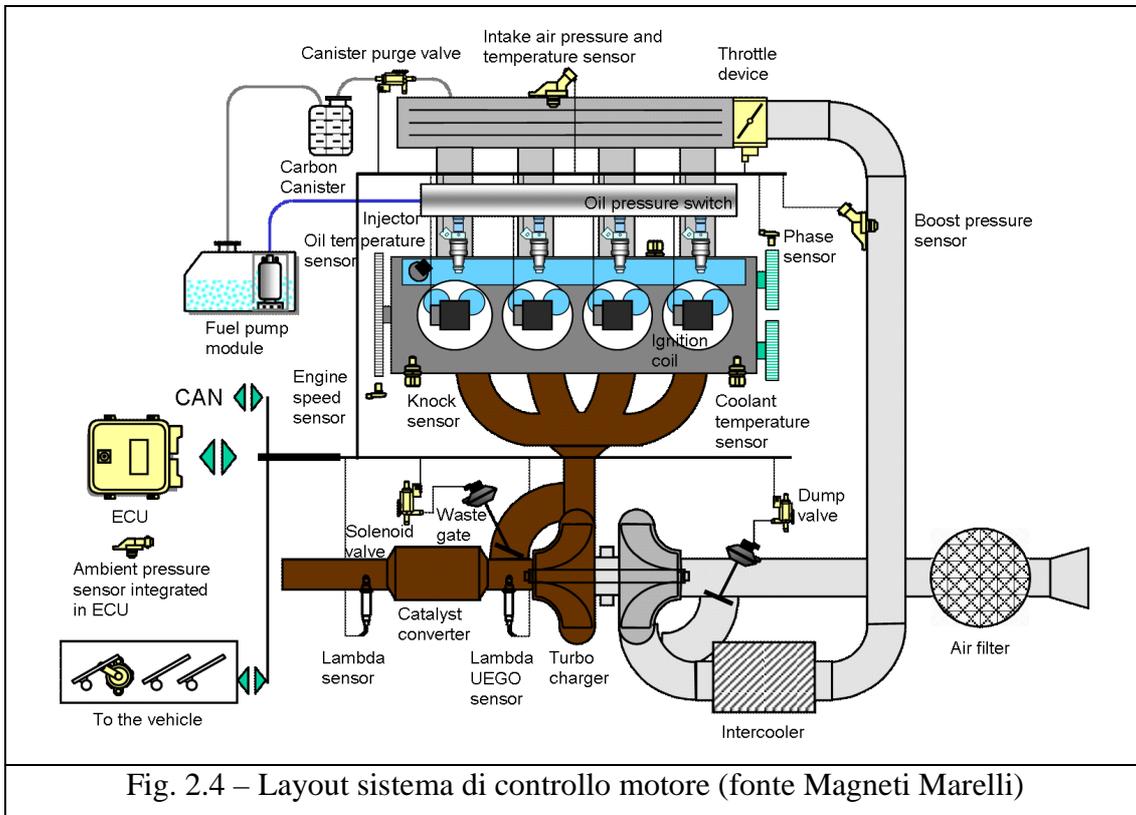
dove $\dot{Q}_{O_2,free}$ è la portata massica di ossigeno libero nei gas di scarico, la quale può essere legata alla portata massica d'aria elaborata dal motore \dot{Q}_{aria} secondo la relazione appena vista.

L'importanza di questo parametro consiste nel suo legame con l'efficienza di catalisi: un catalizzatore nuovo, con un'elevata efficienza di conversione, avrà un elevato valore dell'OSC, che si traduce con una differenza marcata tra i segnali delle due sonde; viceversa un catalizzatore deteriorato, con una bassa coefficienta di conversione, avrà anche un basso valore dell'OSC, che si traduce in una differenza molto meno marcata tra i due segnali. Questa semplice osservazione consentirà di capire la strategia presente in centralina per l'autodiagnosi a bordo del dispositivo catalitico. [7]

2.3 Strategia di diagnosi catalizzatore

L'obiettivo della diagnosi catalizzatore è quello di rilevare il relativo livello di invecchiamento e il conseguente incremento di emissioni soprasoglia. La strategia di diagnosi è basata sulla stima dell'Oxygen Storage Capacity ([mg]). Il layout della linea di scarico prevede due sonde lambda, la prima

installata a monte del catalizzatore, sulla confluenza dei condotti di scarico dei cilindri, ed una seconda posta a valle catalizzatore.



La sonda lambda a monte catalizzatore è tipicamente una sonda lineare (UEGO) e viene utilizzata per il controllo del titolo, cioè come feedback per l'inseguimento del rapporto aria-combustibile in catena chiusa (closed-loop). A differenza di questa, la seconda sonda lambda è di tipo on/off (HEGO) ed il suo segnale in tensione, oltre che per la diagnosi catalizzatore, viene introdotto (con bassa priorità) nel sistema di controllo titolo.[7]

La diagnosi viene abilitata quando viene riconosciuto uno stabilizzato. In particolare il motore e i suoi componenti devono essere termicamente regimati e devono essere verificate condizioni di carico e regime stabili. Durante la marcia, al verificarsi delle suddette condizioni, viene attivata la strategia ora descritta: a seguito di una variazione del titolo prima in grasso ($\lambda < 1$) e a poi in magro ($\lambda > 1$) il catalizzatore risponde in maniera differente a

seconda del suo stato di invecchiamento e la sonda a valle ne registra la conseguente risposta.

Nello specifico registreremo due comportamenti (riportati in maniera qualitativa in Figura 2.5): nel caso di catalizzatore nuovo l'elevata efficienza catalitica del convertitore farà registrare alla sonda a valle un segnale di

tensione che non ricalca l'andamento di titolo imposto dalla strategia in quanto, nella fase a titolo ricco il catalizzatore ha provveduto all'ossidazione degli HC presenti con l'ossigeno stoccato dagli ossidi di cerio ristabilendo le condizioni stechiometriche mentre, nella fase con titolo magro, l'eccesso di ossigeno presente è stato immagazzinato ad opera dell'ossidazione del cerio.

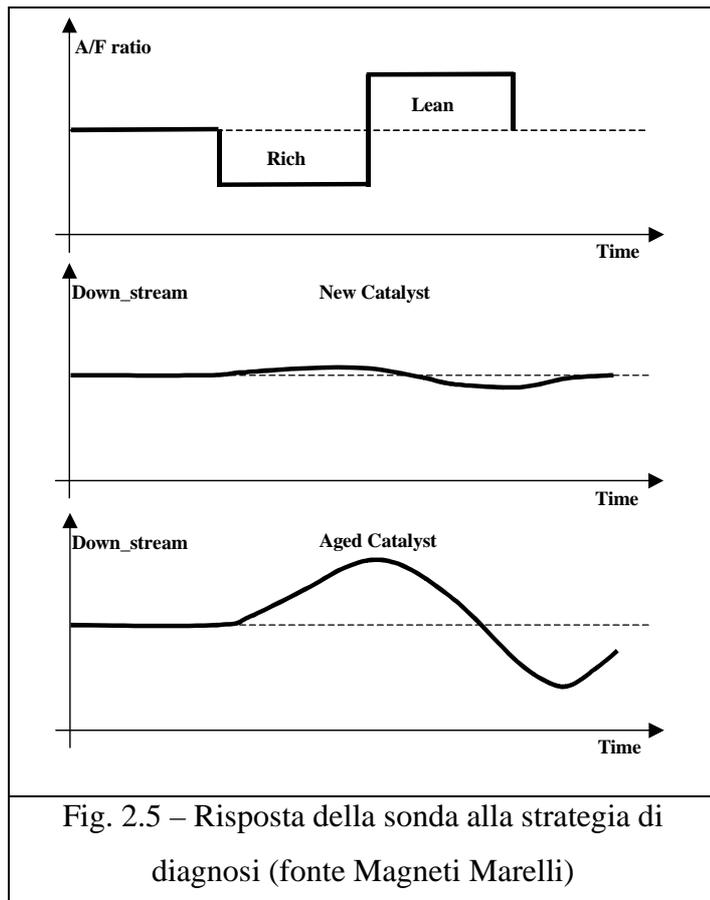


Fig. 2.5 – Risposta della sonda alla strategia di diagnosi (fonte Magneti Marelli)

Viceversa, nel caso di catalizzatore degradato, la ridotta efficienza catalitica farà registrare un segnale di tensione molto più simile ai gradini di titolo imposti dalla strategia, per cui l'effetto filtrante del catalizzatore sarà meno evidente.

I passi attraverso i quali evolve la diagnosi possono essere così schematizzati:

1. Il rapporto aria-combustibile viene ridotto per portare il titolo in grasso.

2. Se la sonda a valle non raggiunge la soglia calibrata (SOGLIA IN GRASSO) entro un certo tempo, si deduce che il potere filtrante del catalizzatore è molto elevato e si associa questa considerazione ad un catalizzatore efficiente, per cui si dichiara la diagnosi terminata con risultato positivo (Fig. 2.6).
3. Nel caso in cui la condizione 2. non venga verificata al raggiungimento della SOGLIA IN GRASSO, viene mantenuto ancora il titolo in grasso per un tempo calibrato, in modo da garantire il consumo per ossidazione di HC dell'ossigeno immagazzinato.
4. Il rapporto aria-combustibile viene incrementato portando il titolo in magro.
5. Se la sonda a valle non raggiunge la soglia calibrata (SOGLIA_IN_MAGRO) entro un certo tempo, come in precedenza si dichiara che la diagnosi è terminata con risultato positivo (Fig. 2.7).
6. Nel caso in cui non venga verificata la condizione 5., la tensione della sonda scende al di sotto del valore della SOGLIA_IN_MAGRO dopo un tempo Δt che viene memorizzato ed utilizzato per stimare la massima capacità di assorbimento di ossigeno:

$$OSC \cong \int_{\Delta t} Q_{aria} \frac{\lambda_{magro} - 1}{\lambda_{magro}} \cdot 0,23 d\tau$$

che in condizioni di stabilizzato, quali ci troviamo, può essere così semplificata:

$$OSC \cong Q_{aria} \frac{\lambda_{magro} - 1}{\lambda_{magro}} \cdot 0,23 \cdot \Delta\tau$$

7. Il valore di OSC così stimato viene corretto in funzione della portata d'aria media e della temperatura del catalizzatore (in quanto influenzano

- l'OSC) e in seguito confrontato con un valore di OSC minimo, che segna il confine oltre il quale dichiarare non funzionante il catalizzatore.
8. Se l'OSC stimato è superiore al minimo consentito, la diagnosi viene terminata e dichiarata positiva (Fig. 2.8) pubblicando un indice che rappresenta lo scostamento dell'OSC stimato dal valore massimo (ottenibile a catalizzatore nuovo), espresso in termini percentuali.
 9. Nel caso in cui l'OSC stimato sia inferiore al minimo consentito viene terminata la diagnosi e dichiarata negativa (Fig. 2.9), pubblicando un indice simile a quello precedente ma relativo allo scostamento non dell'OSC stimato, ma di quello di confine utilizzato per il confronto.

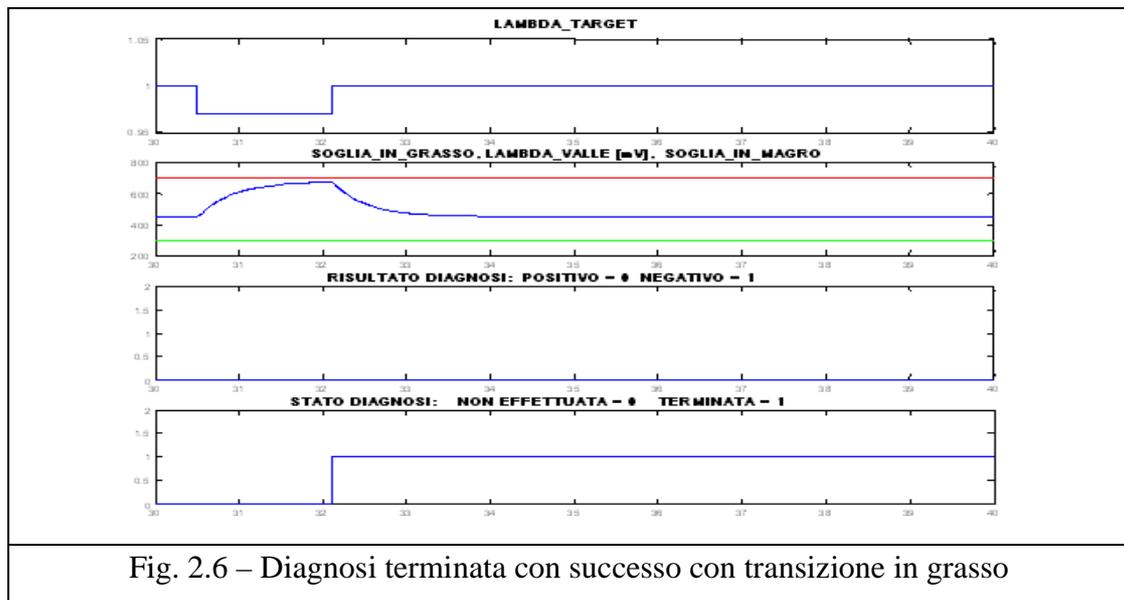
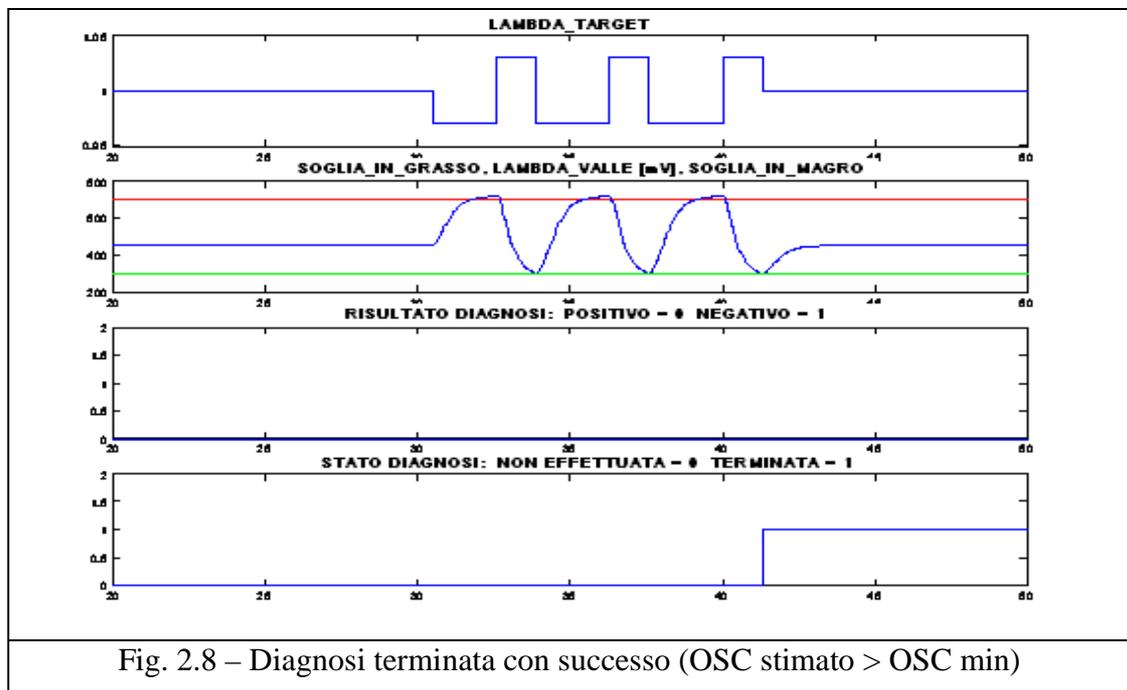
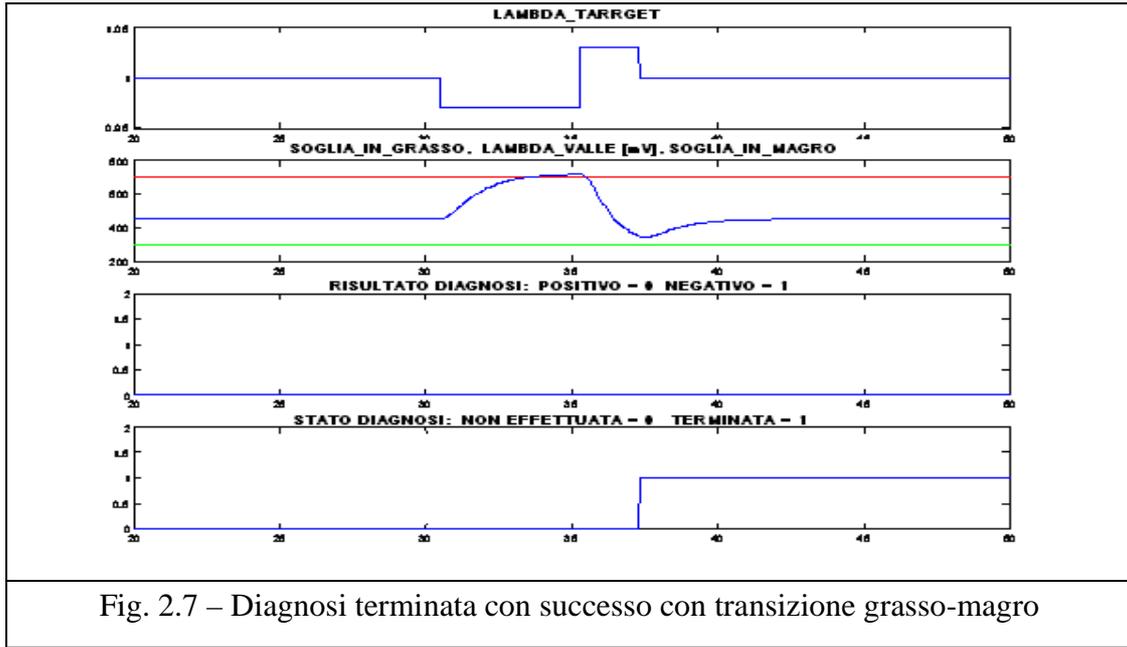
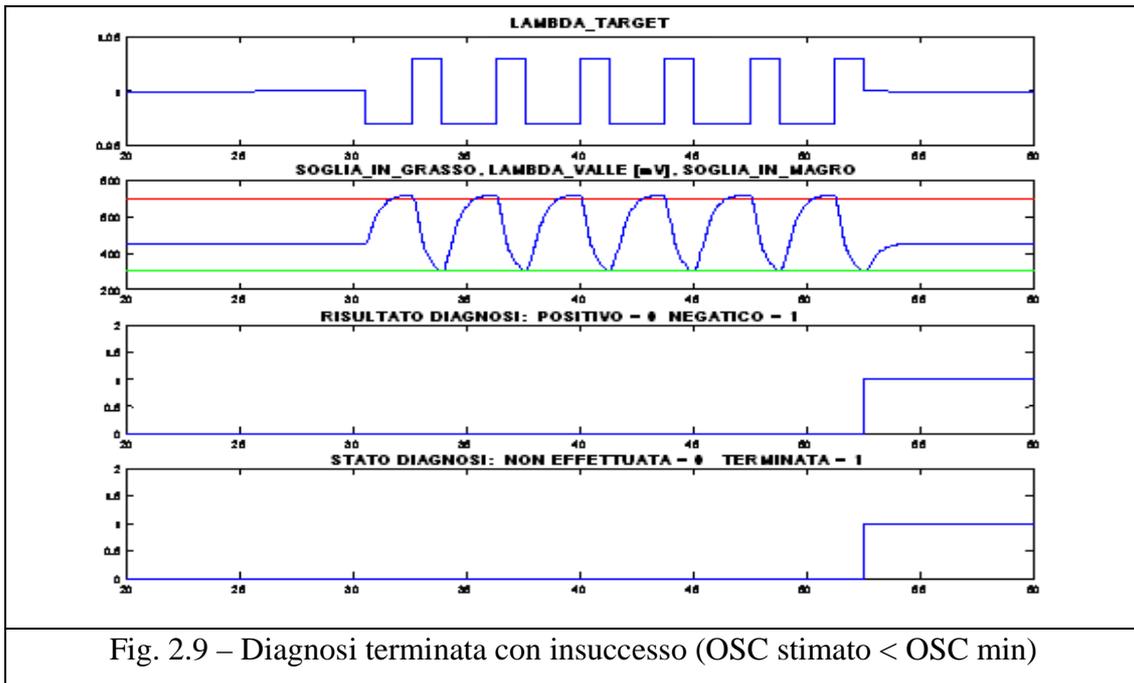


Fig. 2.6 – Diagnosi terminata con successo con transizione in grasso





La diagnosi del catalizzatore viene abilitata solo una volta durante il singolo viaggio (“trip”); infatti, una volta ottenuto un risultato dalla diagnosi, questa non viene riattivata fino al successivo avviamento.

Capitolo 3

Analisi e caratterizzazione sperimentale delle transizioni della sonda lambda

3.1 – Dinamiche della sonda lambda a valle catalizzatore

Il sensore che si intende diagnosticare è una sonda lambda HEGO (tipo on-off) ed il suo funzionamento, come già descritto nel Cap. 1, prevede la generazione di un segnale in tensione che si mantiene su valori alti (>800mV) nel caso di rilevamento di una miscela dei gas di scarico di composizione ricca ($\lambda < 1$), mentre si porta a valori vicini allo zero quando la composizione è magra ($\lambda > 1$). Durante il normale funzionamento il titolo della miscela all'interno del cilindro si mantiene molto vicino al valore stechiometrico per l'intero campo di funzionamento del motore. Questo leggero scostamento dallo stechiometrico non è sufficiente ad abbassare il segnale di tensione della sonda a valori prossimi allo zero, ma in condizioni di cut-off l'interruzione dell'iniezione porta all'innalzamento del rapporto aria combustibile, causando la comparsa di una transizione del segnale elettrico della sonda a valle verso valori di tensione più bassi (circa 0-0,2 V). I ripetuti cut-off generati da cambi marcia o da rilascio pedale per lo sfruttamento del cosiddetto "freno motore" da parte dell'utente, causano un corrispondente numero di transizioni del segnale in tensione della sonda a valle catalizzatore, come apprezzabile in Fig. 3.1 (ad esempio tra $t=80$ s e $t=85$ s, oppure tra $t=100$ s e $t=105$ s). L'algoritmo di diagnosi sarà basato proprio sullo studio di queste transizioni che si verificano con ripetitività all'interno del singolo "trip" e che sono influenzate dallo stato di "salute" della sonda, ma non solo.

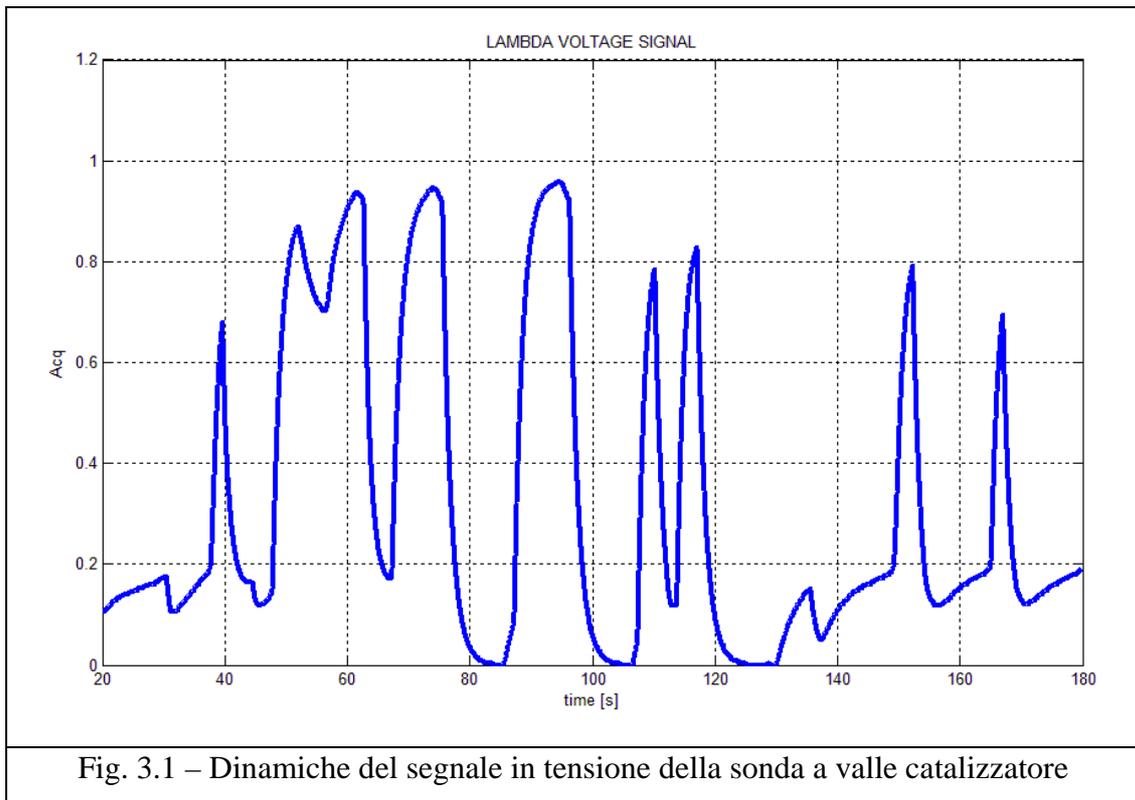


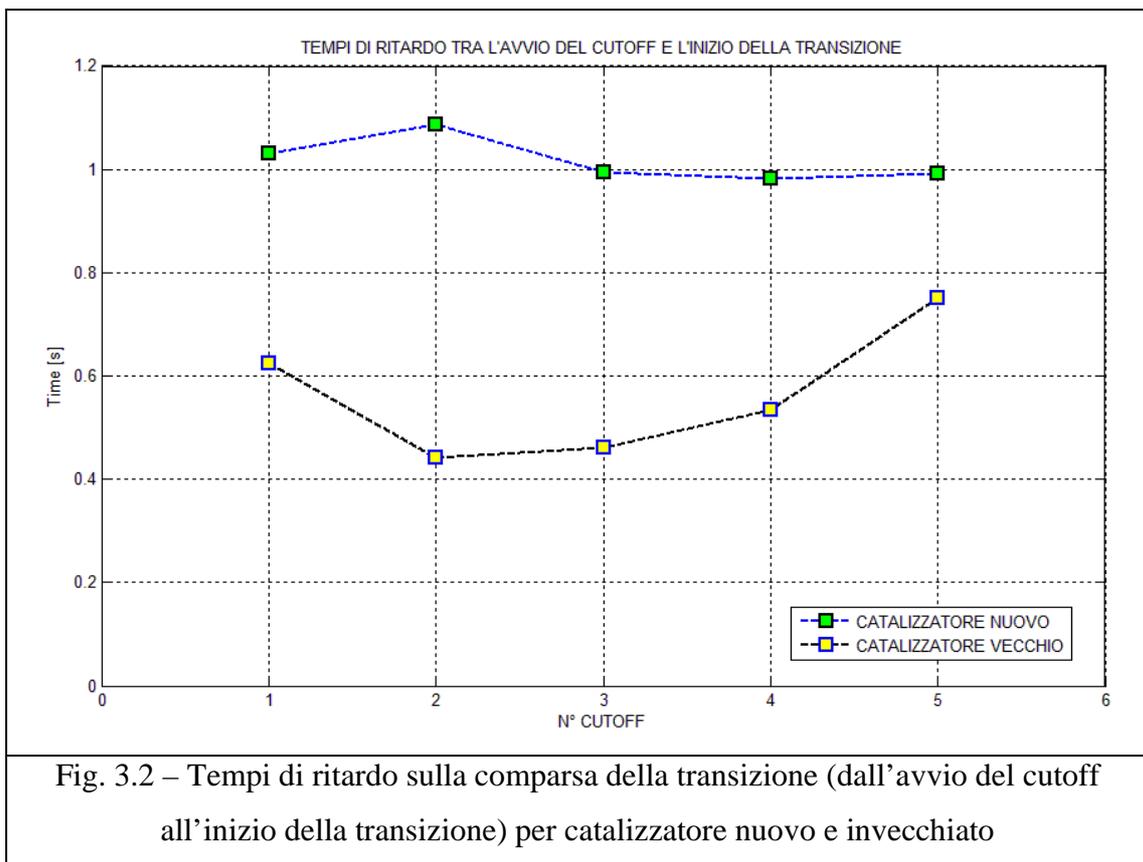
Fig. 3.1 – Dinamiche del segnale in tensione della sonda a valle catalizzatore

In particolare le principali variabili di influenza sulla transizione possono essere così riassunte:

- ✓ Oxygen Storage Capacity (OSC): le modalità di assorbimento e di rilascio dell'ossigeno da parte del catalizzatore determinano un effetto filtrante sul titolo della miscela in uscita rispetto a quella in ingresso nel catalizzatore;
- ✓ Punto motore di inizio cut-off: il carico e il regime motore definiscono la quantità e le modalità di trasporto dei pacchetti d'aria durante l'attuazione di un cut-off;
- ✓ Stato di degrado della sonda lambda: caratteristica che si desidera identificare e quindi isolare il più possibile dalle altre;

- ✓ Modalità di spegnimento dei cilindri: caratteristica influenzante la dinamica della transizione, in particolare il ritardo di comparsa della stessa rispetto alla richiesta di cut-off;

Analizzando singolarmente questi fattori e partendo dallo stato di efficienza del catalizzatore, descritto dall'OSC, possiamo affermare che un catalizzatore nuovo, caratterizzato quindi da un elevato valore dell'OSC, causerà un ritardo sulla comparsa della transizione dovuta all'immagazzinamento dei primi pacchetti d'ossigeno resisi disponibili con il cut-off. Per un catalizzatore degradato invece il ritardo andrà riducendosi in funzione della continua e progressiva riduzione dell'OSC.



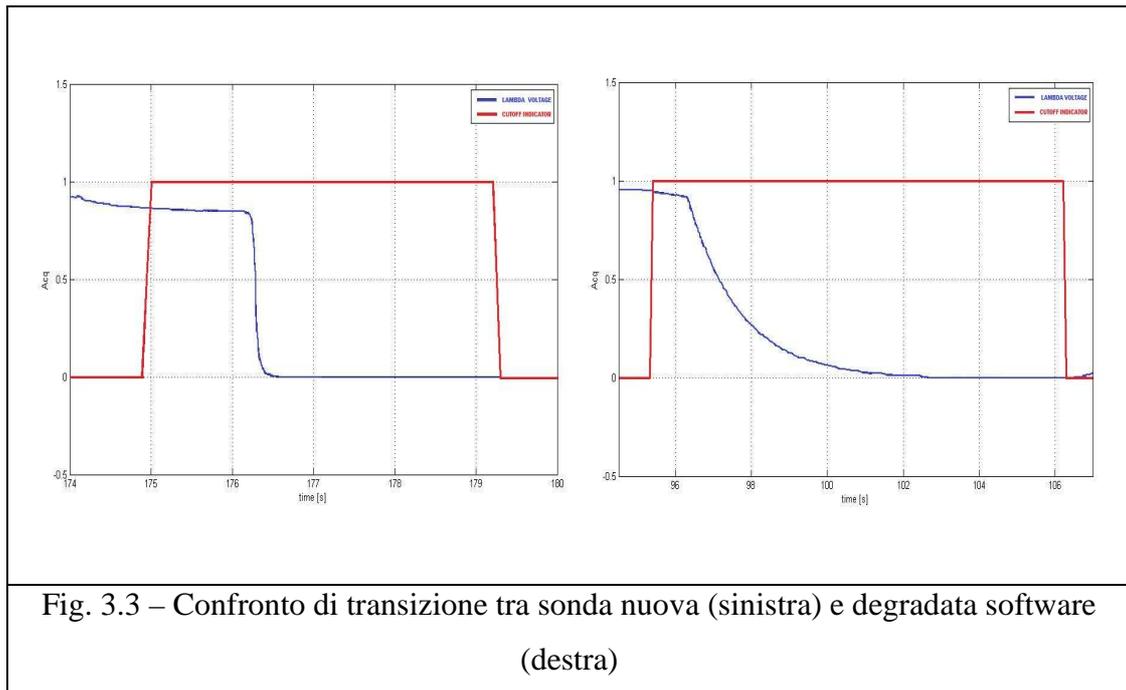
In Fig. 3.2 sono state verificate sperimentalmente le differenti tempistiche di ritardo per un gruppo di transizioni scelte a campione.

Altri due importanti fattori che incidono sulla risposta di questo sistema sono il carico motore e il regime motore. In particolare ci si aspetta una transizione più ripida e con tempi di attraversamento soglia minori nei punti motore ad alto carico e regime, viceversa, ci aspetteremo una transizione meno ripida e temporalmente più ritardata per i punti motore a più basso carico e regime.

Il principale fattore che influenza la transizione della sonda, ed in particolare la sua ripidezza, è sicuramente lo stato di invecchiamento e degrado del sensore stesso; va ricordato, infatti, che alcune parti del sensore vengono lambite direttamente dai gas di scarico che oltre a contenere componenti in grado di scatenare attacchi chimici, si trovano ad elevate temperature che fluttuano ampiamente, a seconda delle condizioni di funzionamento del motore provocando tensioni e stress termico sui materiali che costituiscono il sensore. La conseguenza di ciò consiste in un aumento dei tempi di risposta della sonda nella misura del titolo dei pacchetti di gas o, in altre parole, nell'aumento della costante di tempo della funzione di trasferimento, $G(s)$, tra il titolo dei pacchetti oggetto di misura (ingresso) e il titolo misurato dalla sonda (uscita):

$$G(s) = \frac{\text{TRASFORMATA USCITA}}{\text{TRASFORMATA INGRESSO}} = \frac{(A/F)_{\text{misurato}}(s)}{(A/F)_{\text{reale}}(s)} = \frac{1}{1 + \tau_{\text{SONDA}} \cdot s}$$

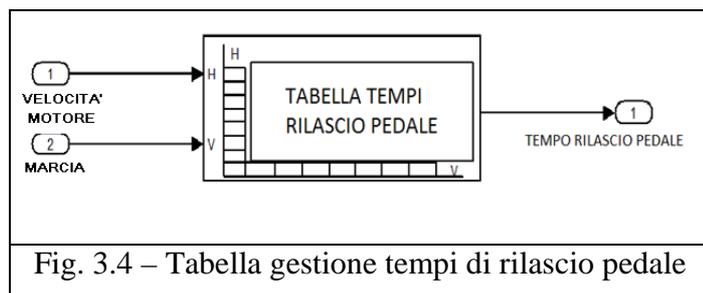
Nella figura sottostante (Fig. 3.3) è visibile la differenza tra il segnale di una sonda nuova ed il segnale dello stesso tipo di sonda, ma trattato via software per simularne la degradazione.



Per quanto riguarda l’influenza della modalità di spegnimento dei cilindri, occorre approfondire maggiormente l’argomento che viene trattato nel paragrafo successivo.

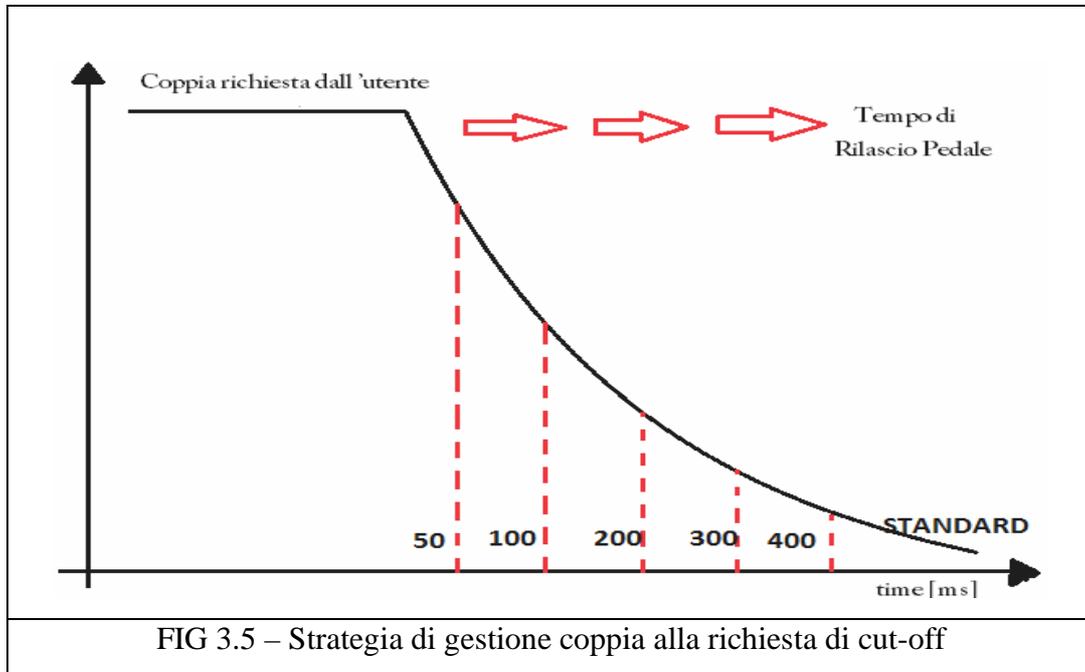
3.2 – Modalità di spegnimento cilindri (Cut-Off)

Attualmente in vettura, per la gestione delle modalità di esecuzione dello spegnimento dei cilindri, è presente una strategia calibrata (Fig. 3.4) tale da eseguire un “taglio” di coppia che non comprometta le condizioni di comfort per gli utenti.



Nello specifico, in funzione del regime motore e della marcia inserita nell’istante in cui viene richiesto il cut-off, è stata calibrata una tabella (Fig. 3.4) che come uscita presenta il “tempo di rilascio pedale” ottimale per data condizione di funzionamento, in ottica di quello detto in precedenza sul preservamento della guidabilità.

Questa calibrazione, che chiameremo “standard”, prevede l’attribuzione di tempi di rilascio pedale variabili tra i 50 e 800 ms. Quest’ultimo descrive il tempo che intercorre tra la richiesta del cut-off e l’effettivo spegnimento di tutti i cilindri del motore.



Da questo segue che l’entità di questo parametro influenza il tempo di ritardo sulla comparsa della transizione stimato a partire dall’inizio del cutoff; si può quindi dedurre che tempi di rilascio pedale ridotti porterebbero ad un contenimento dei tempi di diagnosi. Questa considerazione ha suggerito la ricerca di una strategia che permettesse, in determinate condizioni, di minimizzare il tempo di comparsa della transizione e quindi il tempo di rilascio pedale senza però, parallelamente, compromettere la guidabilità. Questa particolare strategia, denominata “forzata” in virtù del fatto che il tempo di rilascio pedale per la gestione del taglio cilindri verrà prodotto direttamente dall’algoritmo diagnostico e non lasciato all’attuale calibrazione implementata in centralina, sarà affiancata da una strategia base, denominata “naturale”, in cui la gestione del tempo rilascio pedale è governata dall’attuale calibrazione (standard), che

comunque consente la visione della transizione e conseguentemente la diagnosi del sensore.

3.3 – Studio dei tempi caratteristici

Con lo scopo di ottenere un quadro generale delle tempistiche caratterizzanti i segnali di interesse per la diagnosi è stato eseguito uno studio mirato sulle prime acquisizioni rese disponibili in azienda, relative ad un veicolo commerciale equipaggiato con catalizzatore e sonda a valle entrambi nuovi, cioè al massimo della loro efficienza.

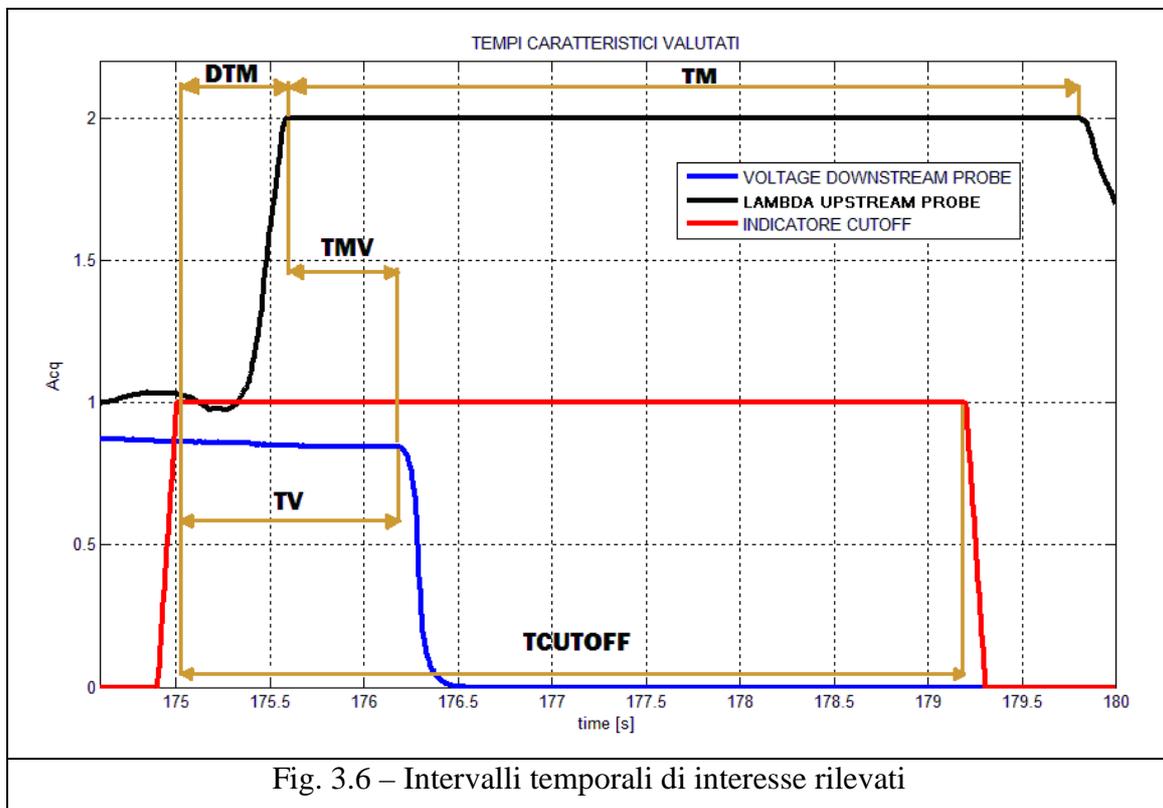


Fig. 3.6 – Intervalli temporali di interesse rilevati

Le acquisizioni, oggetto di analisi, sono state rilevate con calibrazione standard del tempo rilascio pedale, cioè con la normale calibrazione presente in centralina.

| CUTOFF | TM | DTM | Possibilità diagnosi | TV | TCUTOFF | TMV | Tempo di Diagnosi | Condizioni di Cutoff |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Sequenza di CutOff | Tempo per cui la sonda a monte registra un eccesso d'aria ($\lambda=2$) [s] | Tempo che intercorre tra l'inizio del cutoff e la visione dei primi pacchetti di ossigeno dalla Sonda a Monte [s] | Identifica o meno la presenza della transizione Grasso-Magro della Sonda a Valle (SI = la transizione è stata registrata, NO = la transizione non è stata registrata) | Tempo che intercorre tra l'inizio del cutoff e la transizione Grasso-Magro nella Sonda a Valle nel caso in cui venga registrata [s] | Durata Cut-off [s] | Tempo di stazionamento della Sonda a Monte a valori magri, prima che la Sonda a Valle effettui la transizione [s] | Tempo disponibile per eseguire la diagnosi della Sonda per essere certi di avere solo pacchetti di aria. [s] | Cambio Marcia |
| 1 | 1,136 | 0,392 | SI | 1,184 | 1,096 | 0,788 | -0,088 | 1-->2 |
| 2 | 0,664 | 0,332 | NO | 0,000 | 0,596 | 0,000 | | 2-->3 |
| 3 | 0,948 | 0,344 | SI | 1,172 | 0,896 | 0,824 | -0,276 | 3-->4 |
| 4 | 0,808 | 0,368 | NO | 0,000 | 0,796 | 0,000 | | 4-->5 |
| 5 | 0,408 | 0,272 | NO | 0,000 | 0,400 | 0,000 | | 5-->6 |
| 6 | 1,040 | 0,844 | SI | 1,400 | 1,296 | 0,552 | -0,104 | CutOff in 6 |
| 7 | 1,848 | 0,336 | NO | 0,000 | 1,504 | 0,000 | | CutOff in 5 |
| 8 | 0,336 | 0,428 | NO | 0,000 | 0,400 | 0,000 | | cutoff in 4 |
| 9 | 0,236 | 0,288 | NO | 0,000 | 0,300 | 0,000 | | 4-->5 |
| 10 | 19,760 | 0,624 | SI | 1,288 | 19,596 | 0,660 | 18,308 | Cutoff in 5-->Cutoff in 4-->Cutoff in 3 |
| 11 | 0,252 | 0,444 | NO | 0,000 | 0,300 | 0,000 | | 3-->2 |
| 12 | 1,188 | 0,692 | NO | 0,000 | 1,400 | 0,000 | | CutOff in 2 |
| 13 | 1,840 | 0,576 | NO | 0,000 | 1,996 | 0,000 | | CutOff in 2 |
| 14 | 0,124 | 0,228 | NO | 0,000 | 0,200 | 0,000 | | 2-->3 |
| 15 | 0,212 | 0,256 | NO | 0,000 | 0,300 | 0,000 | | 3-->4 |
| 16 | 0,400 | 0,240 | NO | 0,000 | 0,396 | 0,000 | | 4-->5 |
| 17 | 7,904 | 0,344 | SI | 0,624 | 7,800 | 0,276 | 7,176 | CutOff in 5-->CutOff in 4 |
| 18 | 3,020 | 0,500 | NO | 0,000 | 2,896 | 0,000 | | CutOff in 4 |
| 19 | 1,388 | 0,252 | NO | 0,000 | 1,300 | 0,000 | | CutOff in 3 |
| 20 | 2,024 | 0,472 | NO | 0,000 | 1,992 | 0,000 | | Cutoff in 3 |
| 21 | 1,764 | 0,584 | NO | 0,000 | 1,700 | 0,000 | | CutOff in 4 |
| 22 | 6,172 | 0,344 | NO | 0,000 | 6,000 | 0,000 | | CutOff in 3 |
| 23 | 0,196 | 0,308 | NO | 0,000 | 0,204 | 0,000 | | 3-->4 |
| 24 | 4,240 | 0,572 | SI | 1,284 | 4,196 | 0,708 | 2,912 | CutOff in 4-->CutOff in 3 |
| 25 | 3,460 | 0,216 | SI | 0,520 | 2,976 | 0,300 | 2,456 | Sgasata a folle |

Tab 3.1 – Tempi caratteristici rilevati nel caso di sonda e catalizzatore nuovi con calibrazione standard dei tempi rilascio pedale

Sui 25 cut-off eseguiti durante questa prova su strada, in soli 7 di questi è stato possibile registrare la transizione grasso-magro indotta sulla sonda lambda dal cut-off. Questa bassa frequenza di transizioni rilevate è riconducibile all'incapacità del segnale in tensione della sonda di risalire verso voltaggi alti (Fig. 3.7), identificativi di una composizione ricca dei gas di scarico.

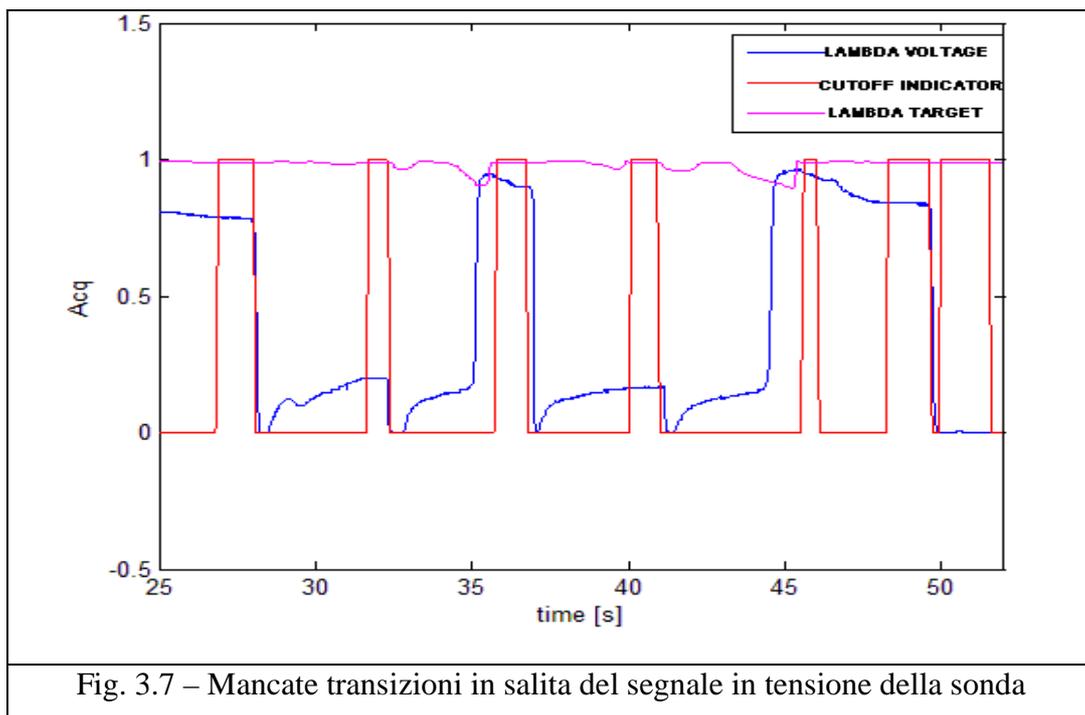


Fig. 3.7 – Mancate transizioni in salita del segnale in tensione della sonda

Il segnale in tensione riesce a risalire, per poi eseguire la transizione grasso-magro, solo quando la strategia di controllo titolo attua un rapporto aria-combustibile particolarmente grasso (ad esempio @ $t=35$ s, Figura 3.7). Nelle altre condizioni operative, evidentemente, pur essendo in condizioni di titolo grasso l'elevato ossigeno accumulato dal catalizzatore, che ricordiamo possiede l'OSC massimo della sua intera vita, non consente alla sonda di registrare gas di composizione grassa all'uscita del catalizzatore. In base a queste considerazioni nasce l'esigenza di inserire tra

le condizioni abilitanti la verifica di valori di tensione della sonda corrispondenti ad un titolo grasso.

In parallelo alla perdita di queste transizioni, altre se ne perdono durante i cut-off generati da cambi marcia che, per la loro breve durata, non permettono al segnale in tensione della sonda di completare la transizione (Fig. 3.8).

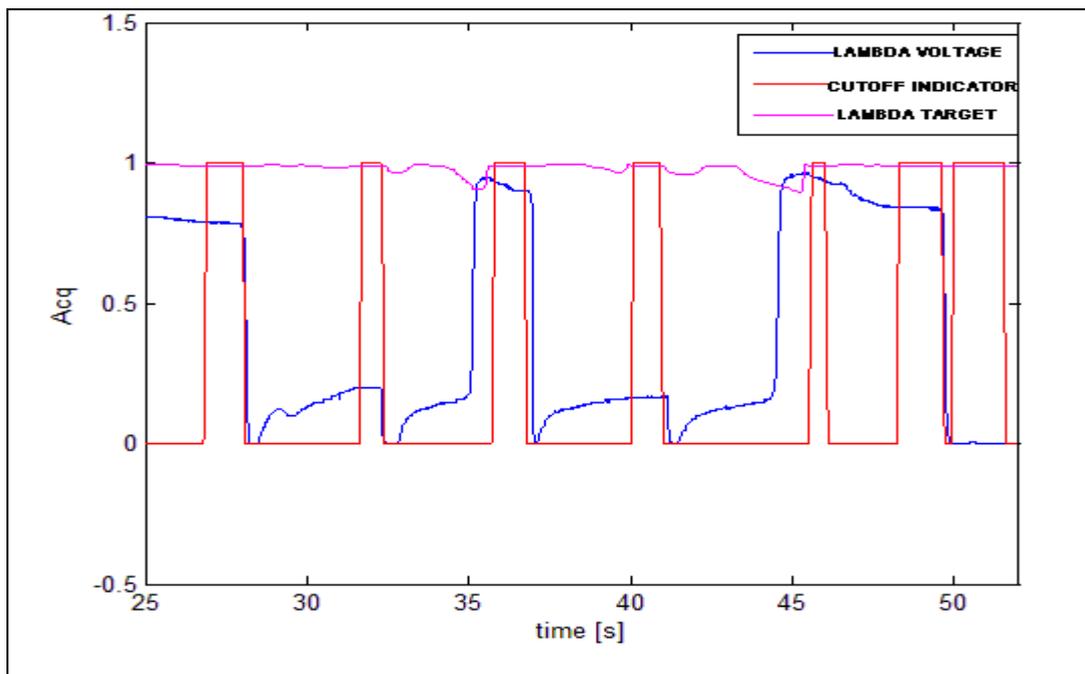


Fig. 3.8 – Mancate transizioni in discesa del segnale in tensione della sonda

Un ulteriore vincolo che riduce ulteriormente i cutoff utili alla diagnosi del sensore è stato imporre che, per tutta la durata della transizione del segnale della sonda, il motore sia ancora in modalità di cut-off, in quanto una ripresa della combustione potrebbe consentire a pacchetti di miscela (non più sola aria) di falsare la transizione oggetto di rilevamento e stima.

Quindi, imponendo una durata del cut-off (TCUTOFF) maggiore del ritardo di comparsa della transizione (TV), i cut-off utili si riducono a quelli di durata maggiore e ad un numero di 4 sui 25 totali presenti nell'acquisizione. In Fig.3.1 i cut-off utili alla registrazione della

transizione ancora con il motore in modalità cut-off sono evidenziati in verde, viceversa, si usa il colore rosso per quelli in cui il cut-off termina prima della comparsa della transizione.

3.4 - Caratterizzazione influenza del carico, regime e marcia

Per iniziare a capire quali condizioni motore possano favorire la transizione oggetto di diagnosi sono stati elaborati i grafici sottostanti che riportano le condizioni di carico motore (in termini di pressione media collettore) e regime motore (in termini di velocità dell'albero motore), registrate in occasione dell'inizio dei cut-off che hanno consentito la registrazione della transizione. Nei grafici sono state inserite anche quelle transizioni in cui il cut-off si interrompe prima della fine della transizione in modo da ottenere una più ampia popolazione di dati. Le acquisizioni utilizzate si riferiscono a cicli di guida su strada ottenute con una vettore con le caratteristiche riportate nella seguente tabella:

| | |
|--------------------------|----------------------|
| CILINDRATA | 1368 cm ³ |
| NUMERO DI CILINDRI | 4, in linea |
| NUMERO DI VALVOLE | 16 |
| CORSA | 84 mm |
| ALESAGGIO | 72 mm |
| RAPPORTO DI COMPRESSIONE | 9.8:1 |
| SISTEMA DI INIEZIONE | MULTI-POINT, PFI |
| POTENZA MASSIMA | 135 CV a 5000 rpm |
| COPPIA MASSIMA | 230 Nm a 1750 rpm |
| E.C.U | Magneti Marelli |
| ALIMENTAZIONE | Benzina |

Tabella 3.2 – Specifiche motore

Nello specifico, per individuare l'influenza che il tempo di rilascio pedale può avere sulla frequenza delle transizioni utili, lo studio è stato eseguito, oltre che sull'acquisizione con calibrazione "standard", anche su acquisizioni con un tempo di rilascio pedale fisso, riducendolo da un valore di 400 ad uno di 50 ms.

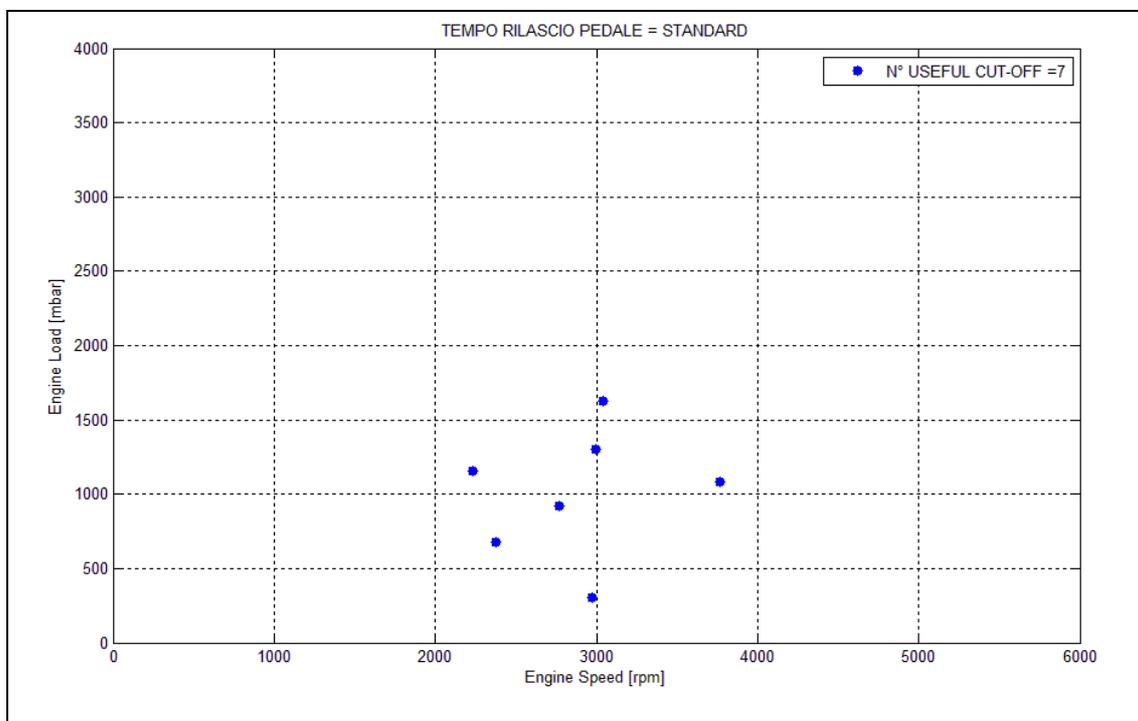


Fig. 3.9 – Punti motore di inizio cut-off utili (Tempi di rilascio pedale = STANDARD)

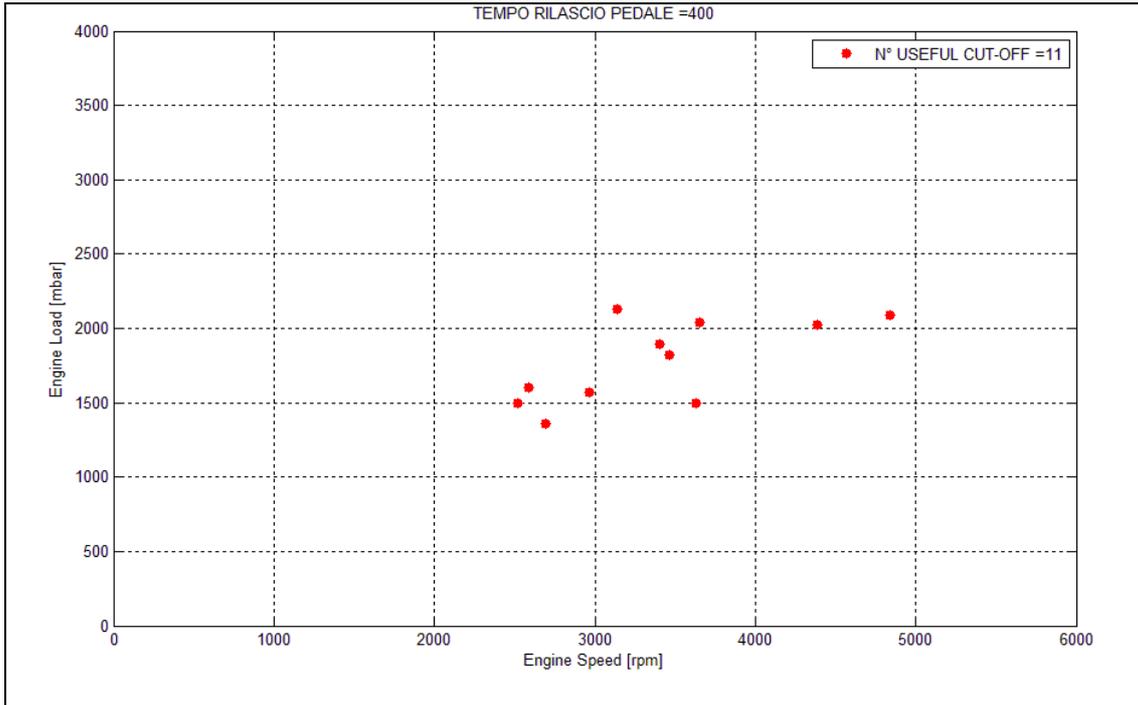


Fig. 3.10 – Punti motore di inizio cut-off utili (Tempi di rilascio pedale = 400 ms)

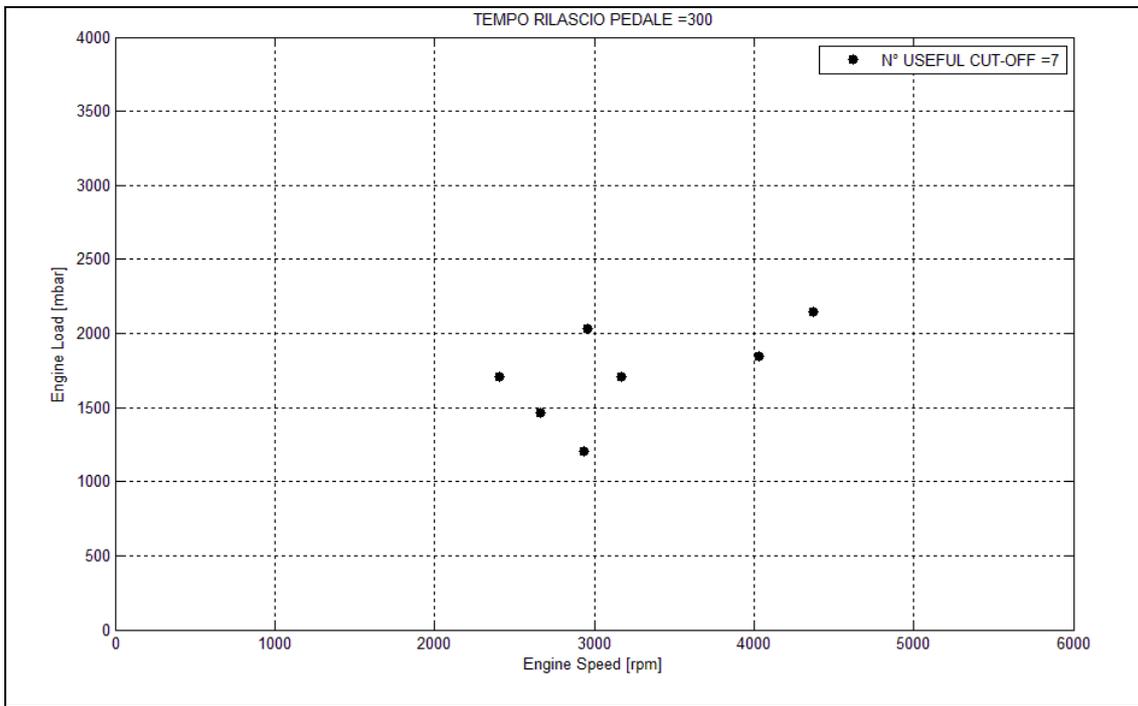


Fig. 3.11 – Punti motore di inizio cut-off utili (Tempi di rilascio pedale = 300 ms)

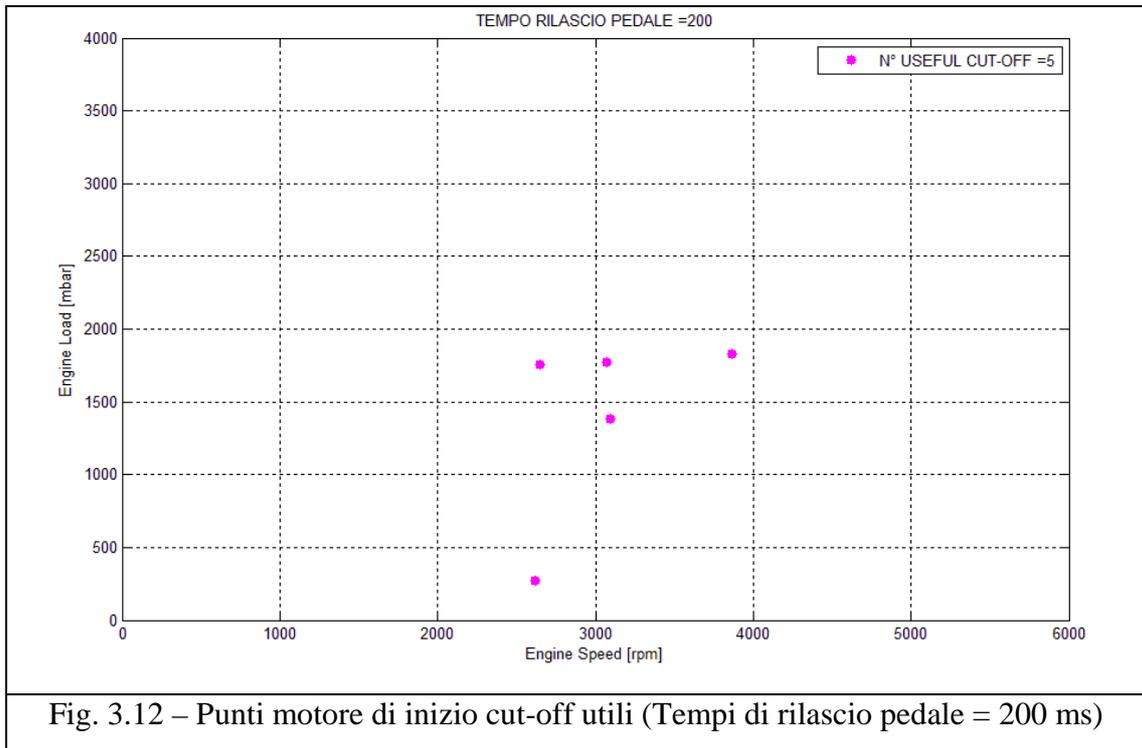


Fig. 3.12 – Punti motore di inizio cut-off utili (Tempi di rilascio pedale = 200 ms)

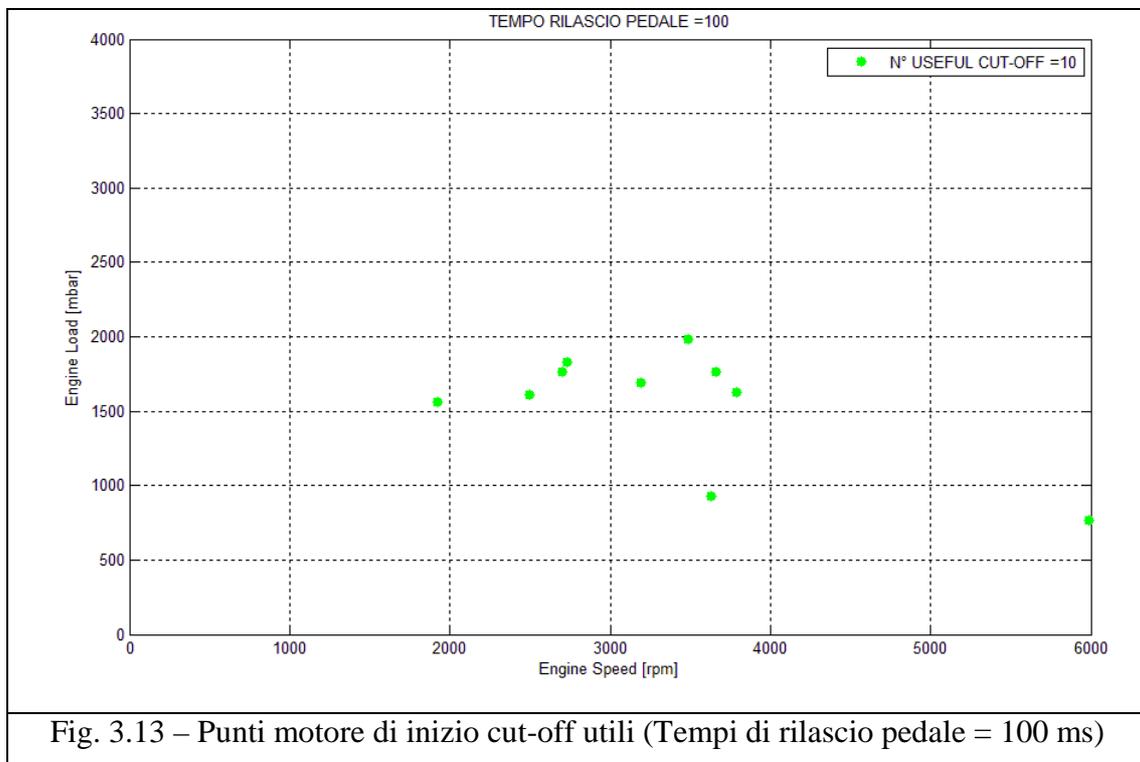


Fig. 3.13 – Punti motore di inizio cut-off utili (Tempi di rilascio pedale = 100 ms)

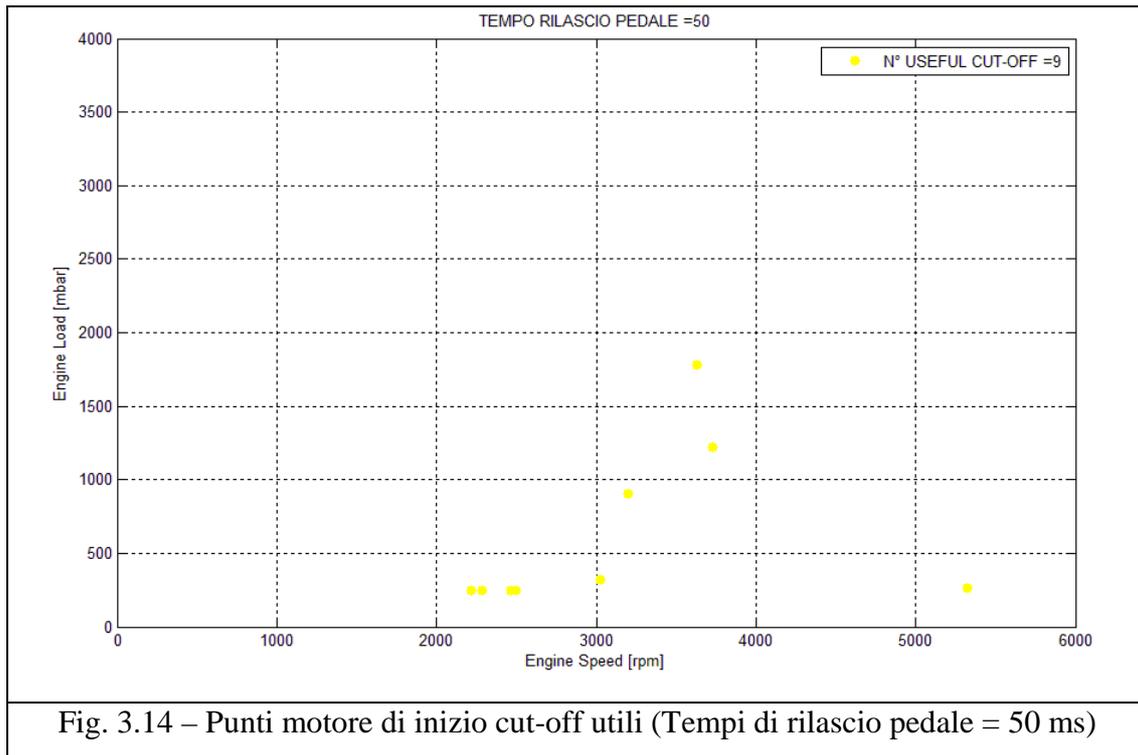


Fig. 3.14 – Punti motore di inizio cut-off utili (Tempi di rilascio pedale = 50 ms)

Dai risultati riportati, per quanto ridotti siano i campioni di studio, si osserva subito che il riconoscimento della transizione avviene con una buona frequenza per i medi regimi e per condizioni di carico sufficientemente ampie. Inoltre, in seconda battuta, si può osservare che la frequenza dei cut-off utili rilevati non è inversamente proporzionale al tempo di rilascio pedale, in altre parole non si evidenzia un aumento di rilevamento di transizioni legato alla riduzione del tempo di rilascio pedale. A prescindere da questo, tempi di rilascio pedale ridotti permettono la registrazione della transizione in tempi più brevi e quindi più probabilità di terminare la diagnosi prima del termine del cut-off. Si riconosce infine che il numero di transizioni rilevabili per ogni acquisizione, è legato, oltre che a tutti i fattori discussi fino ad ora, allo stile di guida dell'utente ed in particolare alle modalità di utilizzo del pedale dell'acceleratore.

Dalle prime analisi fatte sulle condizioni operative in cui la diagnosi avrebbe maggior probabilità di successo, possiamo identificare, come

visibile in Fig. 3.15, una nuvola di punti motore ottimali di inizio cut-off nell'intorno dei 3000-3500 giri/min e con livelli di carico nell'intorno di 1500 mbar di pressione collettore.

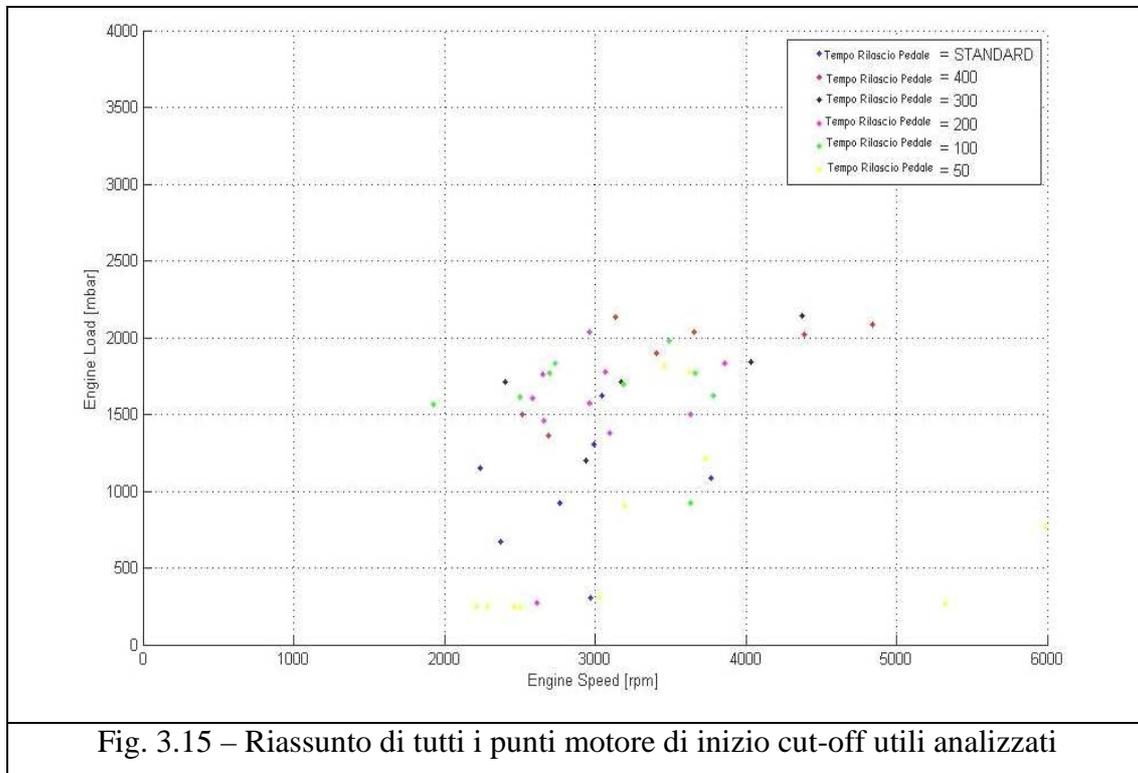
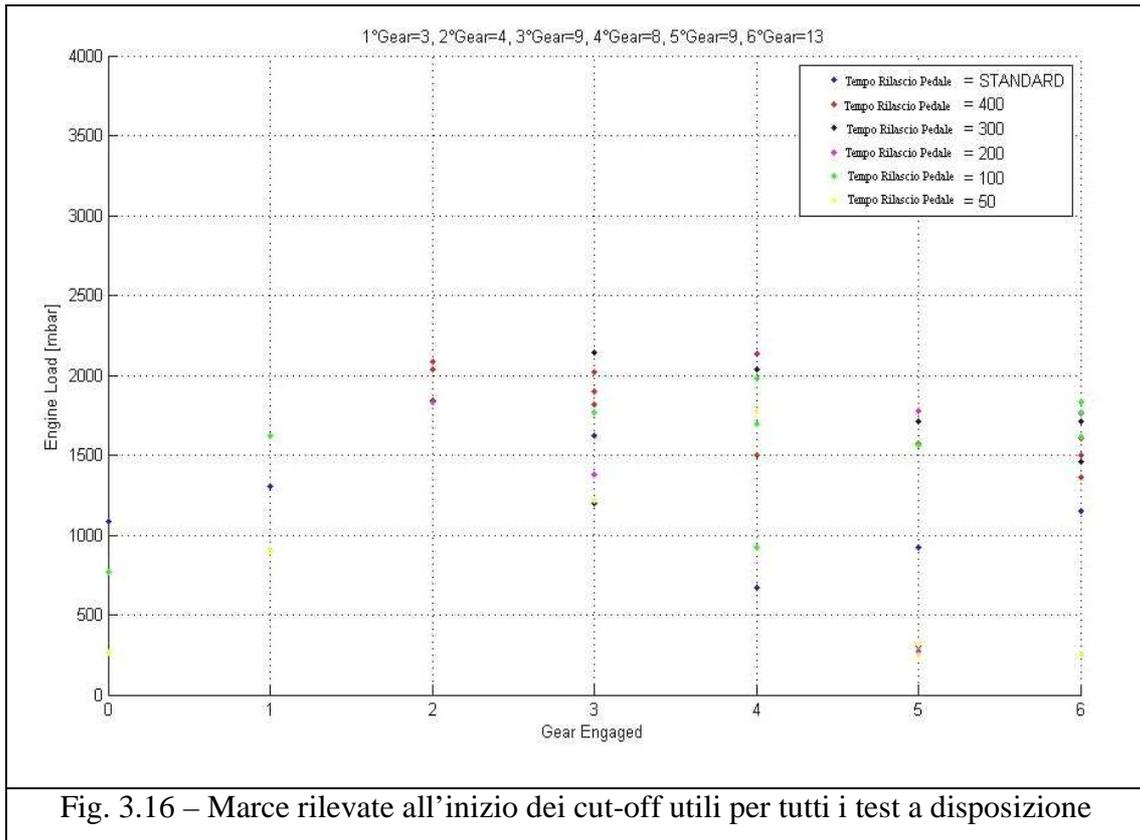


Fig. 3.15 – Riassunto di tutti i punti motore di inizio cut-off utili analizzati

Per completare l'analisi sulle condizioni ottimali per l'abilitazione della diagnosi, è stata rilevata, per ogni cut-off utile a disposizione, la marcia ingranata prima della richiesta dello stesso. Da questo tipo di studio vorremmo riscontrare, ed i risultati in Fig. 3.16 lo dimostrano, la possibilità di eseguire la diagnosi con cut-off avviati a partire da marce alte; questo in quanto nella strategia forzata, in cui si riduce il tempo di rilascio pedale per abbreviare i tempi di diagnosi, ci si aspetta una minor ripercussione sulla guidabilità nel caso in cui l'inerzia del veicolo sia sufficientemente elevata da non generare bruschi rallentamenti legati al taglio della coppia erogata, cioè in situazioni di sufficiente velocità del veicolo, garantita, per l'appunto, dalle marce più alte.



3.5 – Ottimizzazione della frequenza di campionamento del segnale in tensione della sonda

Come risultato della diagnosi, la strategia dovrà essere in grado di elaborare un indice che sia rappresentativo dello stato funzionale della sonda e che, come prima linea guida, può essere ricercato nella pendenza della transizione. Premesso ciò, insieme all'esigenza di modellare un software che utilizzi la minor potenza computazionale possibile, lo studio che riportiamo è servito a valutare come la frequenza di campionamento influisca sulla stima della pendenza della transizione che, per ora, consideriamo come indice di detezione per la diagnosi. La centralina attuale ha la possibilità di acquisire i segnali dei sensori presenti nel sistema di controllo a tre differenti intervalli di tempo: 4 ms (fast), 12 ms

(medium), 100 ms (slow). Sulla base di ciò, le acquisizioni a disposizione sono state ricampionate secondo i suddetti tempi di campionamento, e sono state calcolate le pendenze delle transizioni interpolando il segnale con una retta nell'intervallo temporale in cui avviene la transizione grasso-magro. Scegliendo la pendenza calcolata in modalità “fast” come quella più rappresentativa di quella reale, sono quindi state paragonate le pendenze ottenute con i ricampionamenti in modalità “medium” e in “slow”.

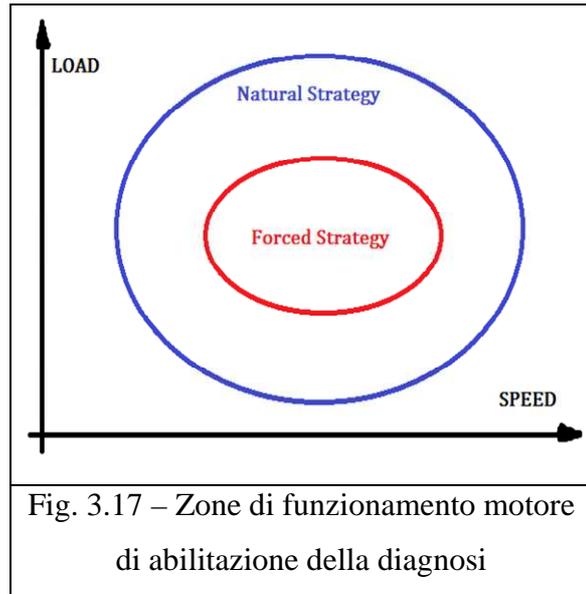
| ACQUISIZIONI | ANGOLO MEDIO (per singola acq.) [deg] | | | ERRORE 12 ms (Rispetto al campionamento a 4ms) [%] | ERRORE 100 ms (Rispetto al campionamento a 4ms) [%] |
|--------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| | Tempo Rilascio Pedale | Campionata a 4 ms | Campionata a 12 ms | | |
| STANDARD | 86,1137 | 86,4144 | 60,6925 | 0,35 | -29,52 |
| 400 | 85,8652 | 86,8849 | 61,0535 | 1,19 | -28,90 |
| 300 | 85,6756 | 87,4638 | 60,3776 | 2,09 | -29,53 |
| 200 | 84,0205 | 84,0636 | 59,6397 | 0,05 | -29,02 |
| 100 | 85,693 | 86,6679 | 60,6882 | 1,14 | -29,18 |
| 50 | 85,2139 | 84,2384 | 62,6507 | -1,14 | -26,48 |
| | | ERRORE MEDIO = | | 0,61 | -28,77 |

Tab. 3.2 – Pendenze medie rilevate per ogni test ed errori di risoluzione

Come risultato è emerso che il campionamento in “medium” è, nei limiti di tolleranza, ed è ancora con buona precisione rappresentativo del reale andamento della transizione.

3.6 – Conclusioni fase sperimentale di caratterizzazione

Come emerso dai paragrafi precedenti, l'insieme di prove sperimentali a disposizione ha permesso di studiare le migliori condizioni di abilitazione per la diagnosi. In definitiva si è scelto un campo di punti motore per l'abilitazione della diagnosi denominata "naturale" molto ampio, limitato solamente dai confini imposti da particolari condizioni motore sulle quali non è pensabile di attivare la diagnosi (funzionamento al minimo e in condizioni di pieno carico a regimi elevati). Per l'abilitazione della diagnosi forzata si è scelta, invece, un'area di punti motore più ristretta, sottoinsieme della precedente (Fig. 3.17) e limitata a



quei punti motore che hanno un'alta probabilità di registrare la transizione e che influiscono meno sulla guidabilità del veicolo: regimi e carichi medio-alti e marce alte.

Nel capitolo successivo verrà presentato l'indice scelto per la descrizione della transizione e come si è evoluto a seguito di studi mirati per ridurre al minimo la dispersione.

Capitolo 4

Scelta e ottimizzazione dell'indice di detezione

4.1 – Indice base

La strategia di diagnosi prevede l'elaborazione di un parametro in grado di rappresentare al meglio la dinamica della transizione del segnale in tensione della sonda. Come punto di partenza è stato scelto un indice di estrema semplicità che fosse rappresentativo della pendenza della transizione, così definito:

$$INDICE\ BASE = \frac{RICH - LEAN}{END - START}$$

Esso esprime il coefficiente angolare della retta virtuale che collega i punti di inizio e termine diagnosi. La stima di questo coefficiente avviene registrando i primi valori disponibili, a fronte del superamento delle due soglie

RICH e LEAN, relative alle due variabili: tensione ai capi della sonda e tempo. L'indice così calcolato avrà le dimensioni di una tensione su un tempo e l'unità di misura sarà Volt su secondi ([V/s]).

Sulla base di questo primo indice è stato eseguito un primo studio con le seguenti finalità:

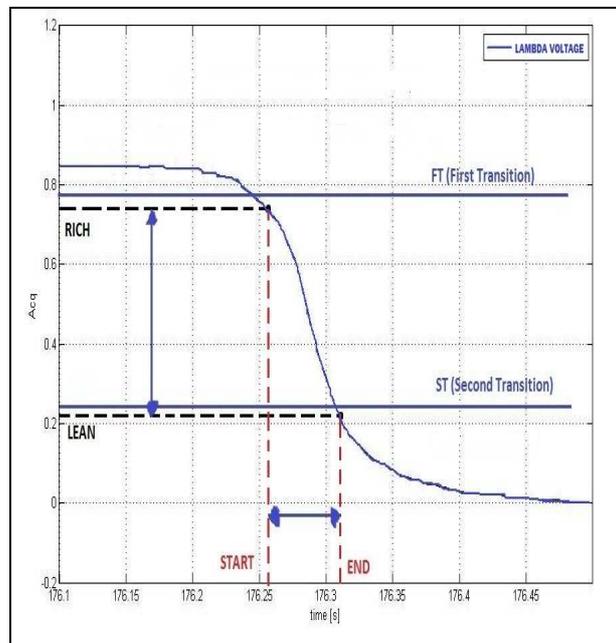
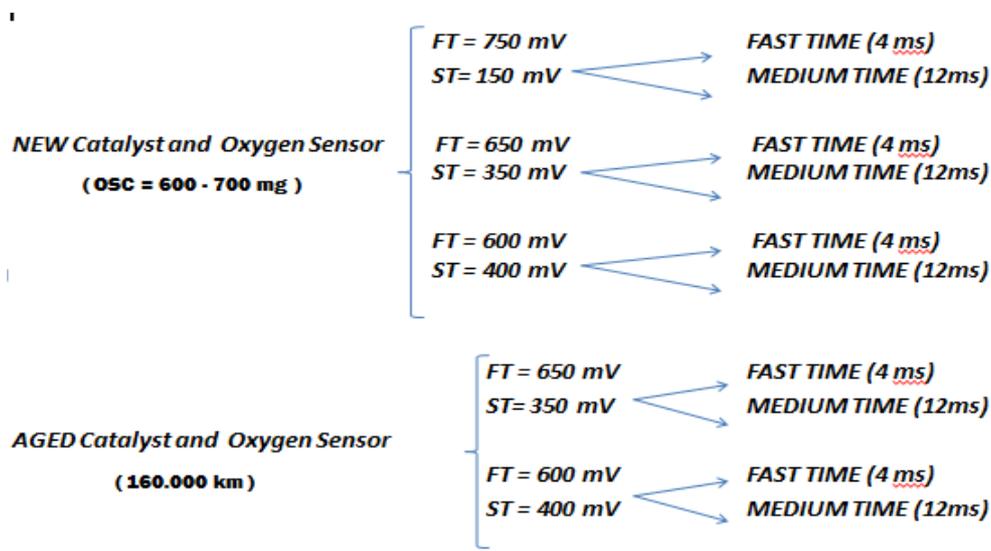


Fig. 4.1 – Indice di detezione base

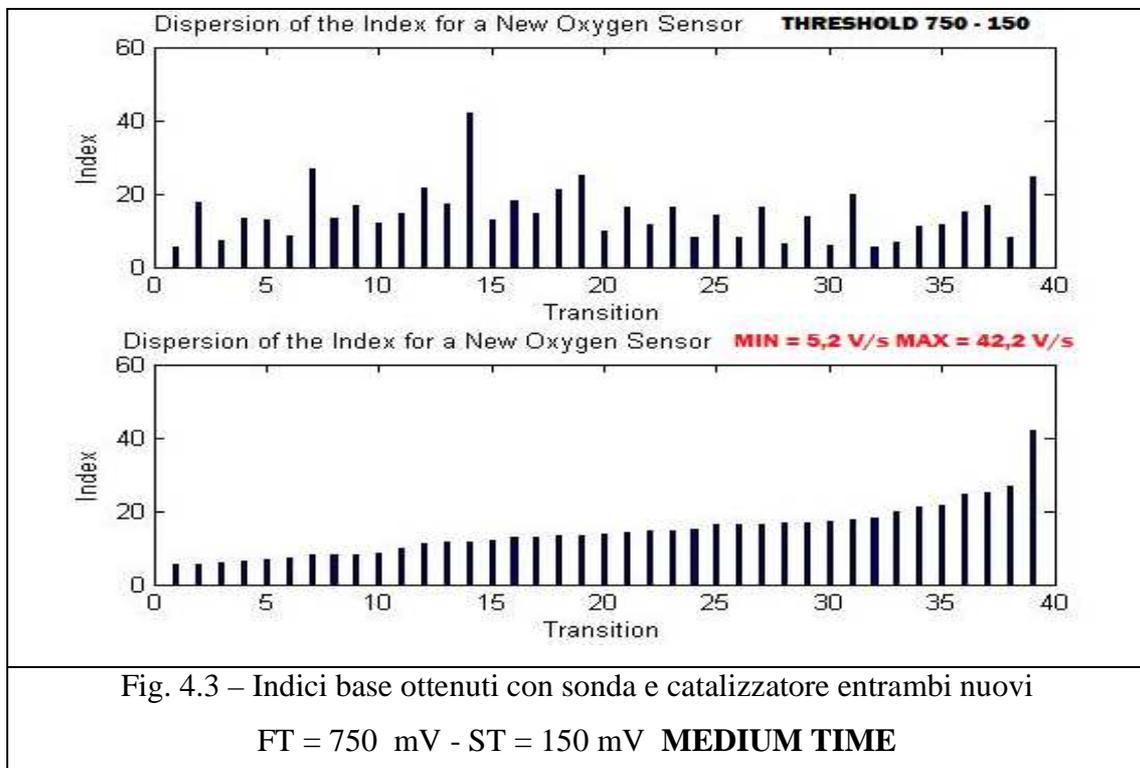
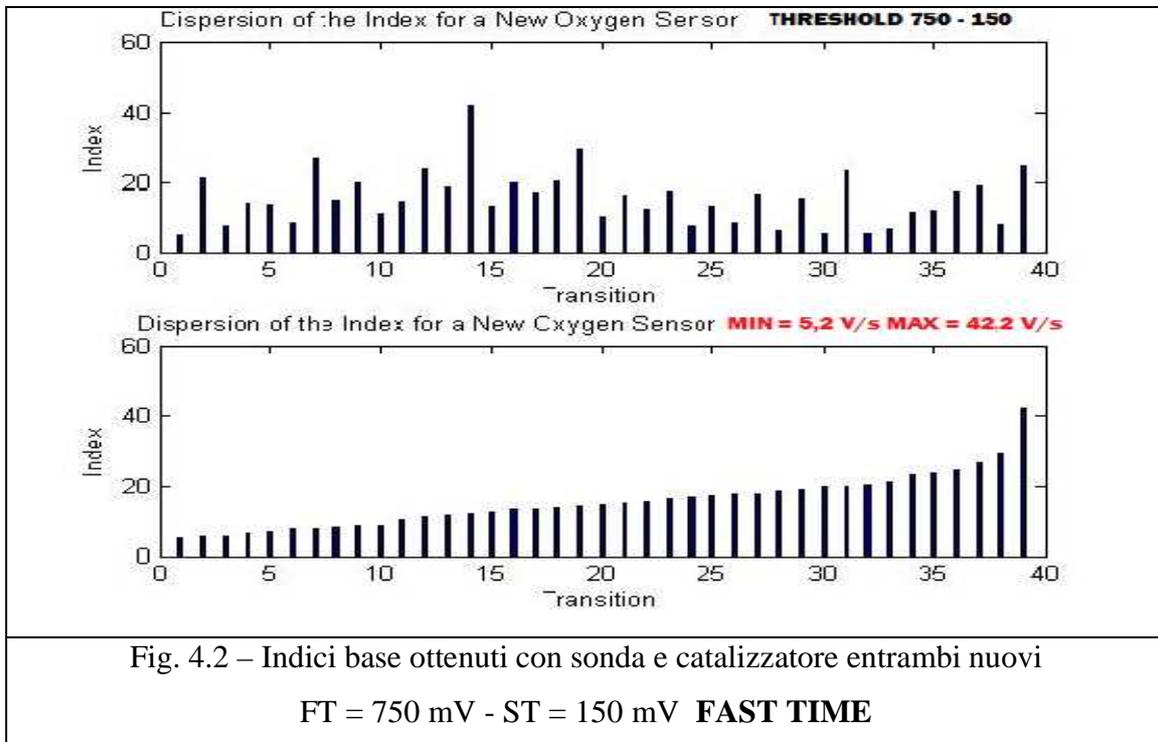
- Ottenere un primo dato sulla dispersione dell'indice proposto, con lo scopo di capire se gli indici, relativi a sonda nuova e invecchiata siano sufficientemente differenti.
- Accertare la possibilità di eseguire il calcolo dell'indice con un'evoluzione del segnale ogni 12 ms e cioè in modalità “medium”.

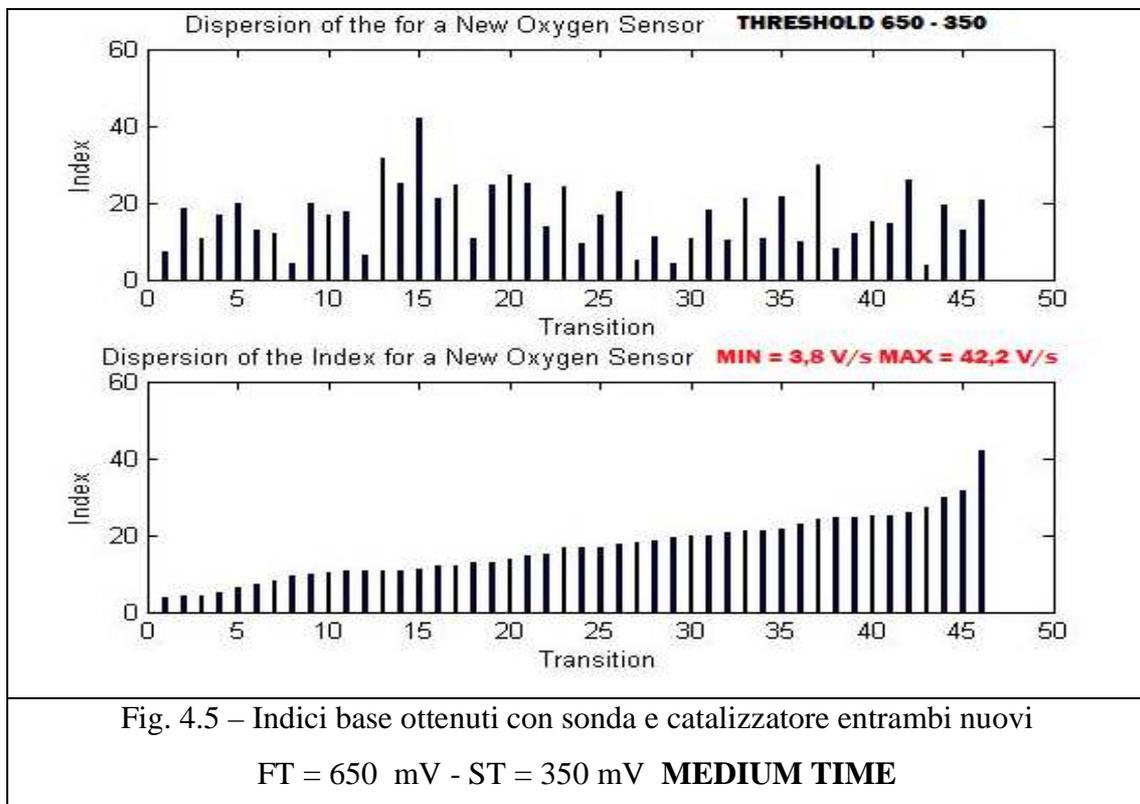
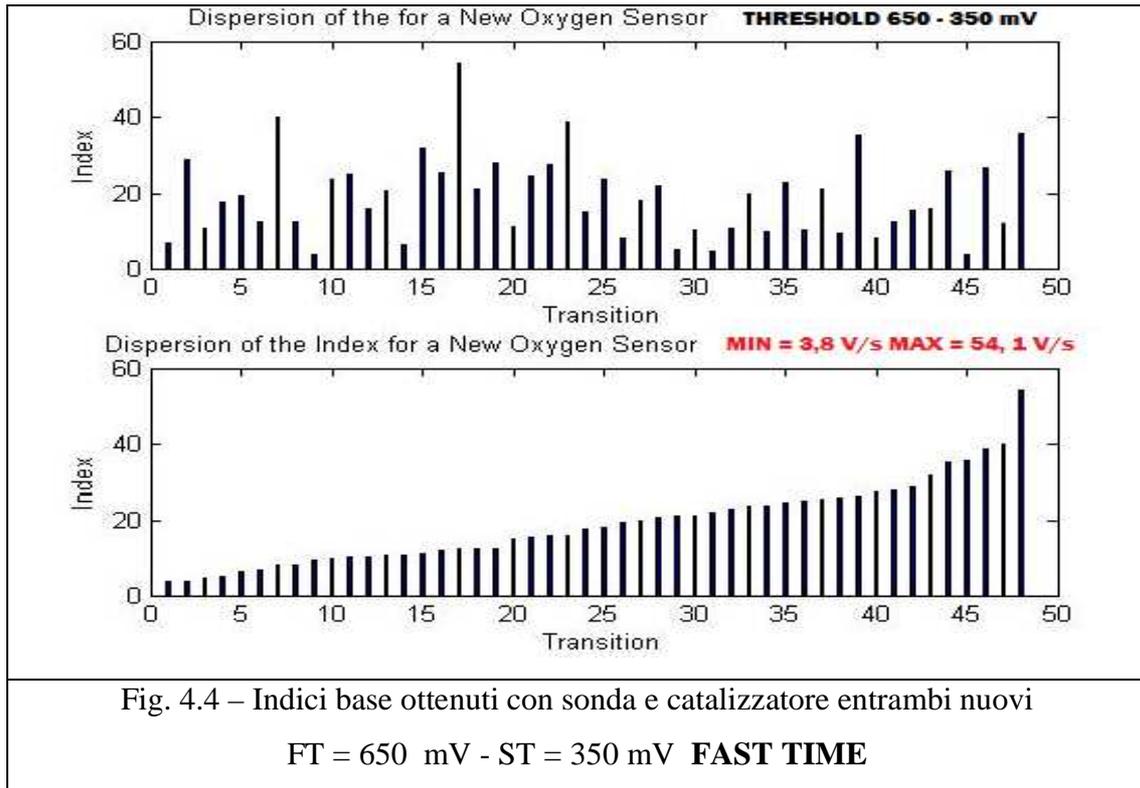
L'analisi effettuata ha provveduto al calcolo degli indici per tutte le transizioni utili delle acquisizioni utilizzate in precedenza per la caratterizzazione delle condizioni abilitanti la diagnosi. L'indice è stato calcolato sia in modalità “fast” che “medium” e con l'applicazione di coppie di soglie differenti. Il seguente schema riassume i test effettuati:

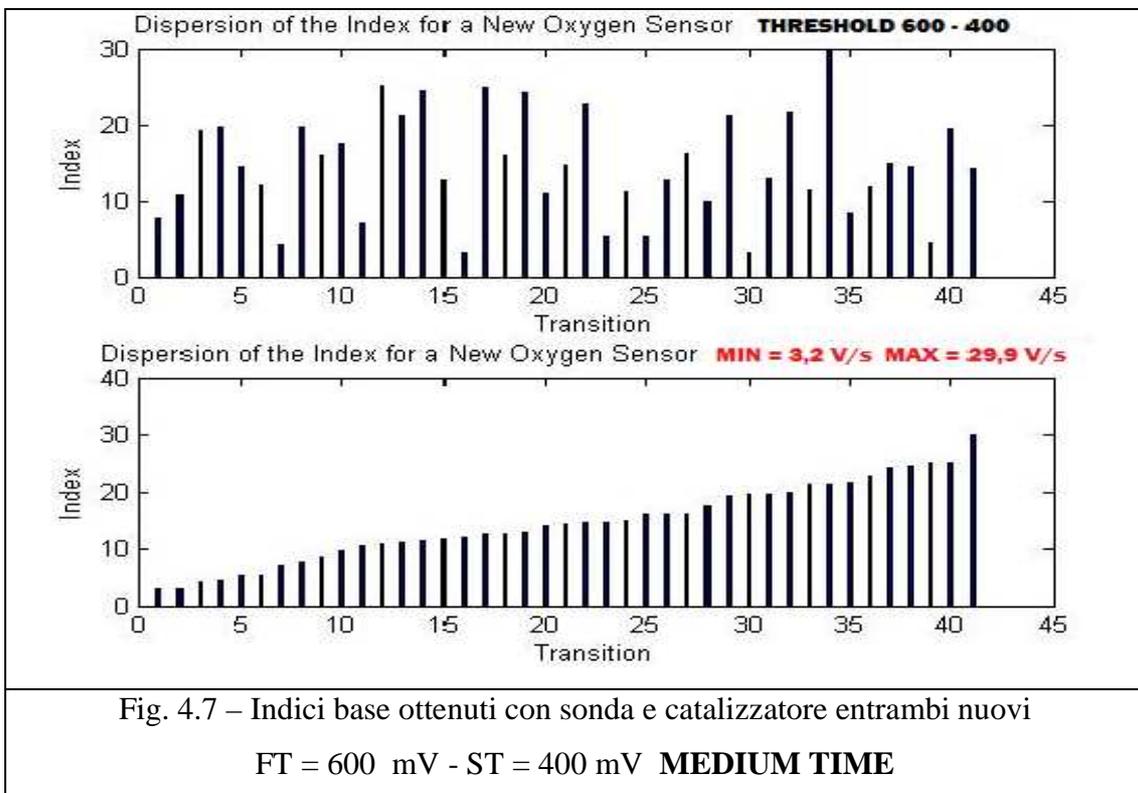
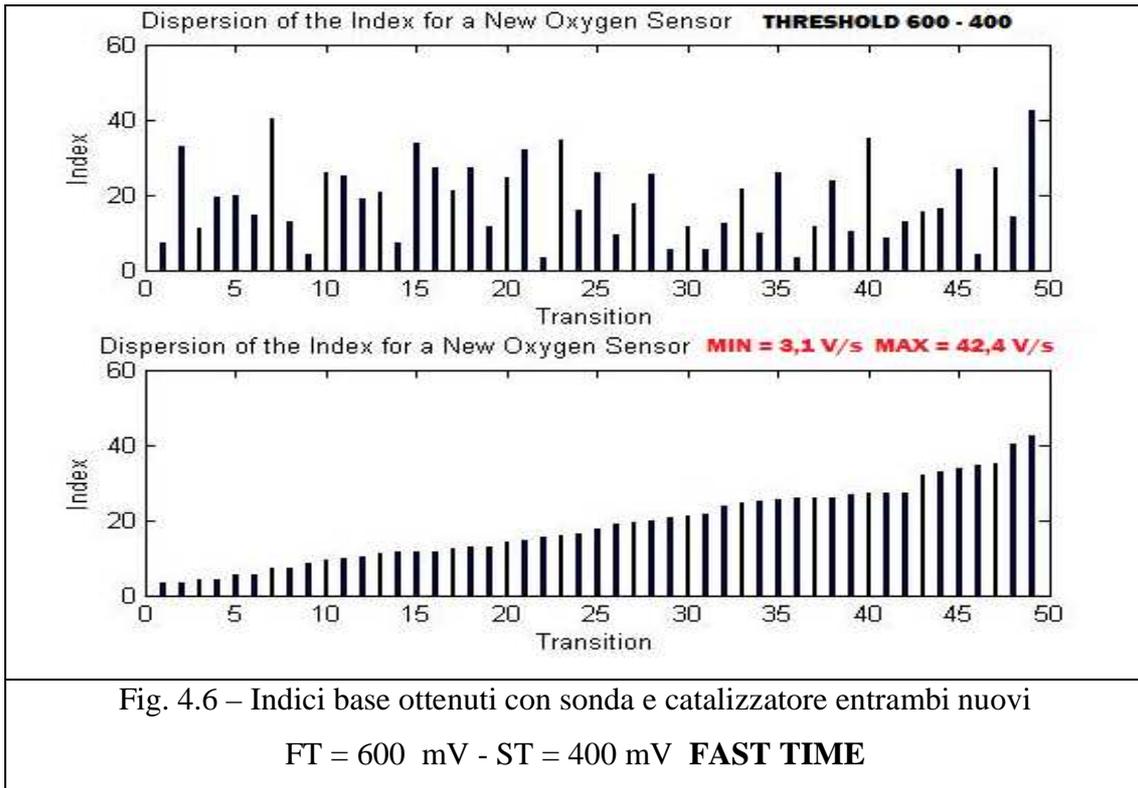


E' possibile notare che per le acquisizioni relative ad una sonda invecchiata non è stato possibile eseguire il test con le soglie FT e ST pari a 750 e 150 mV, in quanto il segnale della sonda, a causa dell'invecchiamento, non riesce a risalire ai valori di tensione normalmente auspicabili per una composizione grassa dei gas di scarico. I risultati ottenuti vengono qua sotto riportati tramite due istogrammi: il primo riporta gli indici calcolati secondo l'ordine sparso di studio, mentre nel secondo tali indici sono riordinati in senso crescente per meglio evidenziare la dispersione dell'indice.

4.1.1– Indici base ottenuti con sonda e catalizzatore nuovi







Da questa prima carrellata di risultati, inerenti al solo caso di sonda e catalizzatori entrambi nuovi, possiamo esporre le seguenti considerazioni:

- a) Il numero di transizioni utili rilevate aumenta con il restringersi dell'intervallo descritto dalle due soglie; si evidenzia il massimo di transizioni rilevate con la coppia di soglie 600 mV e 400 mV, in quanto valori di soglia superiore (FT), eccessivamente alti, e di soglia inferiore (ST), esageratamente bassi, non permettono di rilevare quelle transizioni che non iniziano e non terminano da valori convenzionali della tensione della sonda per miscela grassa e magra.
- b) L'evoluzione del segnale in "medium time" ha buoni risultati solo nel primo caso, relativo cioè a FT pari 750 mV e ST pari a 150 mV. In tale situazione i due punti, individuati dalle coppie di variabili di tempo e tensione di inizio e fine diagnosi, sono sufficientemente distanti da permettere una corretta stima del coefficiente angolare. Negli altri due casi, rispettivamente con soglie FT pari a 650 e 600 mV e ST pari a 350 e 400 mV, si osserva una perdita di transizioni utili al calcolo dell'indice che aumenta nell'ultimo caso dove il tempo, tra inizio e fine diagnosi, è molto ridotto.
- c) La dispersione dell'indice calcolato è molto alta in tutti i test eseguiti, pur trattandosi di transizioni eseguite dalla stessa sonda.

Va sottolineato che, pur avendo una perdita di transizioni utili alla stima dell'indice con un'evoluzione a 12 ms, le acquisizioni fin qui analizzate si riferiscono ad un sensore nuovo (condizione che riduce abbondantemente i tempi della transizione), per cui è ancora pensabile di mantenere valido questo tempo di campionamento per l'evoluzione della diagnosi, soprattutto se si considera il nostro interesse ad identificare un invecchiamento del sensore (condizione per cui i tempi di transizione si allungano).

4.1.2– Indici base ottenuti con sonda e catalizzatore invecchiati

A questo punto, vengono di seguito riportati i risultati ottenuti dall'analisi del segnale di una sonda lambda invecchiata montata sulla stessa vettura ed acquisita durante un ciclo di omologazione completo ECE-EUDC, posta a valle di un catalizzatore con 100.000 km di vita alle spalle.

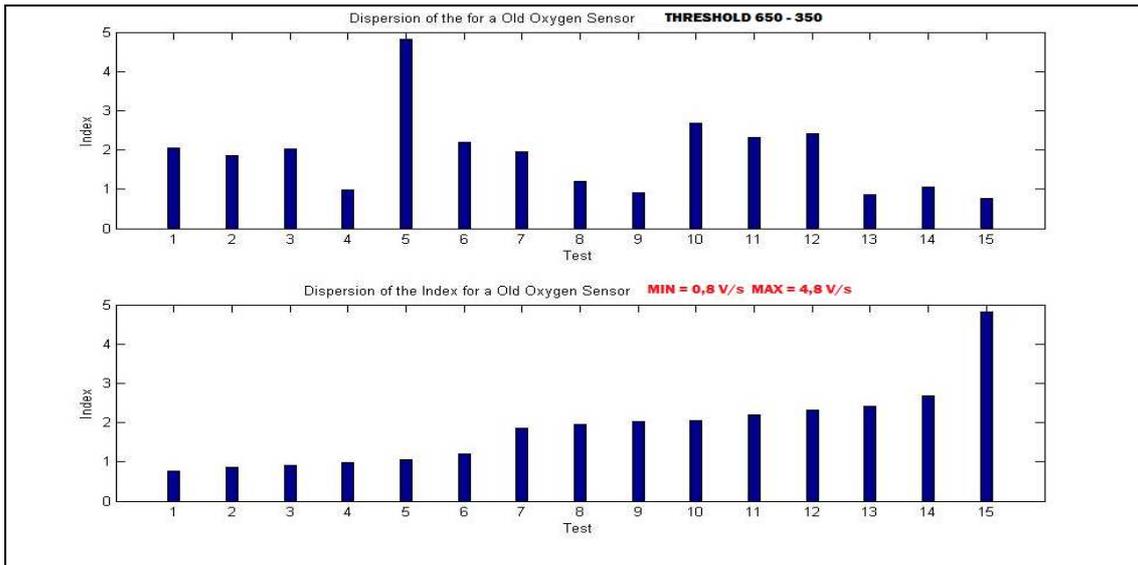


Fig. 4.8 – Indici base ottenuti con sonda e catalizzatore entrambi invecchiati
 FT = 650 mV - ST = 350 mV **FAST TIME**

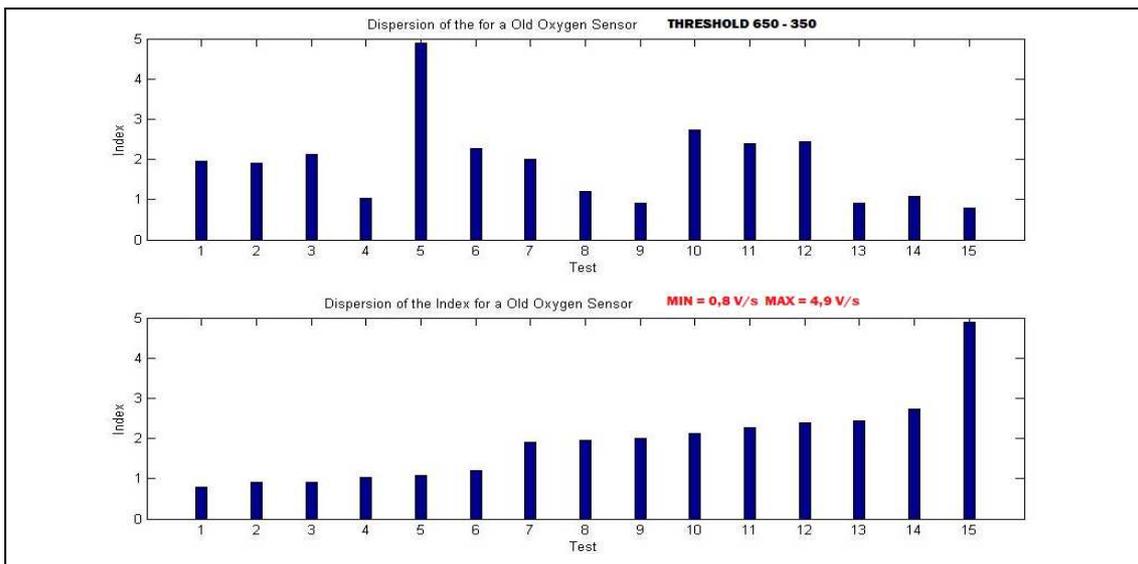
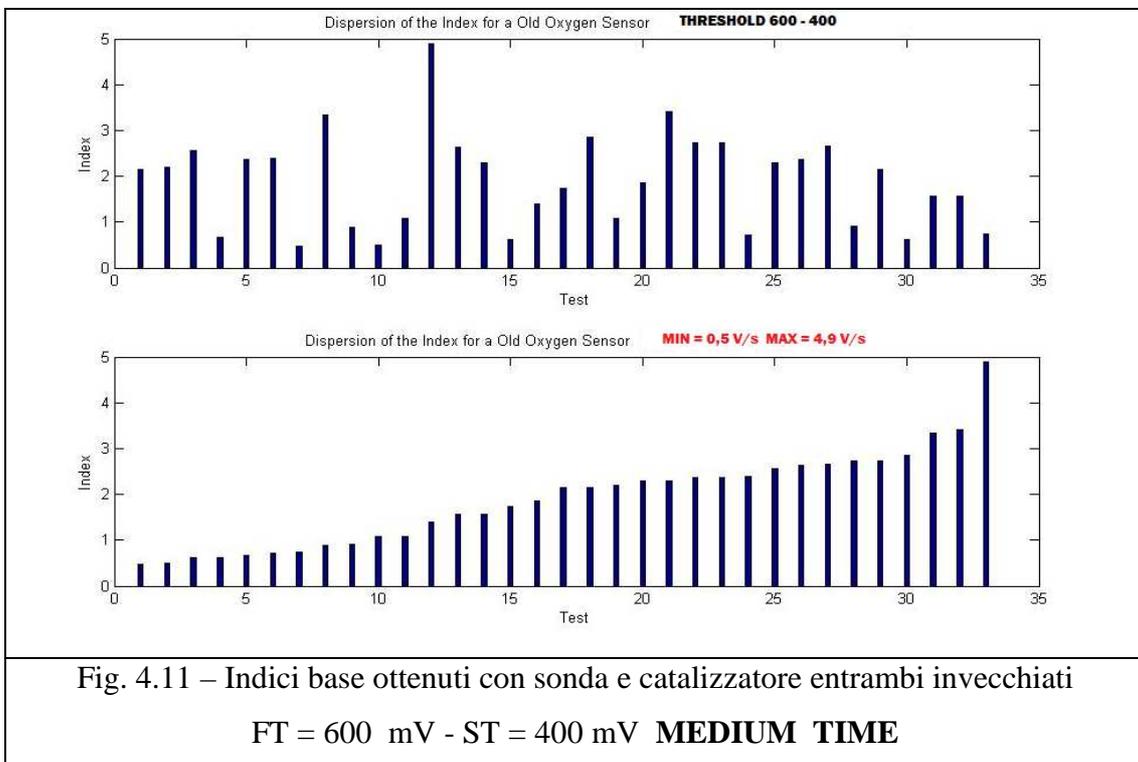
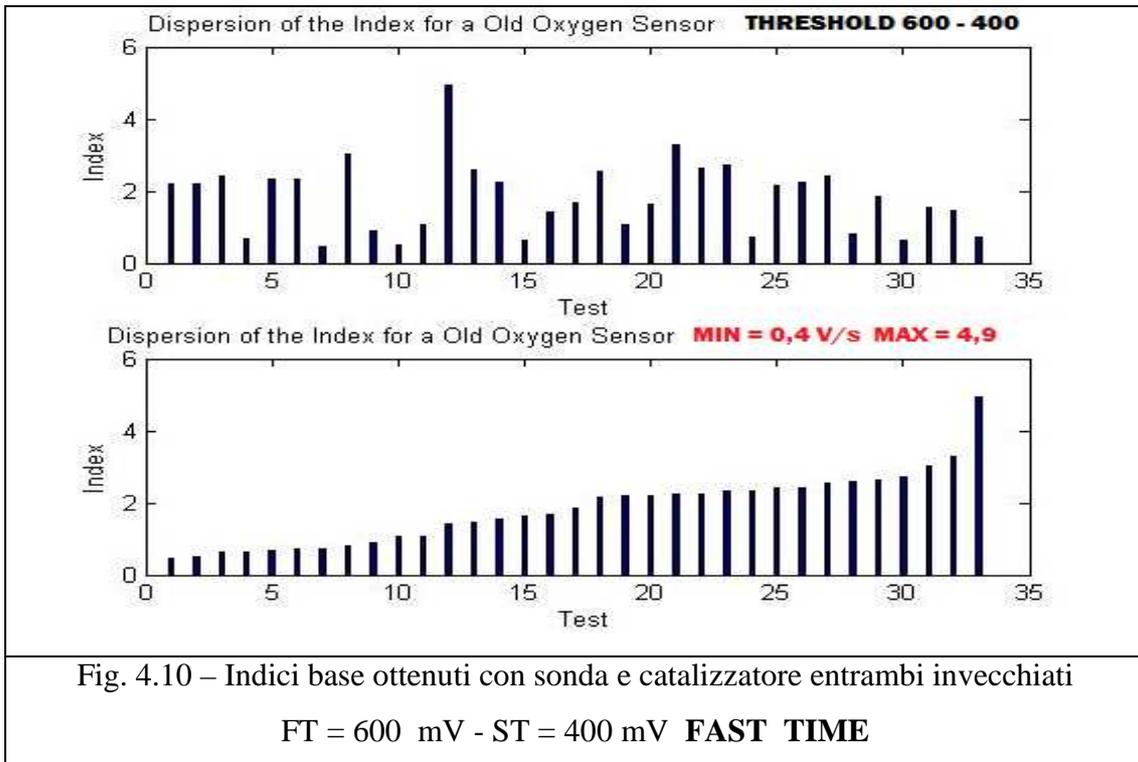


Fig. 4.9 – Indici base ottenuti con sonda e catalizzatore entrambi invecchiati
 FT = 650 mV - ST = 350 mV **MEDIUM TIME**



Come atteso, notiamo che il numero di indici rilevati non varia passando da un campionamento a 4 ms ad uno a 12 ms; questo perché i tempi della transizione sono sufficientemente lunghi da consentire la stima dell'indice. Inoltre, salta subito all'occhio come la coppia di soglie con FT pari a 650 mV e ST pari a 350 mV porti al rilevamento di un numero molto minore di transizioni utili, riconducibile alla difficoltà di un sensore invecchiato di raggiungere elevati voltaggi nelle acquisizioni a disposizione.

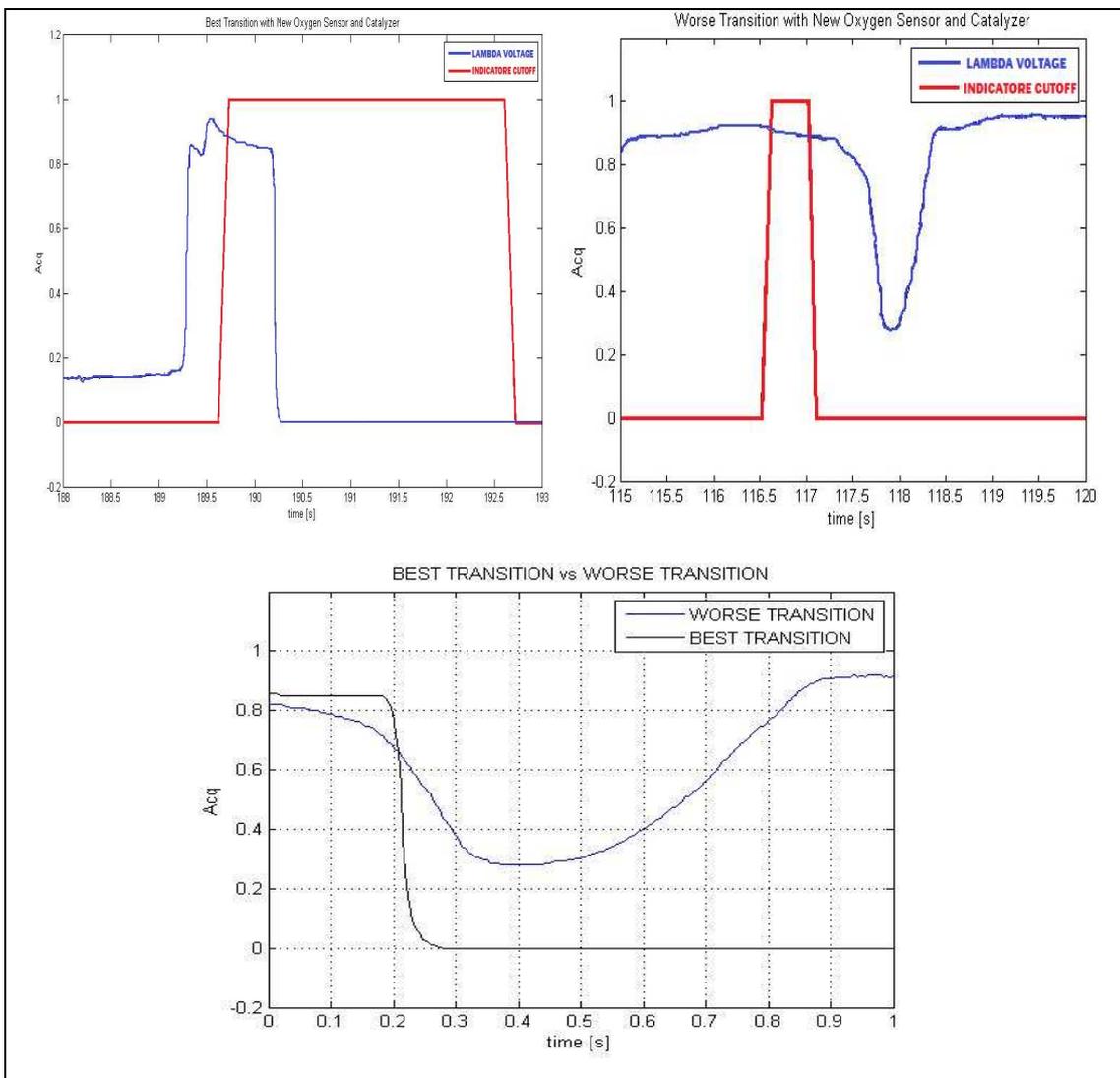
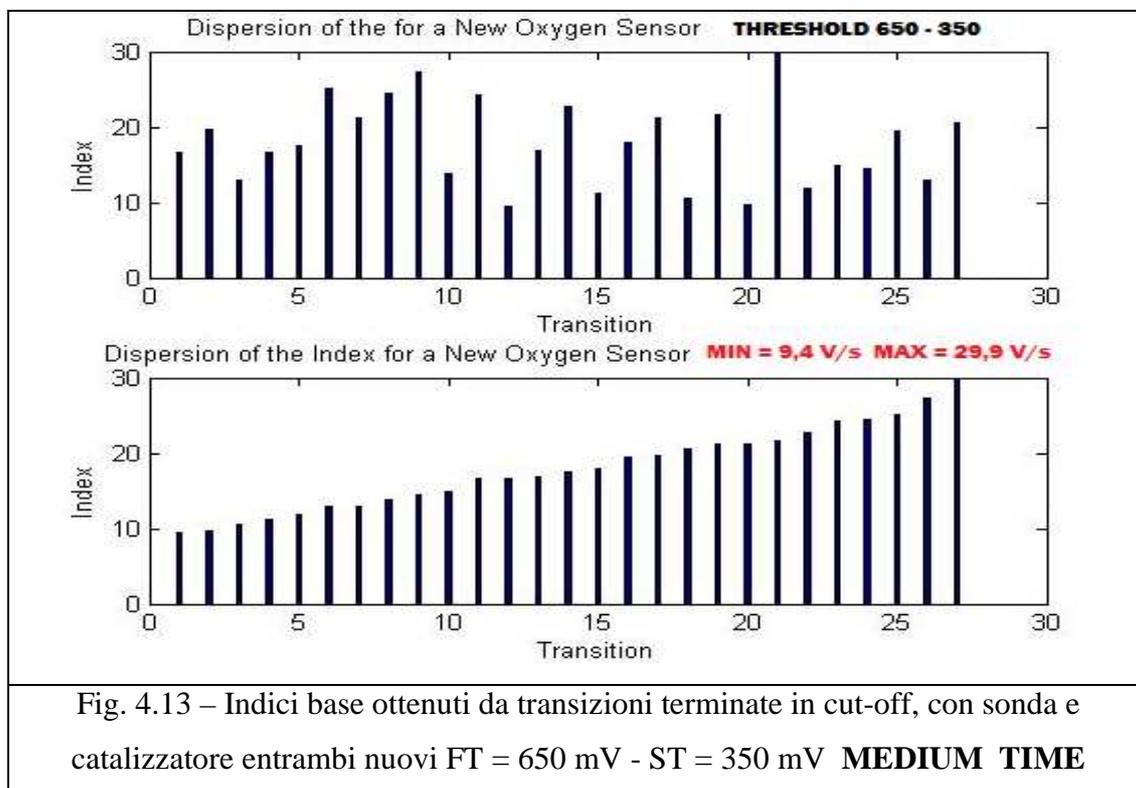
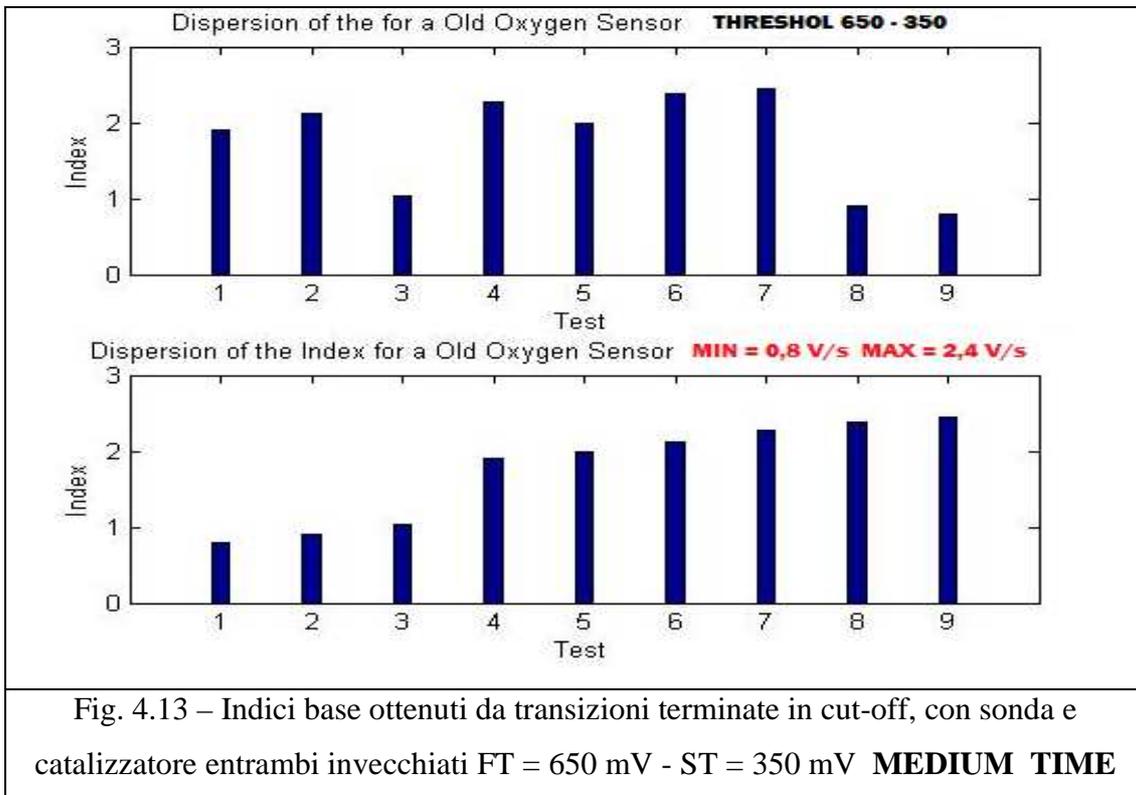


Fig. 4.12 – Transizione più rapida e più lenta a confronto, registrate con sonda e catalizzatore entrambi nuovi

In merito alla considerazione c), descritta in precedenza (Paragrafo 4.1.1), occorre specificare che le transizioni studiate comprendono anche quelle che hanno avuto termine con il motore non più in modalità di cut-off. Nella Fig. 4.12 si evidenzia come l'interruzione del cut-off prima del termine della transizione possa influire sull'andamento della transizione stessa; nello specifico, confrontando la transizione che fa registrare il più alto indice (terminata in condizioni di cut-off) con quella che fa registrare l'indice più basso (terminata dopo la fine del cut-off), si può ben intuire un importante parametro di influenza sulla dispersione degli indici registrati fino ad ora. In base a quanto appena evidenziato, è apparso interessante verificare in che modo varia la dispersione dell'indice se si escludono le transizioni che non terminano in condizioni di cut-off. Questo nuovo approccio è stato applicato ai due casi studiati (sonda e catalizzatore nuovi, sonda e catalizzatori invecchiati) scegliendo dei valori delle soglie FT e ST rispettivamente pari a 650 e 350 mV. I risultati sono qui di seguito riportati:





Dall'analisi degli indici presentati nelle Fig. 4.12 e 4.13, si può osservare che il range di dispersione dell'indice per le due condizioni di sonda e catalizzatore tende a ridursi considerevolmente, potendoci augurare che gli indici siano sufficientemente diversi da permettere il riconoscimento di un sensore mal funzionante.

Nei prossimi paragrafi verranno eseguite delle analisi di sensitività dell'indice alla portata d'aria elaborata dal motore, per capire se un'eventuale normalizzazione rispetto alla portata d'aria possa ridurre la dispersione degli indici, fattore identificativo della robustezza e qualità dell'algoritmo diagnostico.

4.2 – Analisi di sensitività alla portata d'aria

Come già descritto in precedenza, tra i parametri di influenza sulla transizione grasso-magro della sonda, il regime e il carico di inizio cut-off sono quelli che descrivono le modalità di trasporto dei pacchetti d'aria verso la sonda; questi due parametri governano le dinamiche di svuotamento collettore e, di conseguenza, le tempistiche di trasporto e la massa trasferita al catalizzatore. In particolare quest'ultimo parametro, identificativo del carico motore, spinge a pensare che transizioni della sonda, generate da alte portate, abbiano tempi di discesa minori rispetto a transizioni generate da basse portate d'aria.

Un primo approccio per la verifica di questa ipotesi è stato quello di calcolare, per un set di transizioni caratterizzate da condizioni di carico motore differenti, tre nuovi indici normalizzati rispetto all'integrale della portata d'aria calcolato in tre intervalli temporali differenti. Un secondo approccio, che a differenza del primo ha portato a buoni risultati, prevede il calcolo di ulteriori tre nuovi indici normalizzati, non più rispetto all'integrale, ma rispetto alla media del valore di portata d'aria calcolato sugli stessi intervalli temporali precedenti.

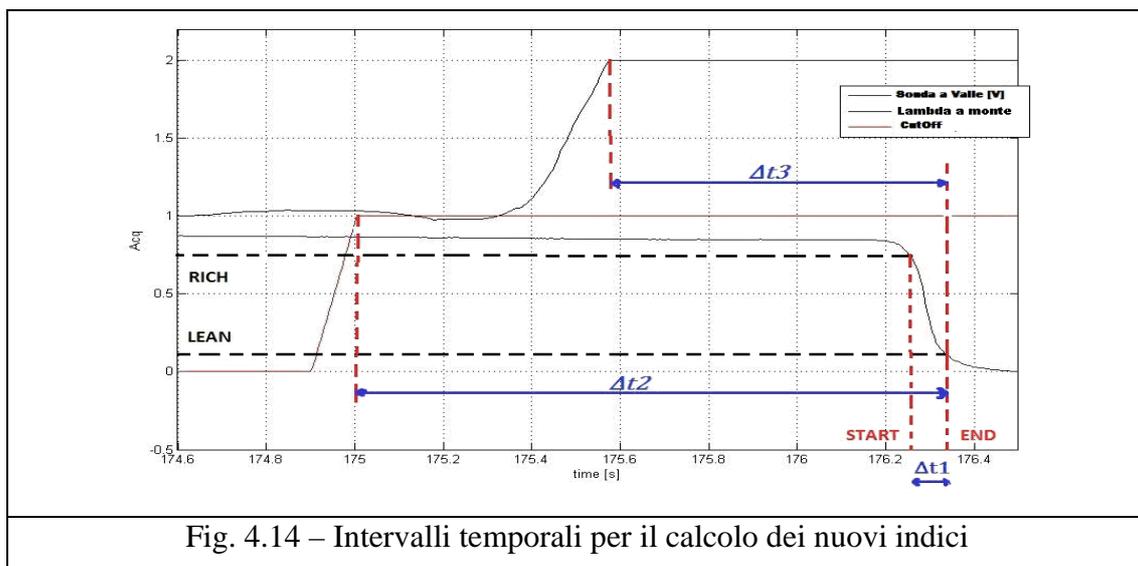


Fig. 4.14 – Intervalli temporali per il calcolo dei nuovi indici

La normalizzazione, in entrambi i casi proposti, viene eseguita acquisendo il segnale di portata aria (QAH) su tre differenti intervalli temporali:

- Δt_1 : tempo che intercorre tra la visione della prima soglia FT e la seconda ST;
- Δt_2 : tempo che intercorre tra l'inizio del cut-off e la visione della seconda soglia ST;
- Δt_3 : tempo che intercorre tra la registrazione del lambda della sonda a monte in battuta (titolo magro) e la visione della seconda soglia ST;

L'utilizzo di questi intervalli temporali risulterà più chiaro nel paragrafo successivo.

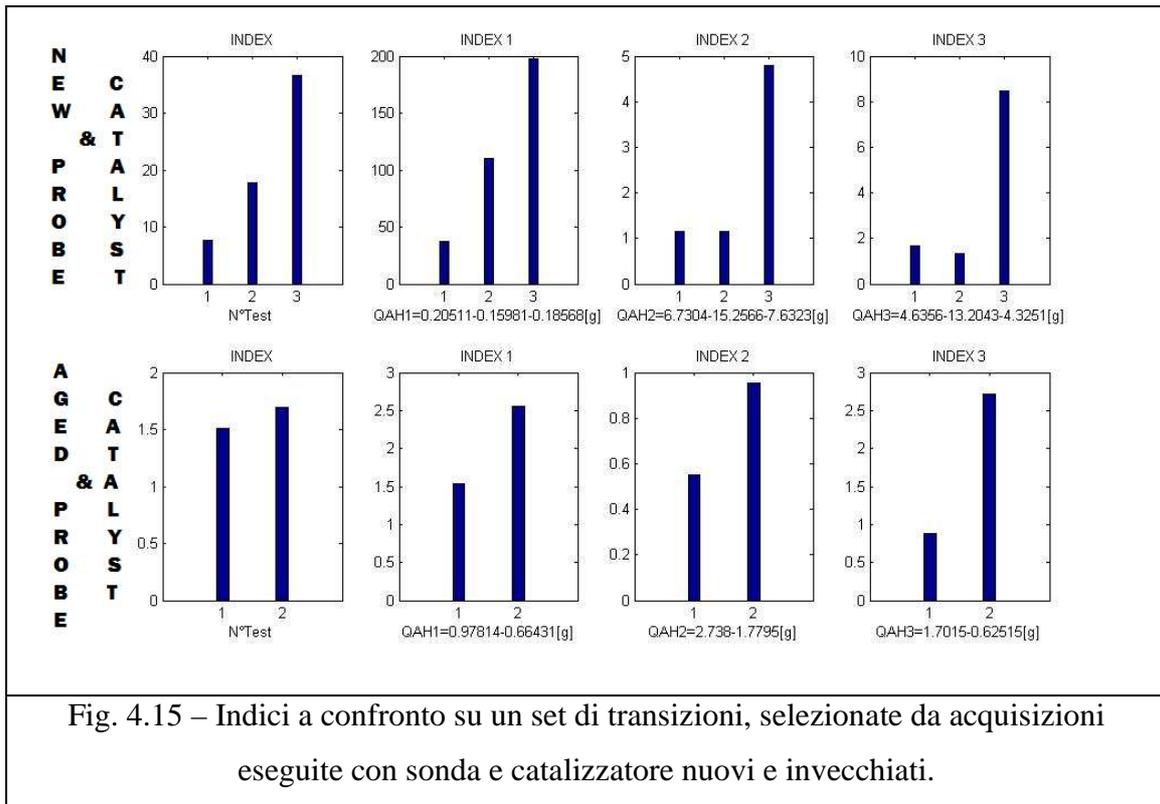
4.2.1– Normalizzazione rispetto all'integrale della portata d'aria

La normalizzazione rispetto all'integrale della portata d'aria sugli intervalli temporali riportati nella figura precedente dà luogo a questi tre nuovi indici:

$$\begin{aligned}
 INDEX1 &= \frac{(RICH - LEAN) / (END - START)}{\int_{\Delta t_1} QAH} & INDEX2 &= \frac{(RICH - LEAN) / (END - START)}{\int_{\Delta t_2} QAH} \\
 INDEX3 &= \frac{(RICH - LEAN) / (END - START)}{\int_{\Delta t_3} QAH}
 \end{aligned}$$

Gli indici ottenuti dalle transizioni selezionate sono visibili nella Fig. 4.15 in cui viene riportato anche il valore assunto dall'integrale della portata in ogni transizione e per ogni indice.

Questo primo tentativo di correlare la transizione alla portata d'aria non ha portato a nessun risultato utile; infatti, la correlazione tra transizione ed integrale della portata d'aria non sembra apparire per nessuno dei tre intervalli oggetto di studio.



Inoltre, nel caso di sonda invecchiata, i nuovi indici risultano maggiormente dispersi rispetto all'indice base. In conclusione, l'adozione di un nuovo indice così composto non viene presa in considerazione.

4.2.2– Normalizzazione rispetto alla media della portata d'aria

La stessa analisi appena eseguita viene ora riproposta considerando tre nuovi indici in cui la normalizzazione è eseguita rispetto al valore medio della portata d'aria calcolato sugli stessi intervalli temporali. I nuovi indici ottenuti sono:

$$INDEX1 = \frac{(RICH - LEAN) / (END - START)}{QAH_{mean}|_{\Delta t1}} \quad INDEX2 = \frac{(RICH - LEAN) / (END - START)}{QAH_{mean}|_{\Delta t2}}$$

$$INDEX3 = \frac{(RICH - LEAN) / (END - START)}{QAH_{mean}|_{\Delta t3}}$$

Per questo tipo di analisi, avendo avuto a disposizione dall'azienda nuove acquisizioni, sono state selezionate 4 transizioni utili al calcolo dell'indice per ognuna delle seguenti configurazioni:

- 1 Catalizzatore e sonda lambda entrambi nuovi
- 2 Catalizzatore invecchiato (100.000 km) e sonda lambda nuova
- 3 Catalizzatore e sonda lambda entrambi invecchiati (160.000 km)
- 4 Catalizzatore e sonda lambda degradati (tramite cicli di misfire)

Oltre alle classiche configurazioni 1. e 3., fino ad ora considerate le più realistiche nella vita del veicolo, vengono riportate per completezza anche configurazioni più atipiche come la 2. e la 3., ancora più insolite.

Le soglie scelte per il calcolo dell'indice sono FT pari a 650 mV e ST pari a 200 mV per tutte le configurazioni testate. Questa soglie alternative rispetto agli studi precedenti, sono state testate per capire se l'inserimento dei flessi nella stima della pendenza possa influire sulla dispersione dell'indice Di seguito vengono riportati i risultati per ogni configurazione nello stesso ordine di cui sopra.

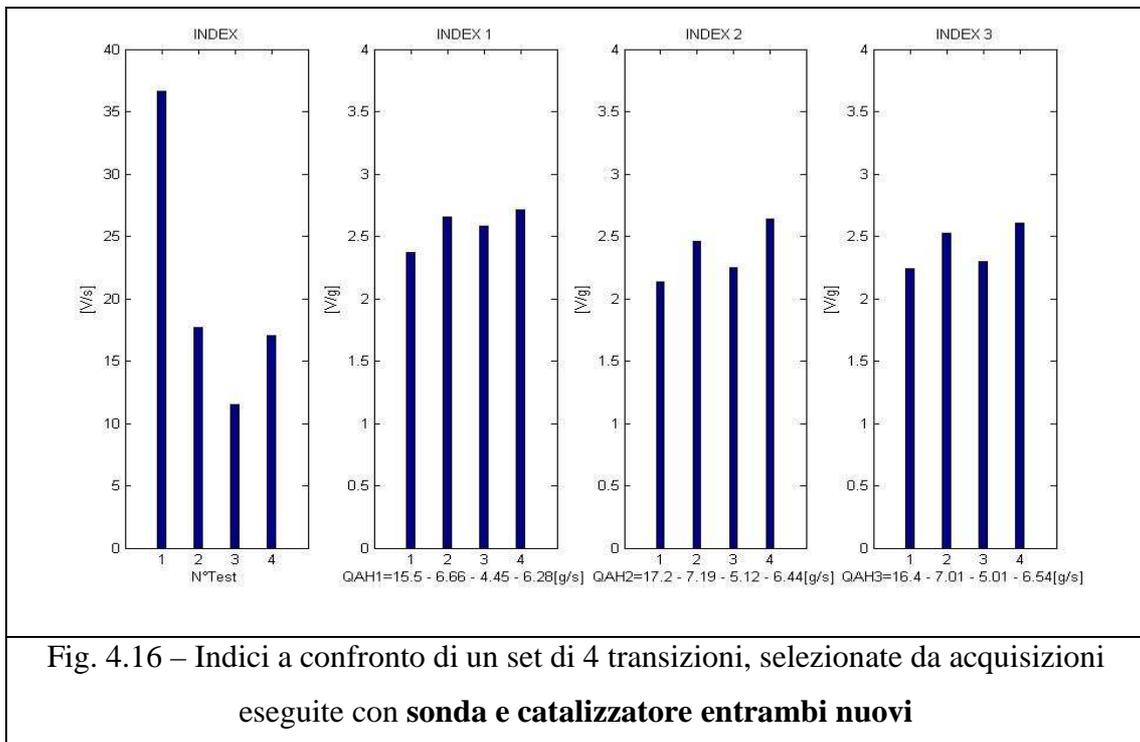
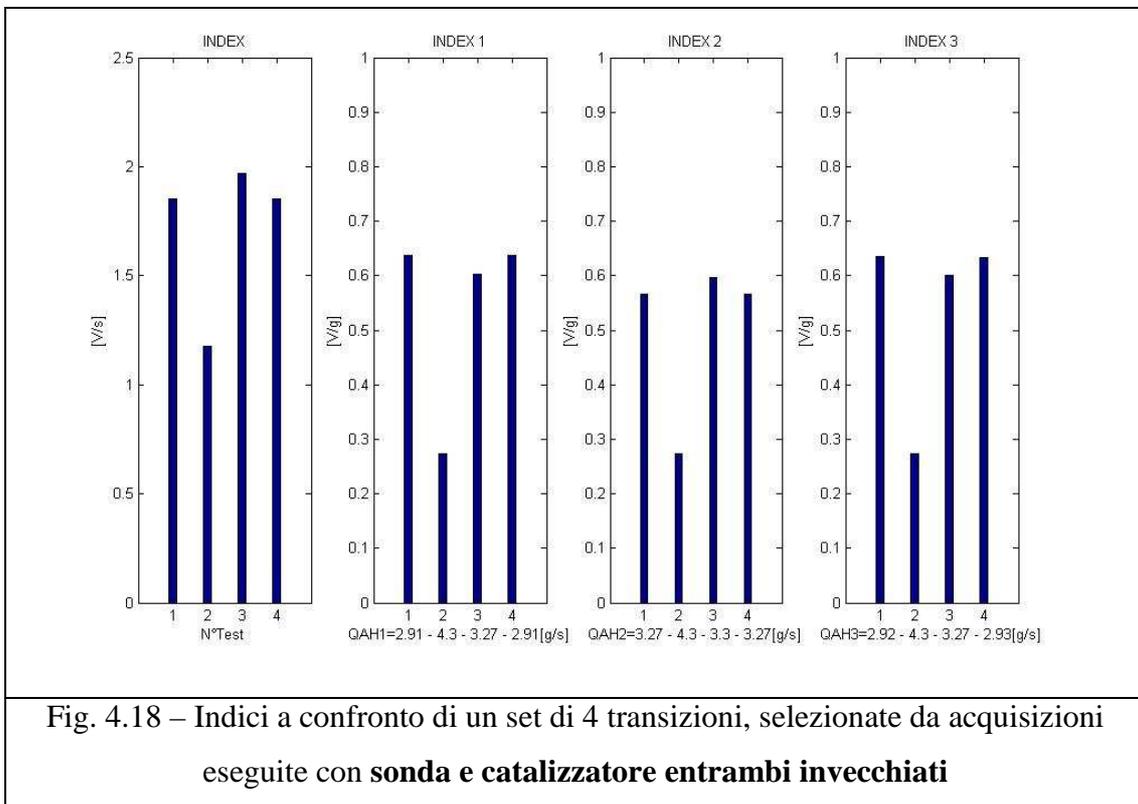
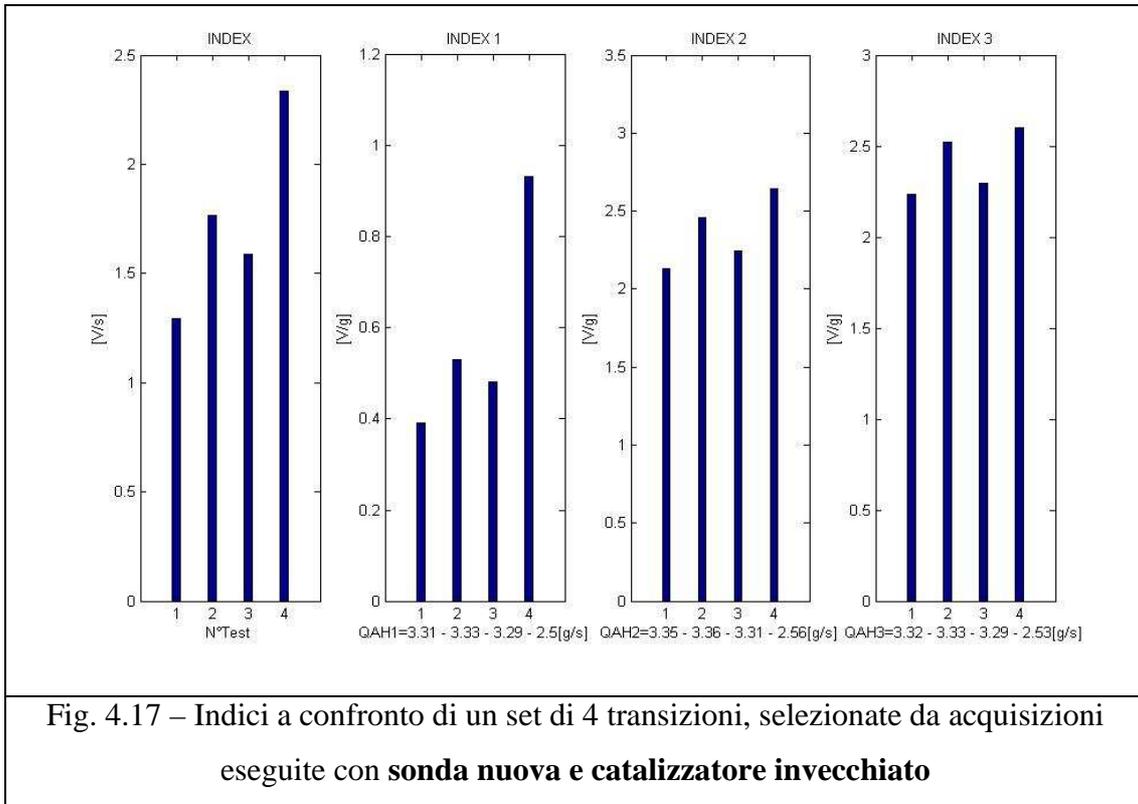
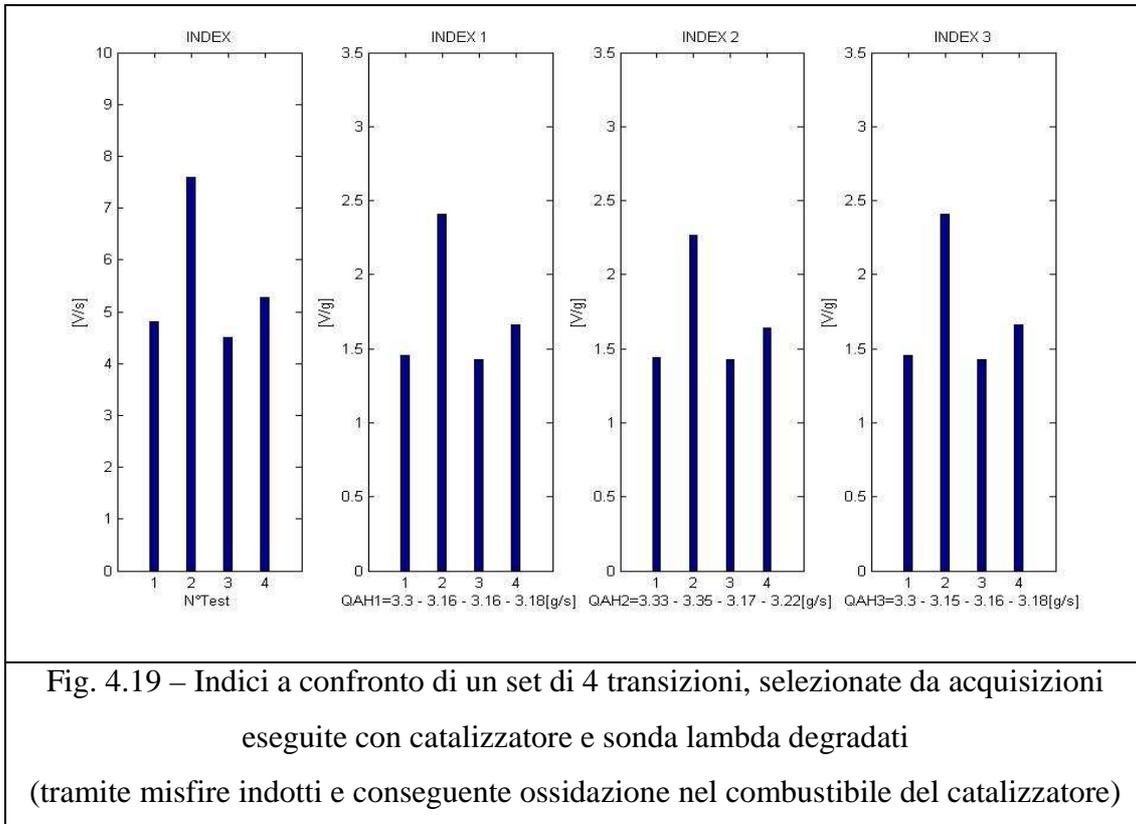


Fig. 4.16 – Indici a confronto di un set di 4 transizioni, selezionate da acquisizioni eseguite con **sonda e catalizzatore entrambi nuovi**





Analizzando nell'insieme i risultati ottenuti con le varie configurazioni possiamo desumere i seguenti aspetti:

- ✓ La dispersione dell'indice viene abbondantemente a ridursi per gli indici calcolati su acquisizioni relative a sonda e catalizzatore entrambi nuovi, segno che l'ipotesi di influenza della portata d'aria sull'indice è azzeccata;
- ✓ La dispersione dell'indice si mantiene ancora buona se viene sostituito il catalizzatore nuovo con uno invecchiato, soprattutto se si mantiene ampio l'intervallo temporale per il calcolo della media. Infatti, l'indice 2 risulta quello con una minor dispersione, in quanto il valore di portata medio calcolato su Δt_2 accorpa, nel calcolo della media, anche i valori di portata relativi alle dinamiche di svuotamento del collettore,

ottenendo un indice maggiormente influenzato dalle condizioni di portata ad inizio cut-off.

- ✓ Nelle ultime due configurazioni i nuovi indici lasciano praticamente invariata la dispersione; va osservato, come già analizzato nel capitolo precedente, che gli indici base relativi a sonda e catalizzatore invecchiati (configurazione 3) presentano una dispersione ridotta rispetto a quella generata dagli stessi indici base relativi a sonda e catalizzatori nuovi (configurazione 1) ed, in generale, il nostro scopo è ottenere una sufficiente diversificazione tra gli indici prodotti dalle due configurazioni per garantire una corretta diagnosi del sensore.
- ✓ Paragonando il secondo indice delle configurazioni 1 e 3, notiamo che esso si mantiene al di sopra dei 2 V/g per sonda e catalizzatore nuovi e si posiziona al di sotto di 1 V/g per sonda e catalizzatore invecchiati.

In base alle considerazioni fatte, la scelta dell'indice di detezione è ricaduta sul secondo dei nuovi indici proposti, cioè quello che prevede la normalizzazione rispetto alla media della portata d'aria calcolata dall'inizio del cut-off al termine della diagnosi (coincidente con il superamento della seconda soglia) così esprimibile:

$$Indice\ Strategia = \frac{\left(\frac{RICH - LEAN}{END - START} \right)}{QAH_{mean}|_{\Delta t_2}} \quad [V / g]$$

4.3 – Introduzione della soglia dinamica

Come emerso nel corso dei paragrafi precedenti, il valore assunto dall'indice per data transizione varia in funzione della scelta delle soglie FT e ST. Nell'analizzare tutte le acquisizioni a disposizione, ci si accorge che i

valori di tensione di inizio transizione non sono sempre gli stessi, ma sono notevolmente diversificati, specialmente quelli relativi ad un sensore invecchiato che necessita di un maggior tempo per inseguire il titolo dei gas, oggetto di misura. Attualmente, il calcolo dell'indice prevede l'adozione di due soglie definite come calibrazioni costanti, al superamento delle quali viene memorizzato il primo valore disponibile di tensione sonda e il valore temporale corrispondente, per il calcolo dell'indice. Dall'unione di queste due considerazioni si può desumere che la porzione di transizione della quale si stimerà la pendenza nel calcolo dell'indice è differente, in termini qualitativi, a seconda del valore di tensione di inizio della discesa. Questo implica che, a parità di dinamica di transizione della sonda, l'indice risente anche di questo parametro. Con lo scopo di eliminare questa dipendenza, è stato scelto di attribuire alla prima soglia FT non più una calibrazione costante, ma un valore calcolato come percentuale sul segnale (stabile) in tensione della sonda a valle prima dell'inizio del cut-off.

Per quel che riguarda la seconda soglia ST essa viene mantenuta ad un valore costante in quanto il valore di tensione in cui termina la transizione è, nella maggior parte dei casi analizzati, un valore nullo; in questi casi l'adozione di una soglia fissa non influisce sull'entità di porzione di transizione analizzata.

Rimane da specificare che, nel caso di termine del cut-off prima del superamento della seconda soglia (ST), la diagnosi viene terminata e quindi la transizione in esame non viene considerata per il calcolo dell'indice di detezione.

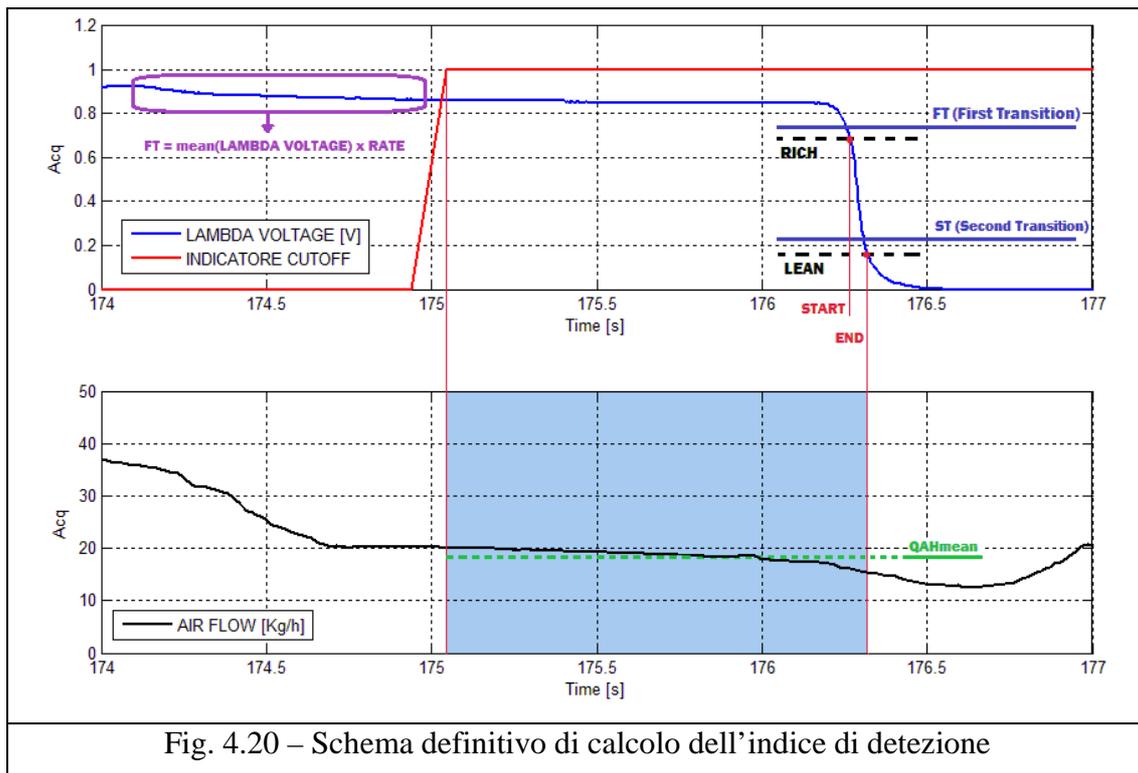


Fig. 4.20 – Schema definitivo di calcolo dell'indice di detezione

La Fig. 4.20 riassume lo schema di calcolo dell'indice di detezione. A partire da $t=175$ s, istante in cui viene richiesto il cut-off, viene attivato il calcolo della media della portata d'aria fino al superamento della soglia ST. Il valore della prima soglia FT viene pesato in percentuale sul valore di tensione medio della sonda calcolato su una determinata finestra e aggiornato fino all'attivazione del cut-off. L'ultimo valore aggiornato della soglia FT viene utilizzato, assieme alla soglia costante ST, per il congelamento, al superamento delle soglie, dei parametri necessari al calcolo dell'indice. Una volta memorizzati tutti i parametri necessari si procede al calcolo dell'indice di detezione.

Capitolo 5

Elaborazione del modello diagnostico

5.1 – Struttura del modello

In questo paragrafo vengono scorsi rapidamente i principali blocchi strutturali del modello, il cui plant è riportato in Fig. 5.1, per poi passare, nei paragrafi successivi, all'analisi dettagliata di ogni singolo blocco.

SCHEDULATORE

Si tratta di una macchina a stati finiti che traduce gli eventi primari, cioè i task di centralina, in chiamate a funzione; gestisce quindi le chiamate a tutti i blocchi presenti nel modello.

ABILITAZIONE STRATEGIA NATURALE

Blocco contenente le condizioni di abilitazione per la strategia naturale, cioè quelle necessarie ad attivare il calcolo dell'indice senza modificare l'attuale calibrazione dei tempi rilascio pedale presente in centralina.

ABILITAZIONE STRATEGIA FORZATA

Blocco del tutto analogo al precedente per l'abilitazione della strategia forzata, tale per cui si prevede l'individuazione di tempi rilascio pedale minori con la pretesa di ridurre i tempi di diagnosi.

CALCOLO E GESTIONE DELLA SOGLIA DINAMICA

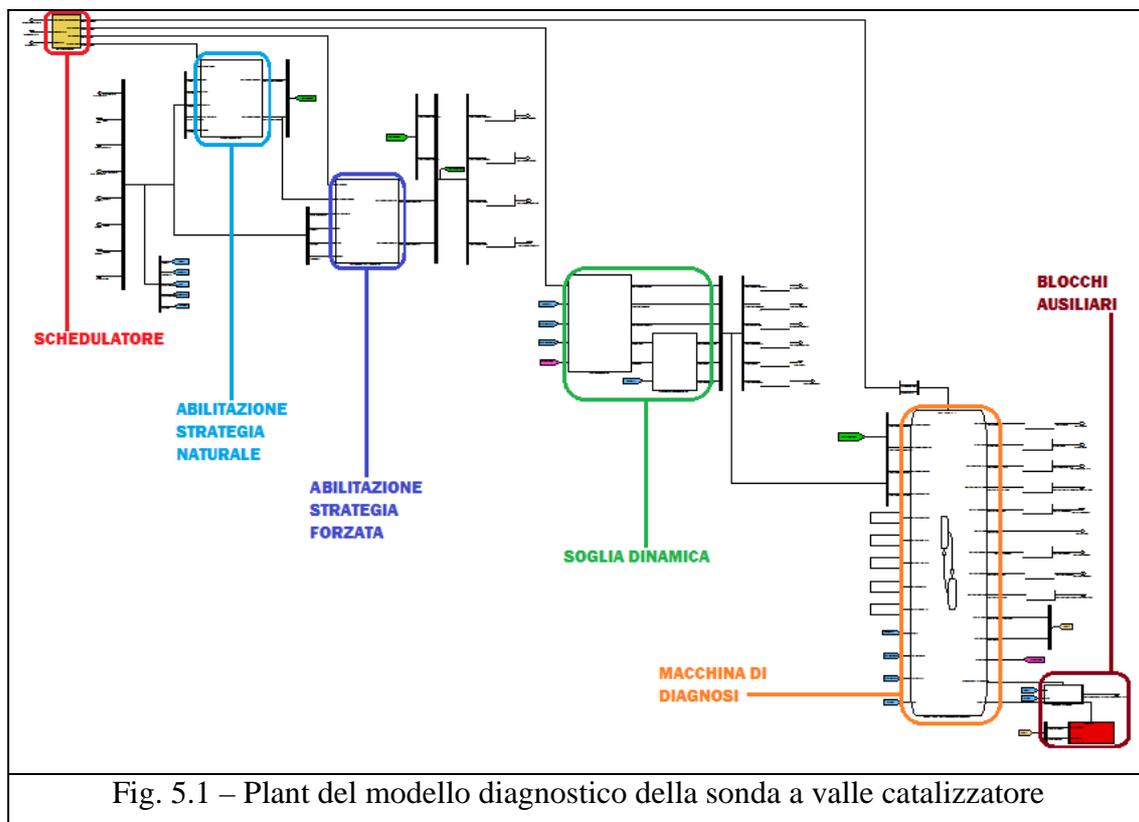
Funzione assolta da due blocchi posti in serie. Il primo dei due ha il compito controllare che il segnale della sonda stia registrando valori di miscela grassi, generando così una condizione di abilitazione per la diagnosi. Il secondo procede al calcolo del valore della soglia FT, il quale verrà dato in pasto alla macchina a stati assieme alle condizioni di abilitazione.

MACCHINA DI DIAGNOSI

Rappresenta il cuore della diagnosi ed è costituita da una macchina a stati finiti nella quale avviene il calcolo dell'indice di detezione secondo una delle due strategie consentite (naturale e forzata), e il confronto di questo con un valore di soglia. Gli output finali saranno il valore dell'indice calcolato e il risultato (positivo/negativo) della diagnosi.

BLOCCHI AUSILIARI

Sono presenti due ulteriori blocchi: il primo di essi (a sfondo bianco) provvede alla determinazione del tempo di rilascio pedale da comunicare al controllo coppia in caso di abilitazione della strategia forzata; il secondo (a sfondo rosso) gestisce i codici di guasto prodotti dalla macchina a stati da comunicare al gestore diagnostico.



5.2 – Schedulatore

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

In ingresso troviamo i seguenti task di centralina:

- **ACCENSIONE MOTORE:** segnale booleano che identifica l’evento di motore acceso con la condizione TRUE;
- **GIRO CHIAVE:** segnale booleano che identifica l’evento di chiave su posizione “on” con la condizione TRUE;
- **EVOLUZIONE 12 ms:** segnale booleano che produce una condizione TRUE ogni 12 ms, mantenuta tale per uno step di simulazione del modello;

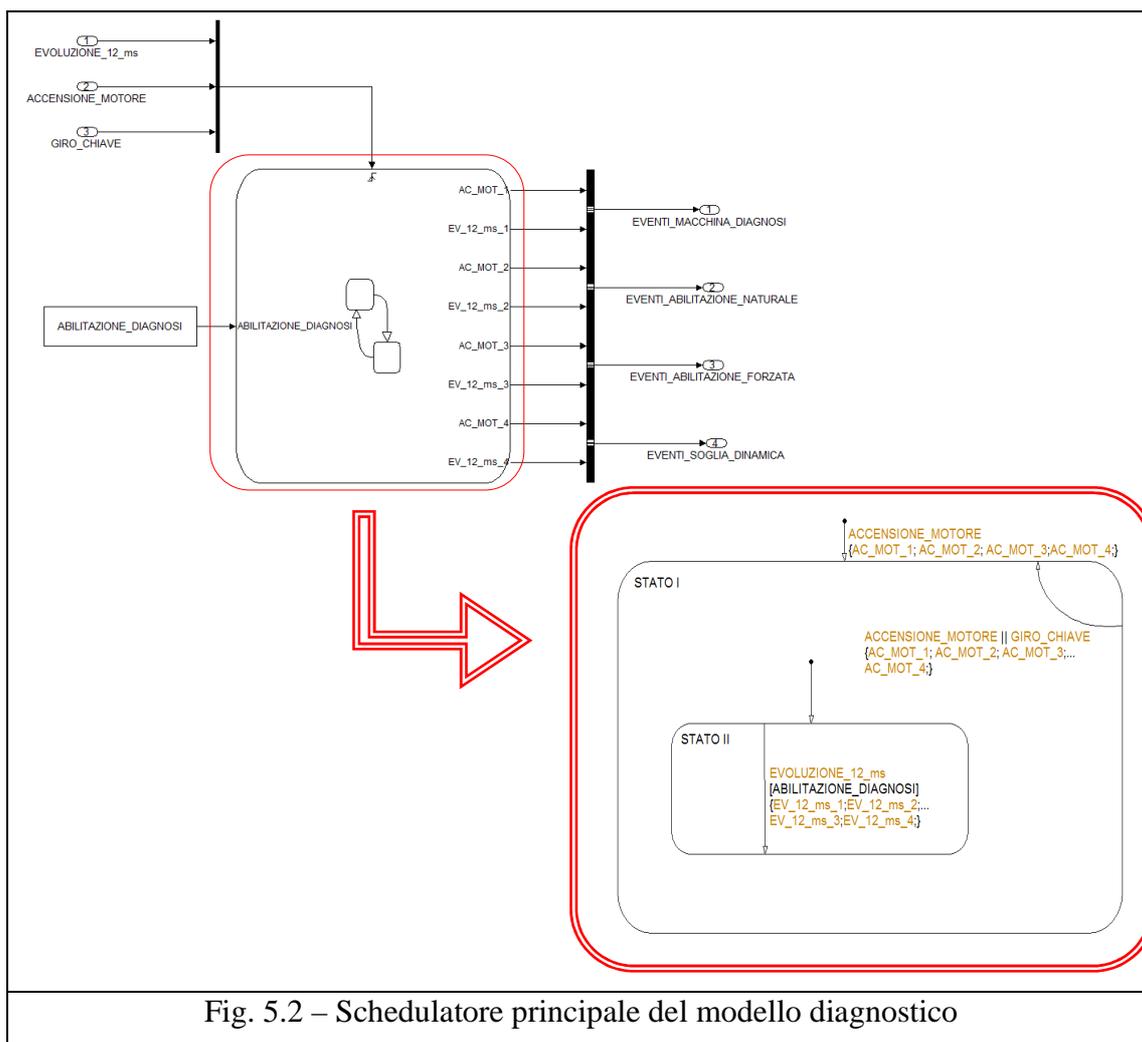


Fig. 5.2 – Schedulatore principale del modello diagnostico

In merito allo schema dello stateflow (Fig. 5.2), gli eventi in uscita vengono generati con la seguente sequenza:

- a) Al verificarsi della condizione TRUE per motore acceso vengono generate quattro function call dello stesso tipo, con conseguente spostamento sul perimetro dello stato II;
- b) Al verificarsi della condizione TRUE per l'evoluzione a 12 ms e della condizione ABILITAZIONE DIAGNOSI (calibrazione che consente o meno l'attivazione della diagnosi), come in precedenza vengono prodotte quattro function call dello stesso tipo, tornando puntualmente sul perimetro dello stato II;
- c) Qualora si verificasse una delle condizioni presenti nell'anello di retroazione sullo stato I, cioè la condizione TRUE per l'accensione motore o per il giro chiave, la macchina si riporta sul perimetro dello stato I, esegue il punto (a) e si posiziona quindi sul perimetro dello stato II;

Gli eventi generati da questa esecuzione sono nel complesso otto: quattro relativi all'evento accensione motore e quattro relativi all'evoluzione a 12 ms, i quali vengono uniti a coppie e inviati ai blocchi del modello per gestire rispettivamente le inizializzazioni e le esecuzioni degli stessi.

5.3 – Abilitazione strategia naturale

Nel blocco descritto in questo paragrafo viene elaborata la condizione di abilitazione per la strategia naturale, la quale verrà continuamente aggiornata e comunicata alla macchina di diagnosi. Al suo interno (Fig. 5.3) sono presenti un blocco destinato all'inizializzazione degli output all'avviamento motore (Fig. 5.4) ed un blocco addetto alla produzione degli output ad ogni esecuzione prodotta dallo schedulatore, cioè ogni 12 ms (Fig. 5.5).

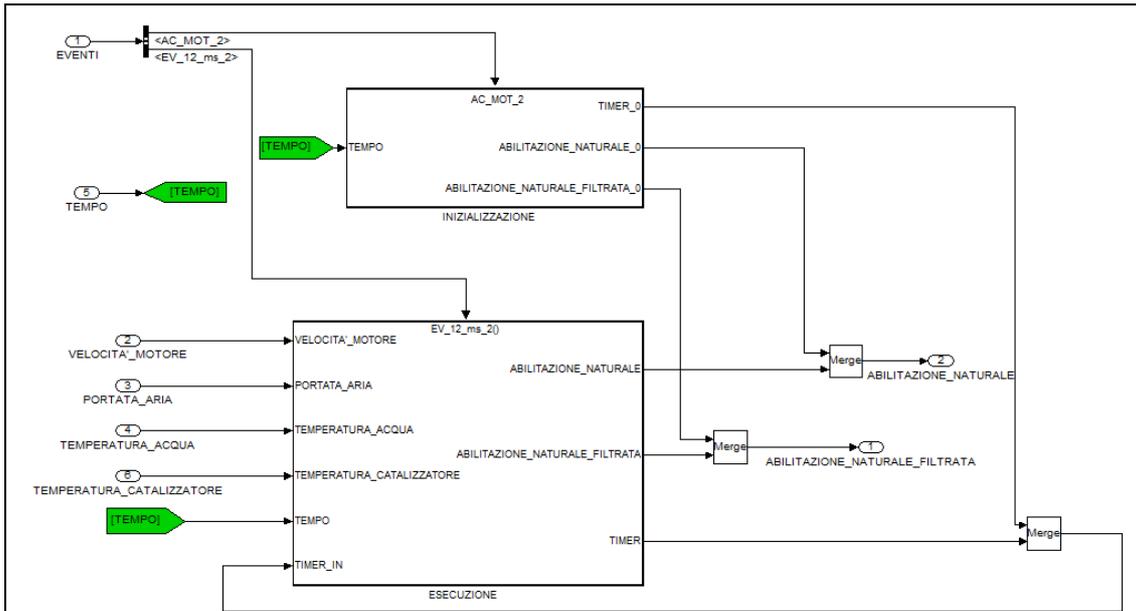


Fig. 5.3 – Blocchi di inizializzazione ed esecuzione per l'abilitazione strategia naturale

Le inizializzazioni sono imposte a zero, quindi FALSE, per le condizioni di abilitazione, mentre il TIMER è inizializzato al valore della variabile TEMPO.

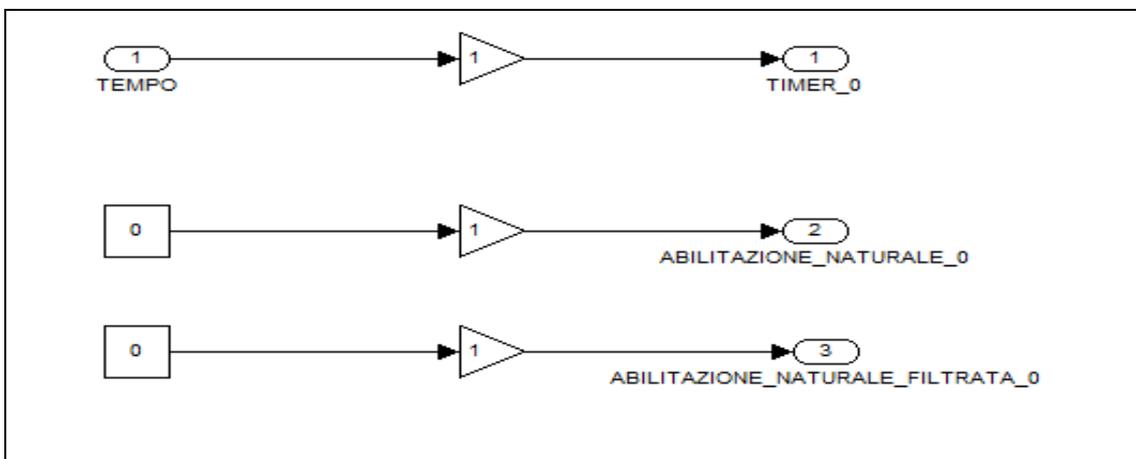
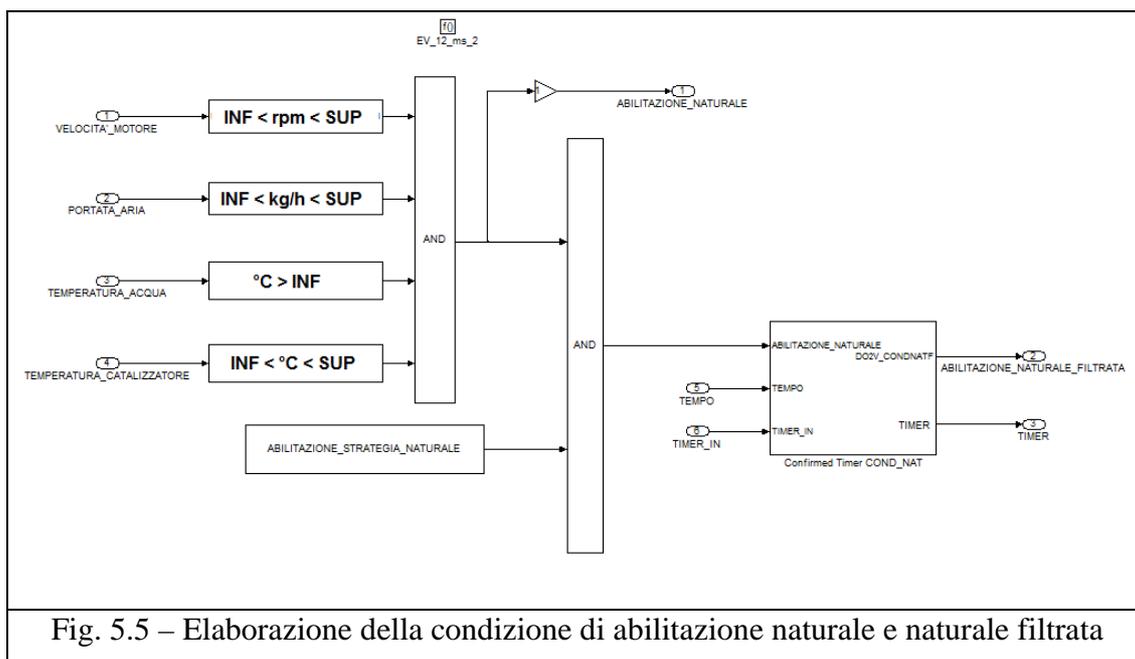


Fig. 5.4 – Inizializzazioni del modulo di abilitazione strategia naturale

Gli output sono rappresentati da due condizioni booleane:

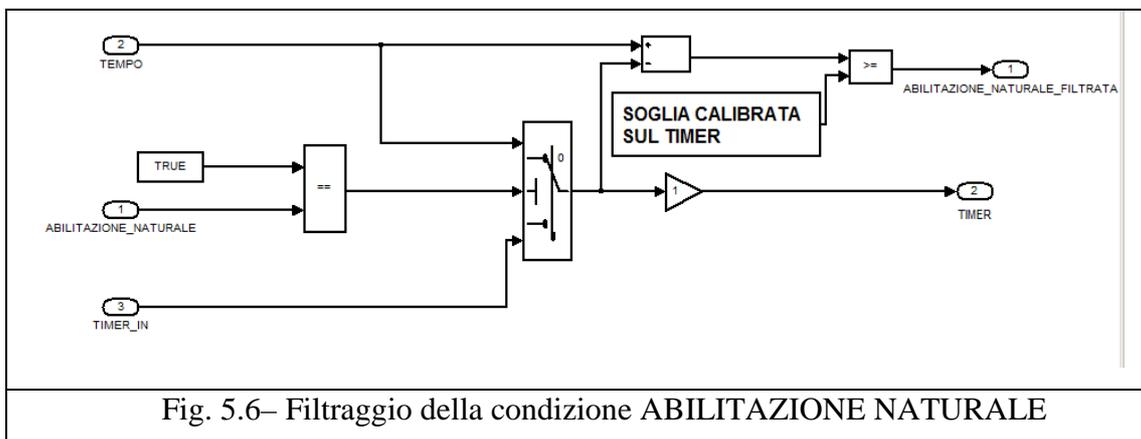
- 1) ABILITAZIONE NATURALE, la quale viene dichiarata TRUE quando vengono soddisfatte le seguenti condizioni:

- a) *Regime motore* (VELOCITA' MOTORE) all'interno di un intervallo di valori i cui estremi sono calibrazioni scelte in base alle considerazioni emerse dall'analisi effettuata nel Cap. 3.
- b) *Carico motore* (PORTATA ARIA) all'interno di un intervallo di valori i cui estremi sono calibrazioni scelte come per il regime motore.
- c) *Temperatura del fluido refrigerante* (TEMPERATURA ACQUA) al di sopra di un valore di soglia calibrabile, che consenta di stabilire che il motore sia termicamente stabilizzato.
- d) *Temperatura del sistema catalitico* (TEMPERATURA CATALIZZATORE) contenuta all'interno di un intervallo di valori per cui il sistema si possa considerare sufficientemente efficiente.



2) ABILITAZIONE NATURALE FILTRATA, è ottenuta dal filtraggio della precedente; nello specifico si attende che la condizione ABILITAZIONE NATURALE si mantenga vera per un certo intervallo temporale, prima di dichiarare la condizione TRUE.

Questo filtraggio viene applicato, secondo la logica di Fig. 5.5, per evitare un andamento isterico della condizione per quei punti motore vicini alle soglie di abilitazione (per implementare, attraverso un ritardo, una funzione di isteresi).



In questo sottoblocco, all’insorgere della condizione TRUE, viene attivato un commutatore (switch) che consente di eseguire la differenza fra la variabile tempo e il valore temporale congelato all’azionamento del commutatore. In questa maniera si produce un timer aggiornato ogni 12 ms che, confrontato con una soglia calibrata, fornisce la nuova condizione ABILITAZIONE NATURALE FILTRATA.

5.4 – Abilitazione strategia forzata

In maniera simile al blocco precedente viene elaborata la condizione di abilitazione per la strategia forzata. La condizione ABILITAZIONE FORZATA FILTRATA è l’unico output di questo blocco. Tale condizione, chiamata TRUE, viene inizializzata a zero previo filtraggio ottenuto in maniera analoga alla condizione di abilitazione della strategia naturale, quando risultano soddisfatte tutte le specifiche imposte per l’abilitazione naturale (che si traduce nel verificare la condizione ABILITAZIONE

NATURALE come TRUE), assieme all'adempimento delle seguenti condizioni:

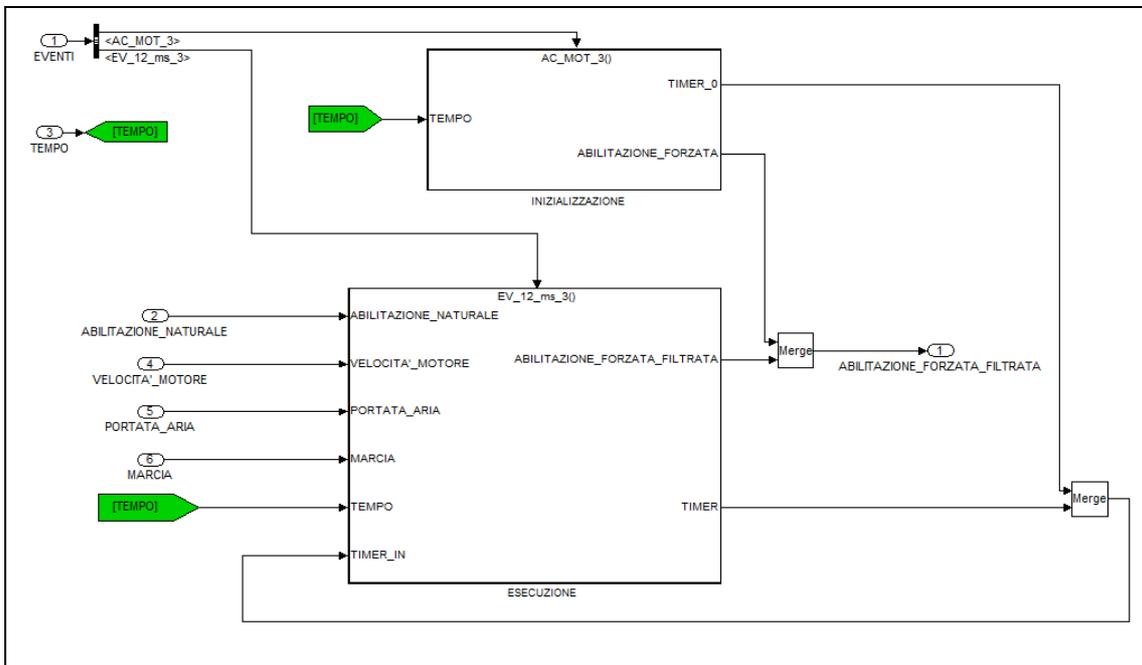


Fig. 5.7 – Blocchi di inizializzazione ed esecuzione per l'abilitazione strategia forzata

a) *Regime motore (VELOCITA' MOTORE)* all'interno di un intervallo di valori i cui estremi sono maggiormente circoscritti rispetto alla strategia naturale per incrementare la probabilità di concludere la diagnosi.

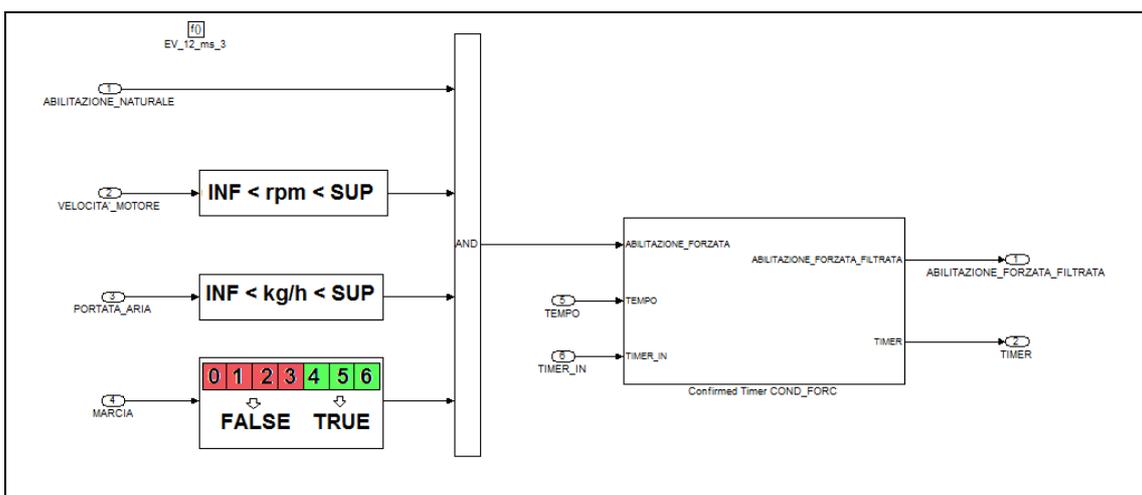


Fig. 5.8 – Elaborazione della condizione di abilitazione forzata filtrata

- b) *Carico motore* (PORTATA ARIA) all'interno di un intervallo di valori i cui estremi sono calibrazioni scelte come per il regime motore.
- c) *Marcia inserita* (MARCIA) sufficientemente alta da minimizzare la ripercussione nella riduzione del tempo rilascio pedale sulla guidabilità del veicolo.

La condizione ABILITAZIONE FORZATA FILTRATA assieme alla ABILITAZIONE NATURALE FILTRATA vengono entrambe inviate alla macchina a stati addetta alla diagnosi vera e propria.

5.5 – Calcolo e gestione della soglia dinamica

L'adozione di una strategia di calcolo per la determinazione della prima soglia FT in funzione del valore in tensione della sonda precedente alla transizione, implica la disposizione dei seguenti punti:

- I) necessità di verificare che il segnale in tensione della sonda (LAMBDA VOLTAGE) sia stabilizzato su condizioni di titolo grasso, ottenuto tramite l'elaborazione della condizione LAMBDA RANGE;
- II) esigenza di generare un valore medio del segnale LAMBDA VOLTAGE da cui calcolare il valore della soglia FT in termini percentuali. Per svolgere ciò è stato introdotto un vettore a scorrimento, aggiornato ad ogni esecuzione (12 ms) e costruito con un certo numero di campioni del valore LAMBDA VOLTAGE allo scopo di derivarne il valore medio e successivamente la frazione percentuale da attribuire alla soglia FT.

Le operazioni compiute da questo modulo vengono eseguite da due blocchi posti in serie. Il primo che si procede ad analizzare è costituito da una macchina a stati che soddisfa la specifica I e genera le chiamate a funzione per il riempimento e l'aggiornamento del vettore a scorrimento.

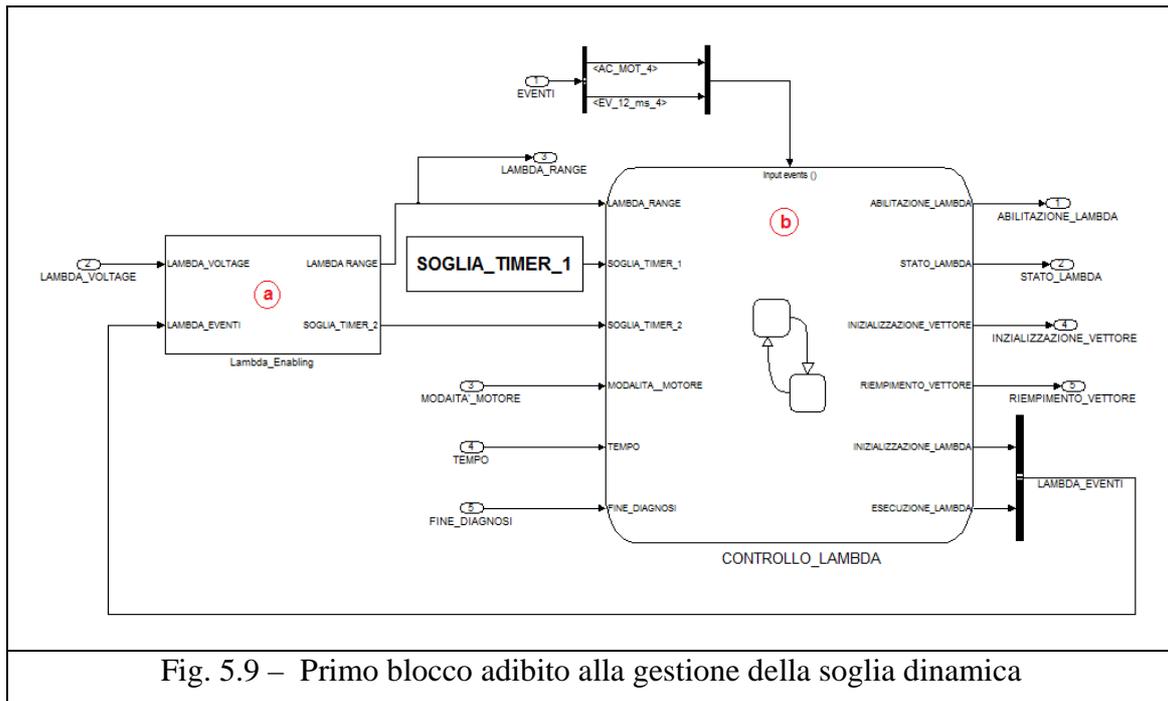


Fig. 5.9 – Primo blocco adibito alla gestione della soglia dinamica

In Fig. 5.9 è rappresentato il contenuto del primo blocco per la gestione della soglia dinamica. L'evoluzione del modello avviene con le seguenti modalità:

- Il segnale in tensione entra all'interno del sottoblocco (a) dal quale viene evasa la condizione LAMBDA RANGE dichiarata TRUE se i valori di tensione sono contenuti all'interno di un intervallo identificativo di una miscela grassa allo scarico (tipicamente valori compresi tra 700 e 900 mV). Viene, inoltre, evasa la soglia relativa ad un timer utilizzato nello stateflow che verrà descritto successivamente.
- Lo stateflow (b), rappresentato in Fig. 5.10, evolve come segue:
 - 1) All'accensione motore o al giro chiave vengono generate le chiamate a funzione per i blocchi di inizializzazione del vettore a scorrimento (INIZIALIZZAZIONE VETTORE) e della condizione di abilitazione sul segnale della sonda (INIZIALIZZAZIONE LAMBDA); ci si ritrova quindi all'interno dello stato (0).

- 2) Ad ogni evoluzione a 12 ms per cui si verifica la condizione di stabilità a valori bassi della sonda lambda (LAMBDA RANGE = TRUE), viene incrementato il TIMER 1 fino al raggiungimento della soglia calibrata SOGLIA TIMER 1; verificata la stabilità per suddetto tempo, viene inizializzato il TIMER 2 al valore attuale di tempo e si entra nello stato (1).
- 3) Ad ogni evoluzione a 12 ms, viene riempita una posizione del vettore di scorrimento fino all'esaurimento di un tempo SOGLIA TIMER 2 calibrato come segue (all'interno del blocco a):

$$SOGLIA\ TIMER\ 2 = DIMENSIONE \cdot 12 \quad [ms]$$

- dove DIMENSIONE rappresenta il numero di campioni del segnale in tensione della sonda che si intende utilizzare per il calcolo del valore medio. In altre parole, SOGLIA TIMER 2 rappresenta il tempo, espresso in [ms], necessario al riempimento del vettore a scorrimento. Una volta riempito il VETTORE LAMBDA, viene dichiarata TRUE la condizione ABILITAZIONE LAMBDA e si entra nello stato (2).
- 4) Dallo stato (2) si attende l'attuazione del cut-off da parte dell'utente, evadendo ogni 12 ms una chiamata a funzione (ESECUZIONE LAMBDA) per l'aggiornamento del vettore.
 - 5) Al verificarsi del cut-off si entra nell'ultimo stato (4), da cui si attende la transizione della sonda e quindi il termine della diagnosi (FINE DIAGNOSI = TRUE), per poter tornare nello stato (0), dopo aver resettato a FALSE la condizione ABILITAZIONE LAMBDA. Qualora, durante l'attesa della transizione, il cut-off dovesse interrompersi, in coerenza con quanto stabilito in precedenza, viene interrotta la diagnosi e si ritorna allo stato stabile (0).

Oltre all'anello di reset presente sul macrostato dello stateflow, sono presenti due rami di ritorno allo stato (0) a valle delle evoluzioni a 12 ms, che vengono percorsi nel caso di fuoriuscita del segnale in tensione della sonda dal range di stabilità (LAMBDA RANGE = FALSE). Questo ramo non è presente sull'ultima evoluzione a 12 ms in quanto abbiamo già attivato la strategia di diagnosi, e l'insorgere della transizione obbliga inevitabilmente il segnale della sonda ad uscire dall'intervallo di stabilità.

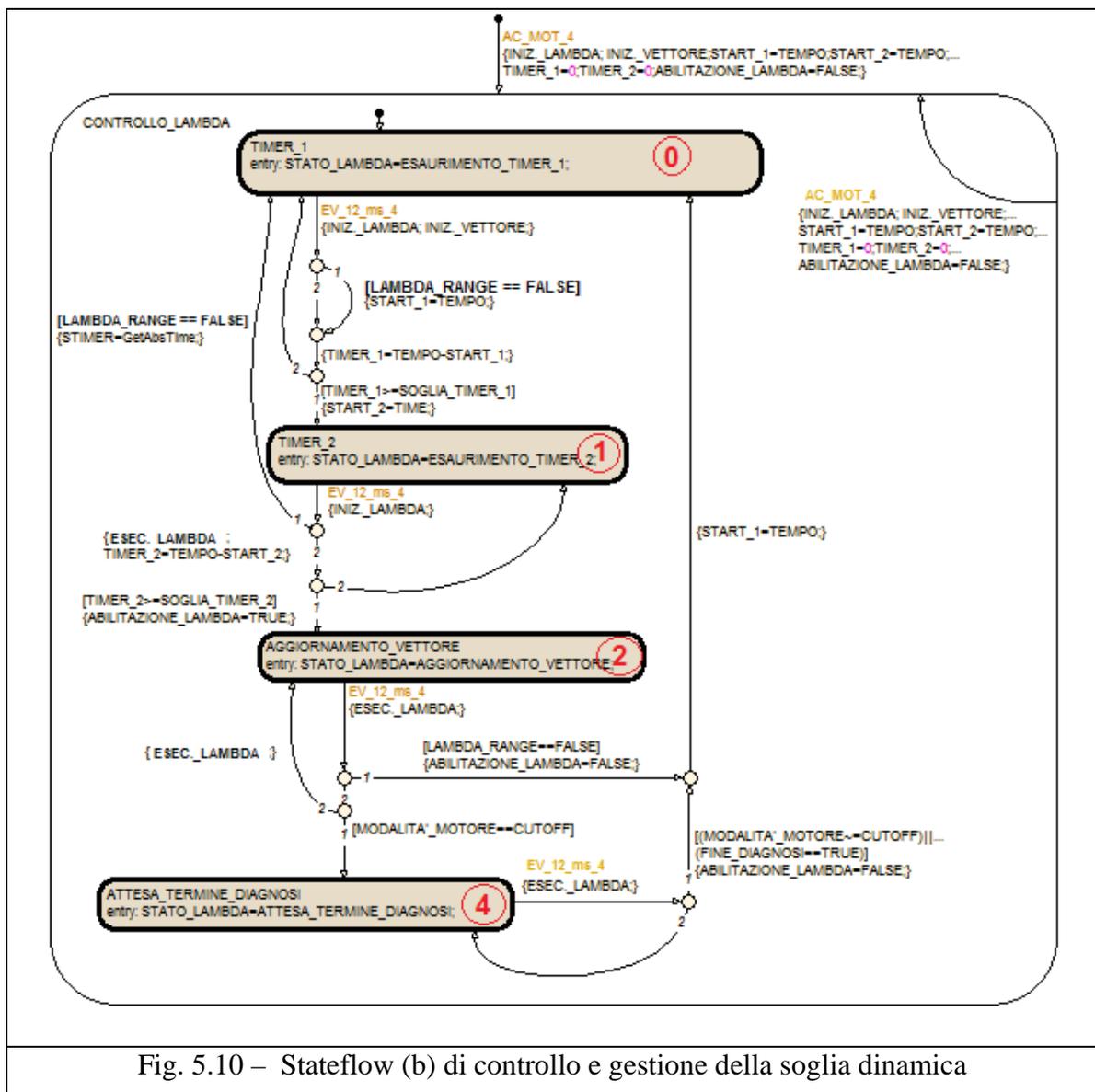
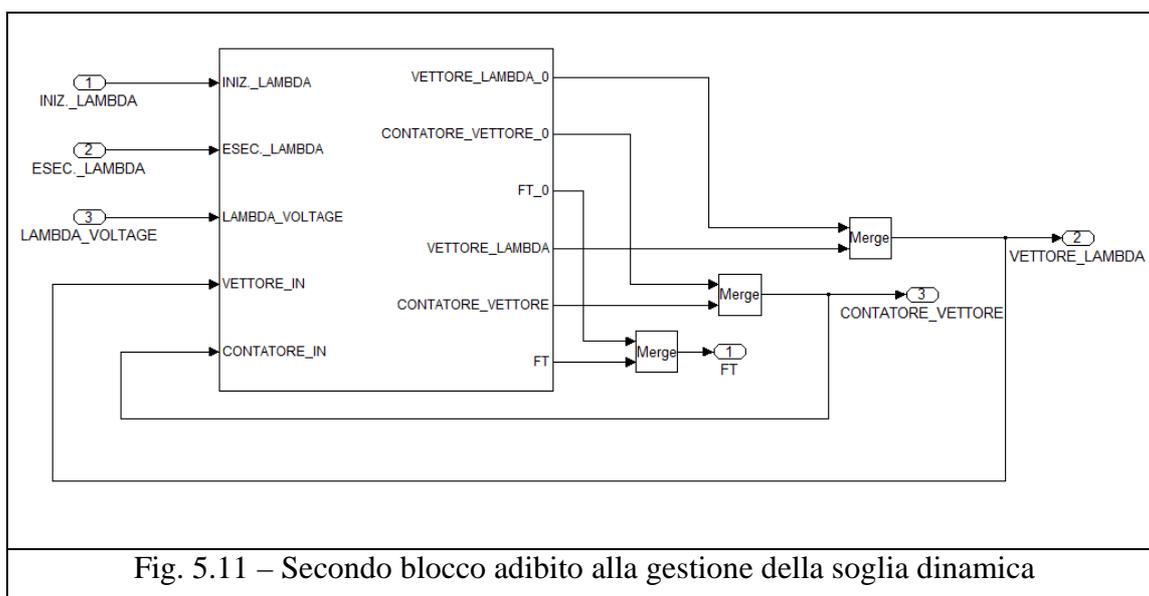


Fig. 5.10 – Stateflow (b) di controllo e gestione della soglia dinamica

Passiamo ora ad analizzare il secondo blocco (Fig. 5.11), quello responsabile della specifica II. Come input, oltre al segnale in tensione della sonda (LAMBDA VOLTAGE), troviamo le chiamate a funzione per l'inizializzazione (INIZIALIZZAZIONE LAMBDA) e l'esecuzione (ESECUZIONE LAMBDA) relativa al riempimento e aggiornamento del vettore. L'output principale, finalità del blocco, è rappresentato dalla soglia FT, ma vengono pubblicati anche il vettore a scorrimento (VETTORE LAMBDA) e il contatore delle posizioni riempite del vettore (CONTATORE VETTORE), per verificare in fase di validazione modello la corretta evoluzione.



In Fig. 5.12 sono visibili le modalità di produzione degli output durante l'inizializzazione e durante l'esecuzione. Il sottoblocco innescato dalla chiamata INIZIALIZZAZIONE VETTORE pone a zero il vettore di scorrimento e la soglia FT, mentre fissa ad 1 il contatore delle posizioni riempite nel vettore. Il secondo sottoblocco innescato dalla chiamata ESECUZIONE VETTORE provvede alla produzione della soglia dinamica secondo lo schema logico riportato in Fig. 5.13.

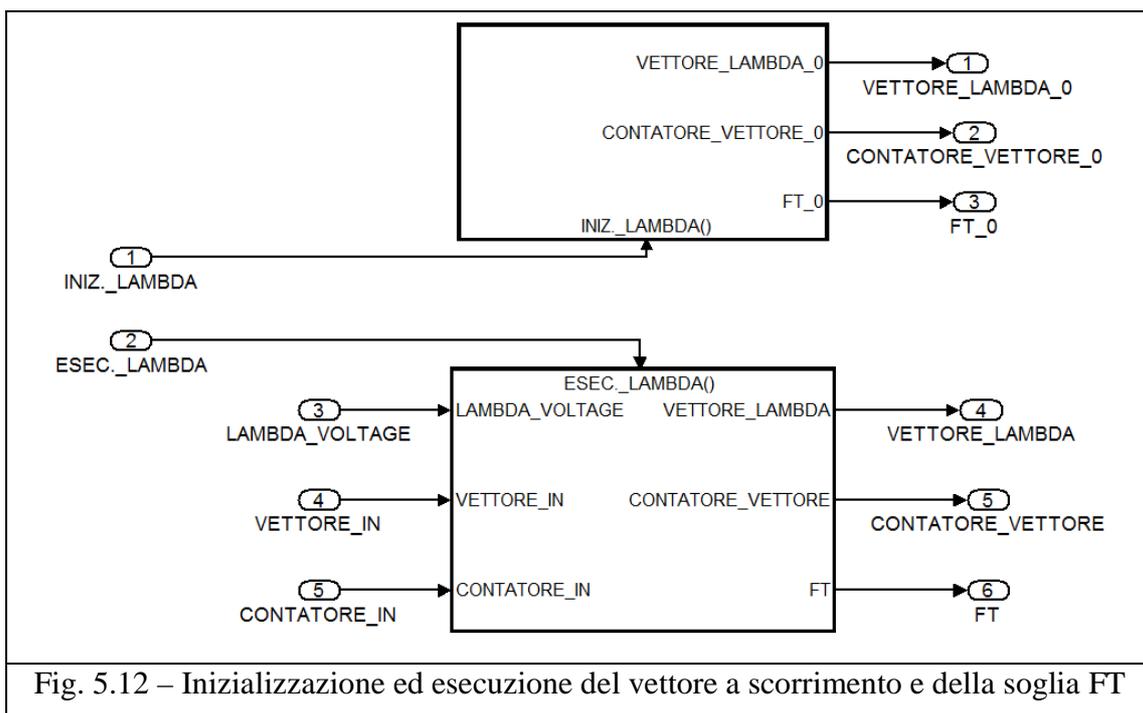


Fig. 5.12 – Inizializzazione ed esecuzione del vettore a scorrimento e della soglia FT

Il vettore VETTORE IN, di ritorno dall'esterno del blocco in esame, necessita di essere aggiornato ad ogni evoluzione a 12 ms. La procedura di aggiornamento prevede in primo luogo l'annullamento del primo elemento del vettore e lo shift dei restanti elementi di una posizione. Questa operazione nel modello viene eseguita dalle sezioni (a) e (b) evidenziate in blu in Fig. 5.14.

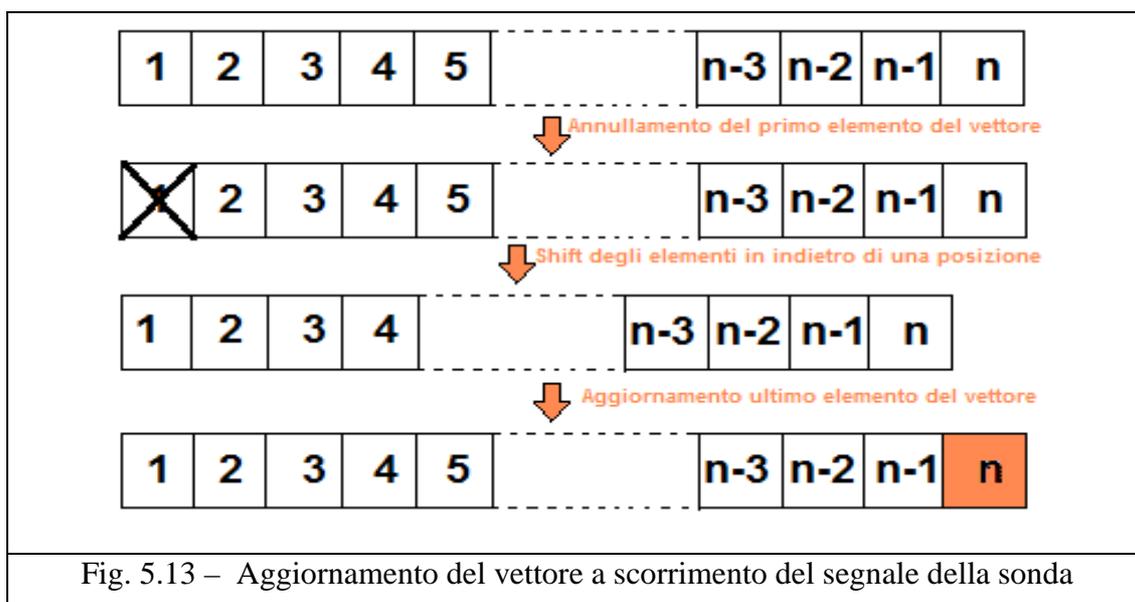


Fig. 5.13 – Aggiornamento del vettore a scorrimento del segnale della sonda

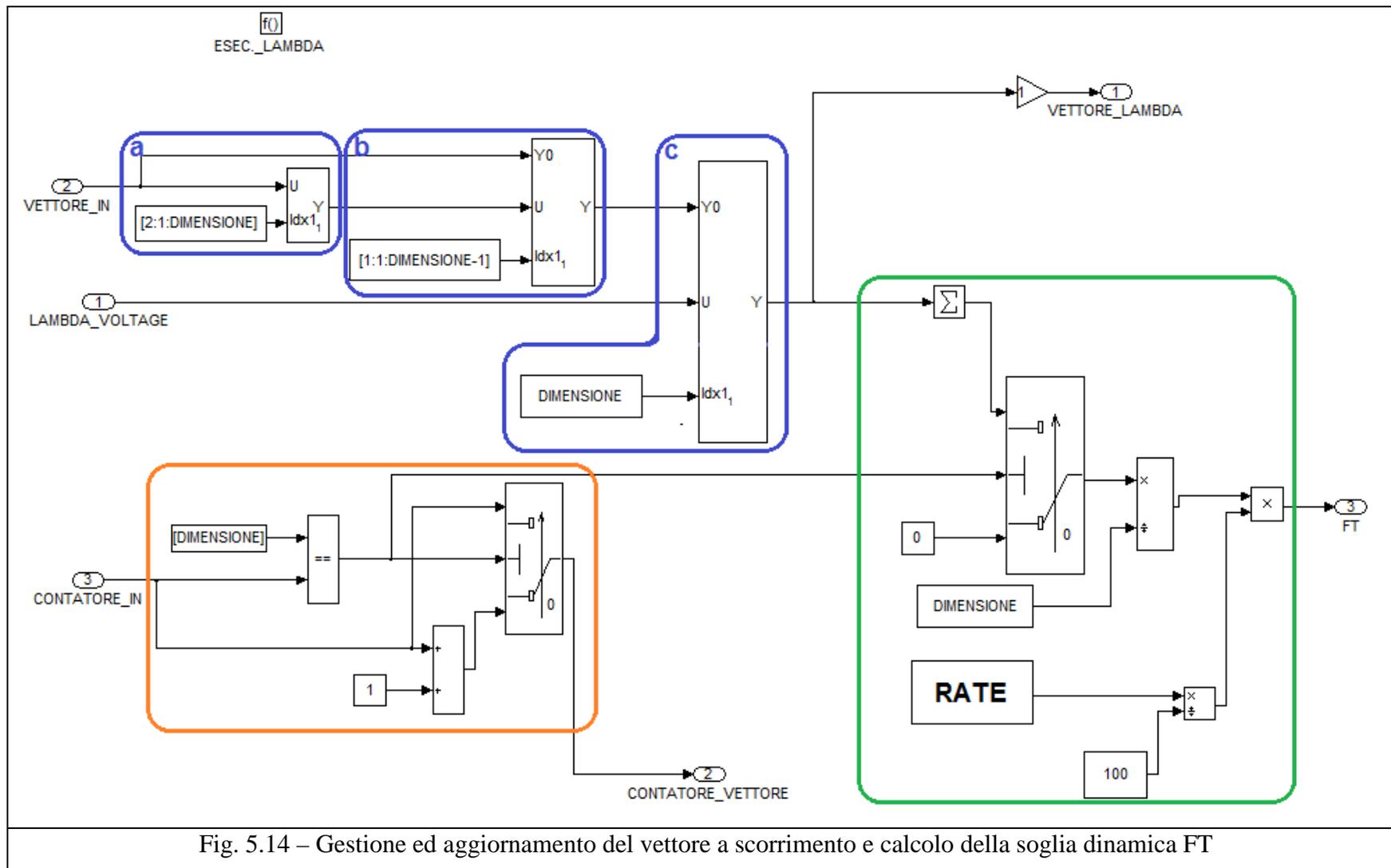


Fig. 5.14 – Gestione ed aggiornamento del vettore a scorrimento e calcolo della soglia dinamica FT

La sezione (a) seleziona gli elementi posizionati dal secondo indice all'ultimo, generando un vettore che entra nella sezione (b), dove viene ricollocato sullo stesso vettore di partenza a partire dalla prima posizione fino alla penultima. Dopo queste due operazioni, non rimane che aggiornare l'ultima posizione del vettore con il nuovo valore di tensione della sonda a valle (LAMBDA VOLTAGE), eseguito nella sezione (c).

Nella sezione arancione viene incrementato il contatore che identifica il riempimento del vettore. Ad ogni esecuzione il contatore, che ricordiamo essere inizializzato al valore unitario, viene incrementato di 1 fino al raggiungimento della dimensione del vettore a scorrimento. A questo punto il vettore è completamente riempito, il contatore viene congelato al suo attuale valore tramite l'attivazione di un commutatore e viene attivato un secondo commutatore posto nella sezione verde adibita al calcolo della soglia. Viene, quindi, calcolato il rapporto tra la somma degli elementi del vettore e la dimensione del vettore stesso, determinando infine la soglia che si ottiene moltiplicando la media appena calcolata per la calibrazione RATE (percentuale sul valore stabile della sonda alla quale ci interessa fissare la soglia FT). Un primo valore che sembra emergere dalle simulazioni off-line è 96 %, anche se il valore finale sarà il risultato di una campagna di acquisizioni a bordo veicolo.

La soglia FT così calcolata viene inviata alla macchina di diagnosi per il calcolo dell'indice di detezione.

5.6 – Macchina di diagnosi

In questo complicato stateflow, di cui si riporterà soltanto lo schema logico per motivi di segreto aziendale, viene applicata la strategia di detezione dell'indice descritta nel Capitolo 4. Come input la macchina a stati riceve,

oltre alle condizioni di abilitazione descritte in precedenza, le seguenti calibrazioni:

- ST: valore della seconda soglia della transizione;
- TEMPO MASSIMO e TEMPO MINIMO: massimo e minimo valore di tempo di diagnosi (END-START) per ritenere valido l'indice calcolato;
- NUMERO INDICI: quantitativo di indici (INDICE SINGOLO) da rilevare prima di evadere l'indice medio di detezione (INDICE DIAGNOSI);
- SOGLIA INDICE: valore identificativo del confine tra una sonda con corretto funzionamento ed una mal funzionante (invecchiata);

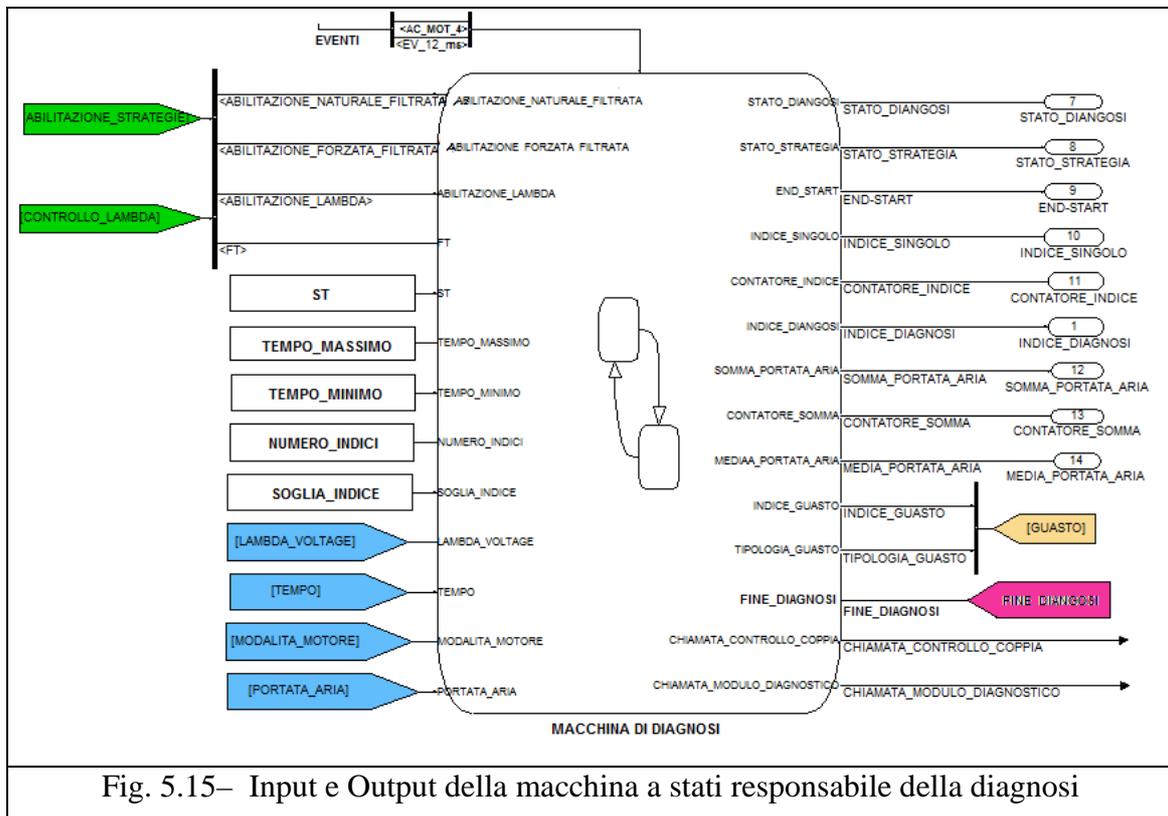


Fig. 5.15– Input e Output della macchina a stati responsabile della diagnosi

L'algoritmo diagnostico prevede le due strategie (naturale e forzata) disposte in parallelo, la prima coppia di condizioni di abilitazione (ABILITAZIONE NATURALE FILTRATA e ABILITAZIONE LAMBDA o ABILITAZIONE FORZATA FILTRATA e ABILITAZIONE

LAMBDA) verificata, individua quale delle due strategie attivare. Nel caso in cui dovessero verificarsi contemporaneamente entrambe le condizioni abilitanti, la strategia naturale e forzata, la precedenza viene attribuita alla strategia forzata, in quanto è quella che consente i minori tempi di diagnosi. Inoltre se dall'abilitazione della strategia naturale alla richiesta di cut-off da parte dell'utente dovesse risultare verificata la condizione di abilitazione per la strategia forzata, anche in questo caso, si procede a concederle la priorità. La strategia è riportata nello schema a blocchi di Fig. 5.16 ed è quasi identica nei due casi se non per l'aggiunta, nella strategia forzata, di una chiamata a funzione verso un blocco ausiliario, adibito all'elaborazione del tempo di rilascio pedale da comunicare al controllo coppia.

L'evoluzione dell'algoritmo prevede, una volta verificate le condizioni di abilitazione, l'attesa del cut-off che originerà la transizione grasso-magro oggetto di valutazione.

All'attuazione del cut-off, viene interrotto il calcolo della soglia dinamica e viene congelato l'ultimo valore calcolato della soglia FT. Al superamento di tale soglia vengono memorizzati il tempo (START) e la tensione della sonda lambda (RICH); in maniera simile si congelano anche il tempo (END) e la tensione (LEAN) registrate al superamento della seconda soglia ST. Parallelamente a questa operazione è stato calcolato il valore di portata d'aria media nell'intervallo temporale Δt_2 (da inizio cut-off alla seconda transizione ST).

Al superamento della seconda soglia sono quindi disponibili tutti i parametri per il calcolo dell'indice di detezione secondo l'espressione qui riportata:

$$INDICE \ SINGOLO = \frac{\left(\frac{RICH - LEAN}{END - START} \right)}{QAH_{mean} |_{\Delta t_2}} \quad [V / g]$$

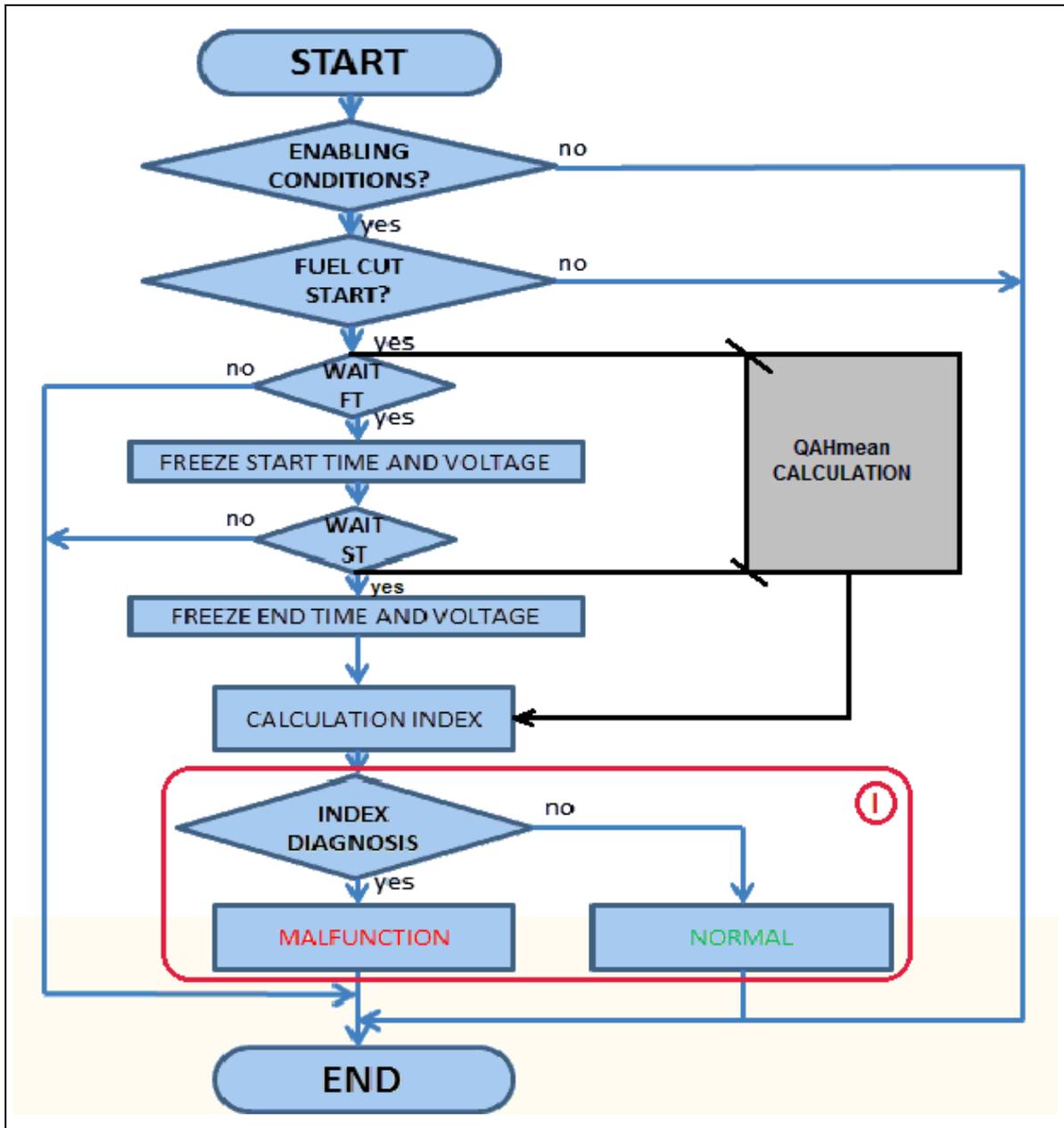


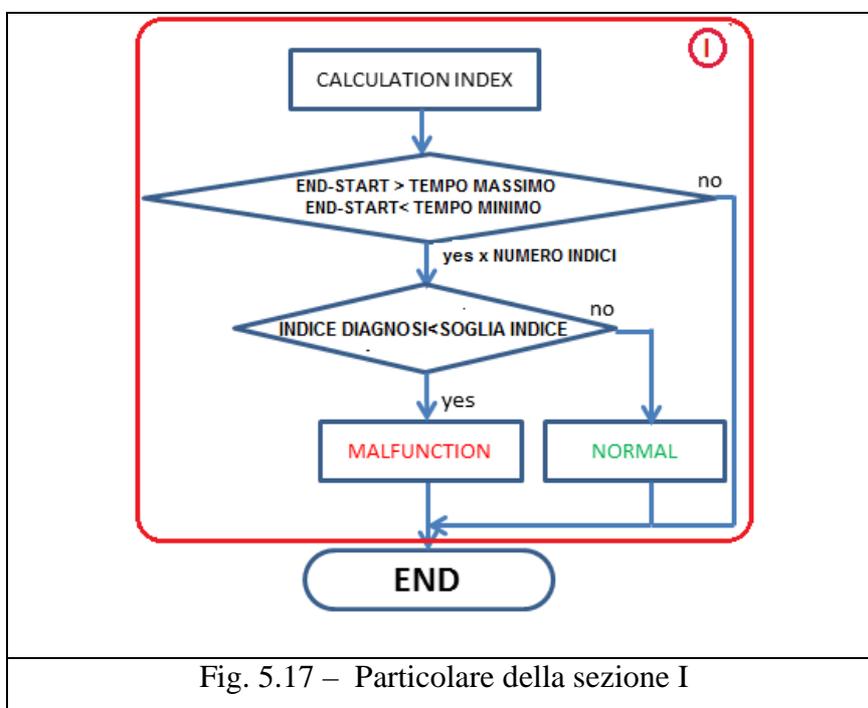
Fig. 5.16 – Schema a blocchi dell’algoritmo di diagnosi

L’indice appena calcolato subisce il seguente trattamento:

- Viene scartato se la differenza END - START è inferiore o superiore a delle soglie calibrate, denominate rispettivamente TEMPO MINIMO E

TEMPO MASSIMO. Questo espediente è auspicabile possa eliminare falsi allarmi dettati da particolari condizioni quali, per esempio, spike del segnale elettrico della sonda a valle durante la fase di transizione verso il magro o una risalita del segnale in tensione della sonda durante la transizione per fenomeni non presi in considerazione.

- Viene memorizzato un numero di indici sufficienti (NUMERO INDICI) al calcolo di un indice medio (INDICE DIAGNOSI) che possa ridurre la possibilità di incorrere in falsi allarmi. A questo proposito possono essere utilizzati indici ricavati da entrambe le strategie.



L'indice di detezione (INDICE DIAGNOSI) viene quindi confrontato con il valore di confine SOGLIA INDICE per evadere l'esito della diagnosi. Nello specifico nel caso di INDICE DIAGNOSI superiore alla SOGLIA INDICE, il sensore di ossigeno a valle catalizzatore viene dichiarato funzionante correttamente (OK), viceversa mal funzionante o invecchiato (KO).

Per quel che riguarda gli output della macchina di diagnosi, oltre a quelli fino a qui già descritti, troviamo:

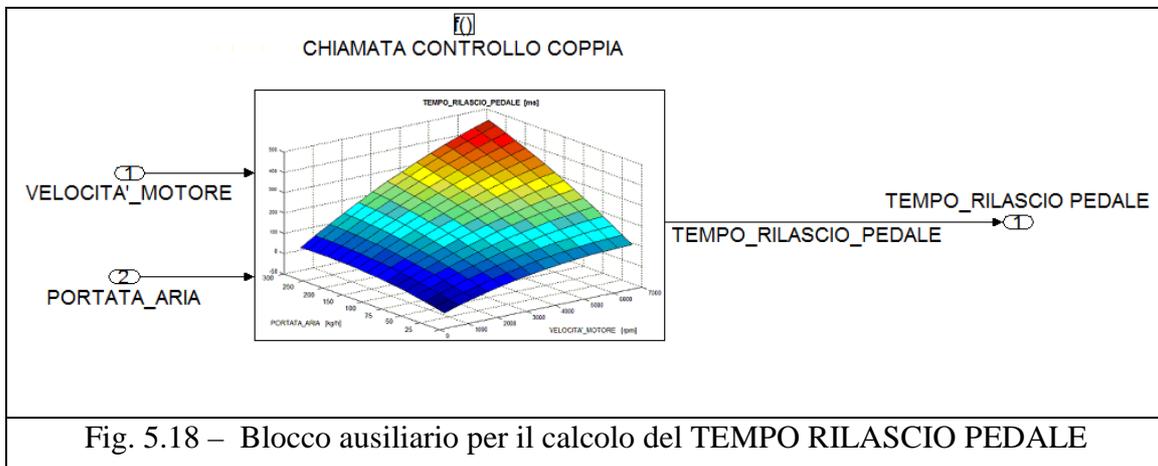
- **STATO DIAGNOSI E STATO STRATEGIA:** indicatori degli stati stabili percorsi dallo stateflow, utili per verificare il corretto funzionamento in fase di validazione modello;
- **CONTATORE INDICE:** contatore del numero di indici (INDICE SINGOLO) rilevati, utili al raggiungimento del quantitativo stabilito (NUMERO INDICI) per il calcolo del valore medio (INDICE DIAGNOSI);
- **SOMMA PORTATA ARIA:** somma dei valori della portata d'aria elaborata dal motore nell'intervallo Δt_2 ;
- **CONTATORE SOMMA:** contatore del numero di valori di portata costituenti la somma;
- **MEDIA PORTATA ARIA (QAHmean):** valore medio della portata d'aria nell'intervallo Δt_2 ottenuto come rapporto dei due precedenti output;
- **INDICE GUASTO e TIPOLOGIA GUASTO:** parametri da comunicare al modulo diagnostico riguardanti, rispettivamente, l'indice calcolato (INDICE DIAGNOSI) e il risultato della diagnosi (OK/KO);
- **FINE DIAGNOSI:** flag prodotto per avvisare il blocco adibito alla produzione della soglia dinamica del termine della diagnosi;
- **CHIAMATA CONTROLLO COPPIA:** chiamata a funzione per attivare la comunicazione del tempo rilascio pedale al controllo coppia;
- **CHIAMATA MODULO DIAGNOSTICO:** chiamata a funzione per attivare la comunicazione con il modulo diagnostico;

5.7 – Blocchi ausiliari

Gli ultimi due blocchi che completano la presentazione del modello riguardano il calcolo del tempo di rilascio pedale per la strategia forzata e la comunicazione del risultato della diagnosi al modulo diagnostico.

5.7.1– Gestione del tempo rilascio pedale

Una volta abilitata la strategia forzata, la macchina di diagnosi, nell'attesa del taglio cilindri, evade una chiamata a funzione (CHIAMATA CONTROLLO COPPIA) che innesca il blocco, riportato in Fig. 5.18, addetto alla produzione di un TEMPO RILASCIO PEDALE da comunicare al controllo coppia. In base alle considerazioni già effettuate sulla scelta di questo parametro governante la dinamica di taglio della coppia, si precisa che esso viene prodotto da una mappa 3D la quale, in funzione di regime (VELOCITA' MOTORE) e carico motore (PORTATA ARIA), restituisce il tempo di rilascio pedale per dato punto motore.



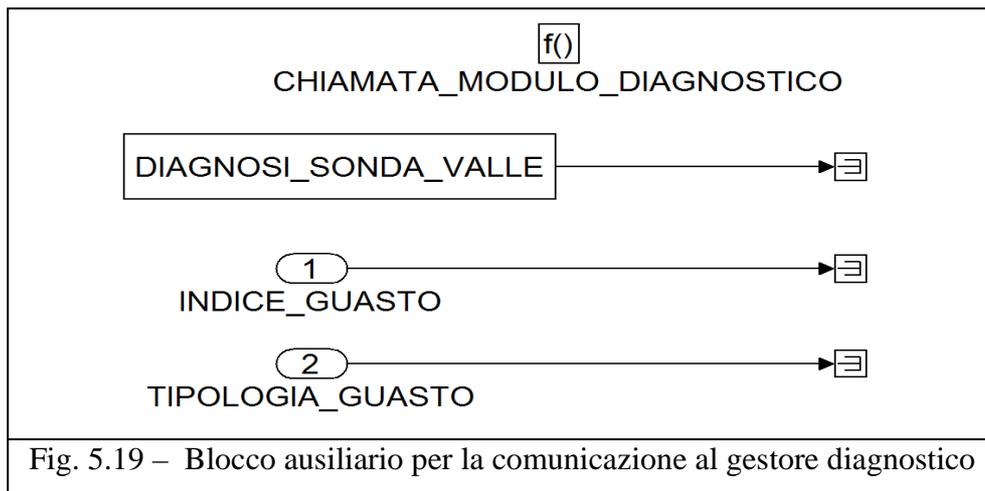
La mappa utilizzata sarà determinata in fase di calibrazione e, come già detto in precedenza, dovrà mediare all'ottimizzazione dei seguenti aspetti:

- ✓ Riduzione dei tempi di diagnosi;
- ✓ Salvaguardia della guidabilità del veicolo;

5.7.2 – Comunicazione al gestore diagnostico

Il modulo diagnostico implementato in centralina è predisposto a ricevere da svariati modelli di autodiagnosi i parametri visibili in Fig. 5.19 (che rappresenta il blocco destinato a tale trasmissione):

- a) Sigla rappresentativa del componente in oggetto di diagnosi
- b) Risultato della diagnosi (TIPOLOGIA GUASTO), che nel caso specifico è riconducibile ad un corretto (OK) o non corretto (KO) funzionamento del sensore;
- c) Parametro identificativo del guasto (INDICE GUASTO), coincidente con l'indice di detezione elaborato dalla diagnosi (INDICE DIAGNOSI);



Con questo ultimo paragrafo si ritiene completata la descrizione della struttura del modello Simulink elaborato durante il periodo di tesi.

Capitolo 6

Simulazioni e test di validazione della strategia

6.1 – Introduzione all'attività

La parte conclusiva dell'attività trattata nell'elaborato, è stata dedicata alla verifica della robustezza della diagnosi e dell'effettivo corretto funzionamento del modello Simulink. In prima istanza si è voluto verificare il corretto funzionamento del modello in termini di evoluzione, analizzando la conformità alle aspettative dell'avanzamento e dell'andamento di tutti i parametri.

In secondo luogo è prevalsa l'esigenza di valutare la congruenza tra i risultati, in termini di indice di detezione e dispersione dello stesso tra le analisi effettuate off-line nella parte di caratterizzazione sperimentale e gli effettivi risultati del modello diagnostico.

Per effettuare queste valutazioni, si sono aggiunte altre acquisizioni a quelle già disponibili, effettuate questa volta con le seguenti modalità:

- Treni di cut-off in quarta, quinta e sesta marcia con differenti portate d'aria decrescenti di inizio cut-off, con catalizzatore e sonda entrambi nuovi;
- Stessa tipologia di prova ampliando il numero di cut-off per un catalizzatore nuovo ed una sonda degradata software.

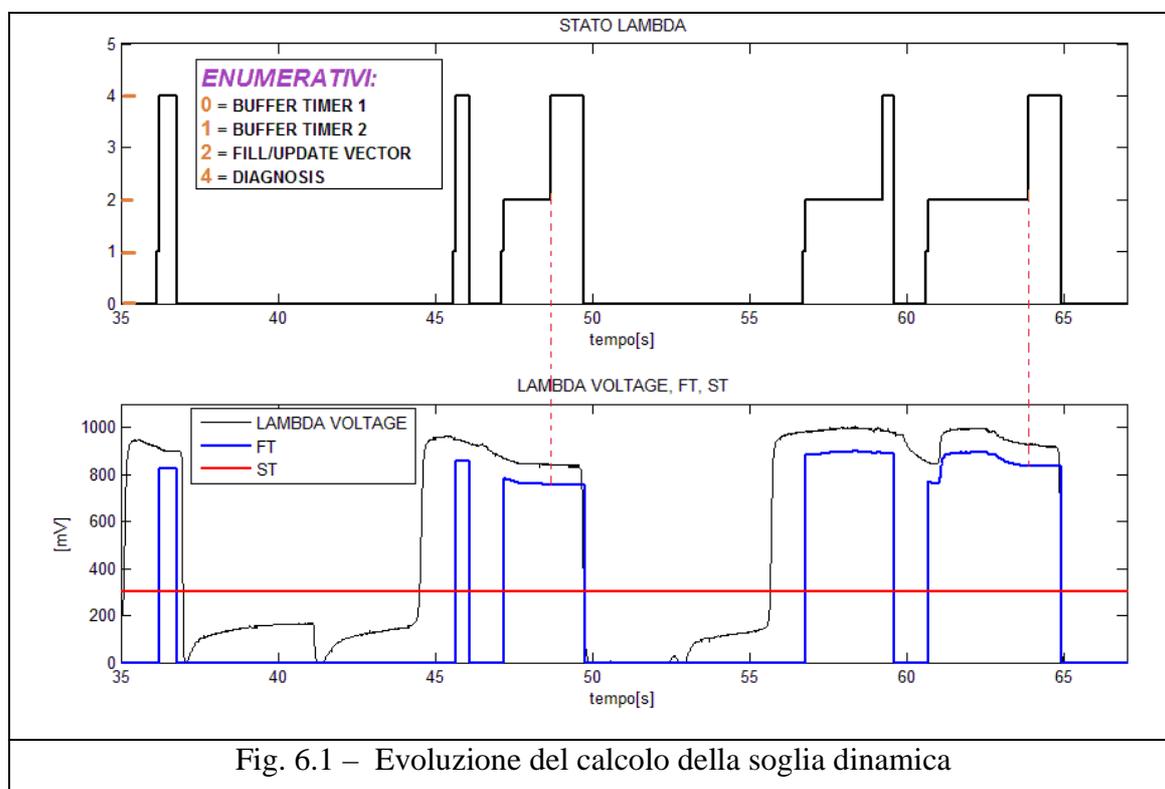
Come ultima trattazione è stato elaborato un codice automatizzato per la calibrazione delle due soglie FT (definita da RATE) ed ST, con lo scopo di evidenziare quale coppia di soglie produce la minor dispersione dell'indice e, allo stesso tempo, mantiene sufficientemente distanti le gaussiane relative a sonda nuova e sonda invecchiata.

6.2 – Risultati della diagnosi

In questo paragrafo vengono riportati gli andamenti delle principali variabili elaborate dall’algoritmo, ottenuti inserendo le acquisizioni relative a sonda e catalizzatore entrambi nuovi come input al modello. La calibrazione del tempo rilascio pedale è quella standard attualmente implementata in centralina. Inoltre le due strategie, naturale e forzata, sono abilitate da condizioni differenti, ma nella loro esecuzione sono identiche poiché stiamo simulando fuori vettura.

6.2.1 – Evoluzione della soglia dinamica

Il primo punto su cui ci soffermiamo è la verifica dell’efficienza di calcolo della soglia dinamica FT (RATE). In relazione alla Fig. 6.1 viene riportato nel primo grafico un indicatore degli stati stabili occupati dallo stateflow di Fig. 5.10 e nel secondo l’evoluzione delle due soglie per lo studio della transizione.



Durante questi secondi di simulazione il calcolo dell'indice avviene soltanto in due occasioni, benché il segnale in tensione della sonda a valle esegua la transizione tre volte. Infatti, durante la prima transizione, l'interruzione del cut-off riporta lo stateflow allo stato (0), con conseguente disabilitazione della condizione ABILTAZIONE LAMBDA ed interruzione della stampa della soglia superiore FT. Si può inoltre notare che il valore della soglia dinamica viene congelato nel passaggio tra stato (2) e (4), cioè alla richiesta di cut-off, e rimane tale fino alla comparsa della transizione e al termine della diagnosi quando viene nuovamente azzerato, nell'attesa di riempire il TIMER 1 all'approvazione della LAMBDA RANGE.

6.2.2 – Evoluzione della macchina di diagnosi

Allo scopo di verificare il corretto funzionamento della macchina di diagnosi sono stati inseriti due indicatori di stato STATO DIAGNOSI e STATO STRATEGIA, dei quali occorre elencare il significato dei relativi enumerativi per comprendere l'evoluzione dello stateflow :

ENUMERATIVI MACCHINA DI DIAGNOSI

STATO DIAGNOSI

0 → *ATTESA ABILITAZIONE*

1 → *ATTESA CUT-OFF (FORZATA)*

2 → *ATTESA CUT-OFF (NATURALE)*

4 → *ATTESA PRIMA SOGLIA FT*

8 → *ATTESA SECONDA SOGLIA ST*

16 → *TERMINE DIAGNOSI*

STATO STRATEGIA

0 → *ATTESA ABILITAZIONE*

1 → *STRATEGIA FORZATA*

2 → *STRATEGIA NATURALE*

4 → *RISULTATO DIAGNOSI: OK*

8 → *RISULTATO DIAGNOSI: KO*

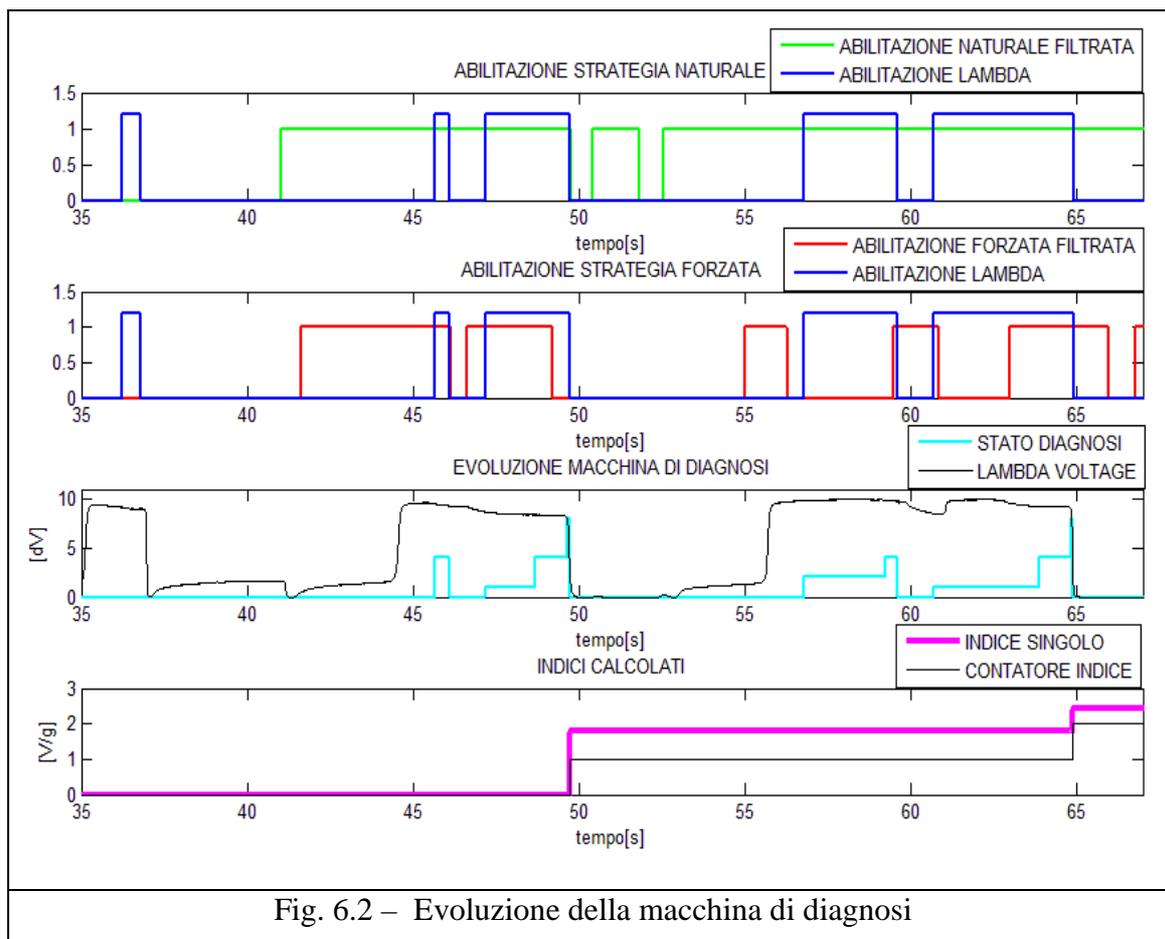


Fig. 6.2 – Evoluzione della macchina di diagnosi

Occorre specificare che con l’enumerativo (16), che rappresenta il termine della diagnosi, si intende l’ottenimento del NUMERO INDICE stabilito per il calcolo dell’indice di detezione medio che in questo ritaglio di simulazione non viene raggiunto (in quanto superiore a 2).

In base agli enumerativi appena descritti per l’indicatore STATO DIAGNOSI si nota, dal terzo grafico di Fig. 6.2, come vengano calcolati due indici, entrambi ottenuti tramite strategia forzata (che ricordiamo per ora opera allo stesso modo della naturale) portando il CONTATORE INDICE al valore 2 (quarto grafico). A $t = 57,5$ s e $t = 61$ s, si nota come al verificarsi delle condizioni di attivazione di entrambe le strategie, la precedenza di abilitazione venga attribuita a quella forzata. Durante la simulazione, la macchina a stati evolve verso la strategia naturale una volta

sola (@ $t = 57$ s), senza riuscire a calcolare l'indice a causa della ridotta durata del cut-off che non permette di eseguire la transizione. Analizziamo ora, con l'aiuto di Fig. 6.3, la particolare evoluzione della macchina di diagnosi nello studio di una singola transizione utile al calcolo dell'indice medio e quindi al termine della diagnosi.

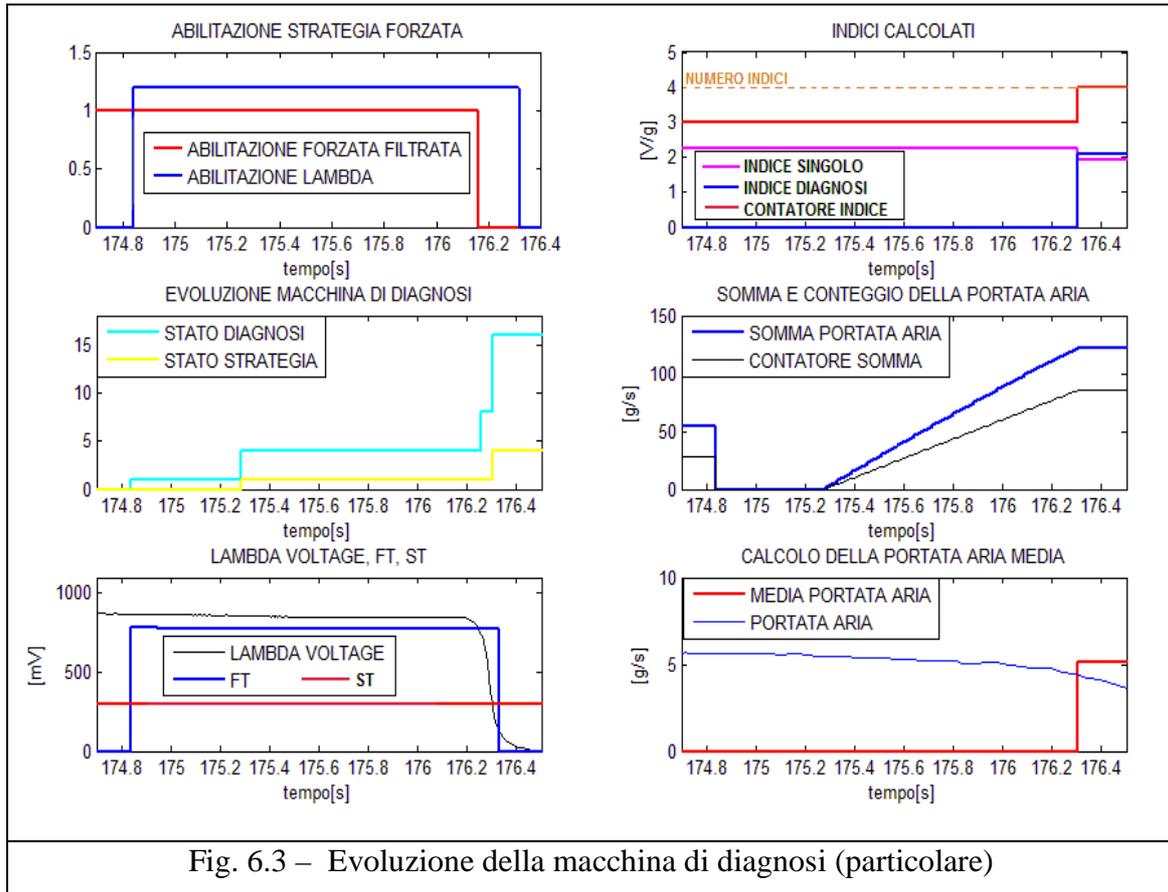


Fig. 6.3 – Evoluzione della macchina di diagnosi (particolare)

Dal grafico inerente all'evoluzione della macchina di diagnosi si può accertare il corretto funzionamento dell'algoritmo; infatti, una volta verificate entrambe le condizioni di abilitazione (ABILITAZIONE FORZATA FILTRATA e ABILITAZIONE LAMBDA), la macchina procede al calcolo della soglia dinamica nell'attesa della richiesta di un cut-off. Alla comparsa della transizione della sonda vengono superate entrambe le soglie (FT ed ST) e registrati i parametri per il calcolo dell'indice. Infine, avendo raggiunto la soglia calibrabile del NUMERO INDICI la macchina

procede al calcolo dell'indice di detezione medio, INDICE DIAGNOSI, ed emette il risultato che, in questo caso, equivale all'enumerativo (4) dell'indicatore STATO STRATEGIA (@ t = 176.3), testimone di un sensore con un corretto funzionamento. In parallelo a ciò, negli ultimi due grafici in basso a destra è riportata l'evoluzione del calcolo della portata aria media elaborata dal motore nell'intervallo di rilevanza Δt_2 , da cui risulta visibile l'incremento del parametro SOMMA PORTATA ARIA con i valori di portata registrati ogni 12 ms e l'incremento del CONTATORE SOMMA, destinati al calcolo del parametro MEDIA PORTATA ARIA, prontamente adoperato per il calcolo dell'indice.

6.3 – Dispersione degli indici di detezione

Il passaggio successivo per la validazione del modello prevede l'accertamento di una sufficiente distinzione fra gli indici elaborati dall'algoritmo nel caso di una sonda nuova o invecchiata. Il perseguimento di questo proposito è stato limitato dalla carenza di acquisizioni in riferimento ad una sonda invecchiata in maniera naturale. Premesso ciò, in prima approssimazione, verranno trattati gli indici calcolati sulle ridotte acquisizioni a disposizione pur con la conseguente scarsa attendibilità dei risultati ottenuti. In secondo luogo, verranno proposti degli indici calcolati su delle nuove acquisizioni eseguite su sonda nuova e degradata tramite software (Magnetit Marelli), con l'obiettivo di valutare la dispersione nei due casi e senza dare peso alla lontananza fra le Gaussiane probabilistiche, in quanto non rispecchia la reale distinzione fra gli indici di sonde nuove ed invecchiate.

6.3.1 – Dispersione indici delle acquisizioni a disposizione

Dalla totalità delle acquisizioni disponibili ne sono state selezionate alcune per il calcolo dell'indice (SINGOLO INDICE) ottenuto attraverso la simulazione del modello. E' stato possibile raccogliere un treno di 21 transizioni utili relative a sonda nuova e di 12 transizioni utili relative a sonda invecchiata. In quest'analisi gli indici sono stati ricavati a partire dalle più differenti condizioni motore di inizio cut-off e con calibrazioni di tempo rilascio pedale standard. Le simulazioni sono state eseguite con due differenti calibrazioni riguardanti il valore delle due soglie per caratterizzare l'influenza di questa scelta.

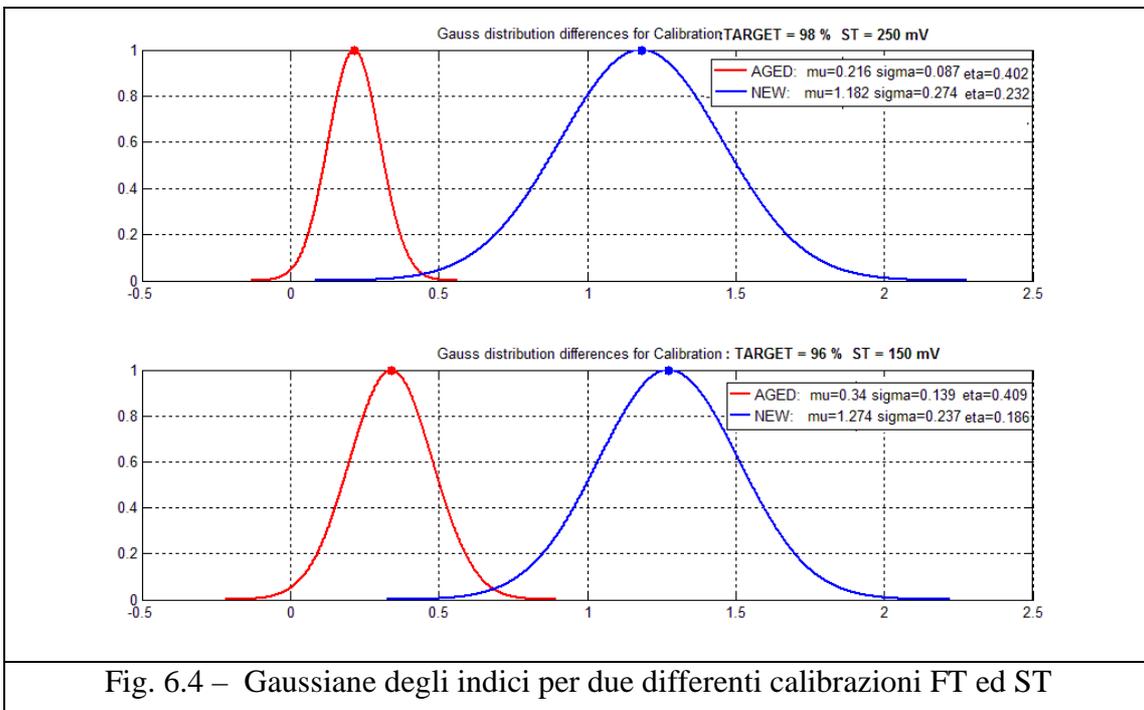


Fig. 6.4 – Gaussian degli indici per due differenti calibrazioni FT ed ST

Le Gaussian così ottenute risultano sovrapposte lungo un intervallo di valori non trascurabile. L'esito così proposto non è soddisfacente ma, tenendo conto di ciò che è stato premesso, possiamo ancora sperare che per determinate condizioni di abilitazione, la dispersione vada a ridursi entro valori accettabili per la diagnosi. Occorre inoltre precisare che queste curve

sono state costruite utilizzando i singoli indici elaborati dal modello, mentre normalmente la diagnosi (cioè il paragone con un adeguato valore di soglia) viene eseguito sulla media di più indici.

Come corollario dell'analisi eseguita si può osservare che “eta”, cioè la “standard deviation” (sigma σ) normalizzata rispetto al valore medio (mu μ), tende a mutare in base alla scelta delle soglie FT ed ST; questo aspetto sarà preso come spunto in uno dei paragrafi successivi per generare un codice di auto-calibrazione destinato alla ricerca della coppia di calibrazione che minimizza la dispersione.

6.3.2 – Dispersione indici sulle nuove acquisizioni

Le nuove acquisizioni, come già accennato, riguardano una sonda nuova ed una sonda degradata con l'utilizzo di software entrambe montate a valle di un catalizzatore nuovo. Le simulazioni lanciate hanno analizzato transizioni eseguite a partire da condizioni di portata aria fissate, ripetute per la quarta, la quinta e la sesta marcia. Nel caso di sonda nuova è stato eseguito un cut-off per ognuno dei seguenti valori di portata d'aria:

200 – 150 – 100 – 80 – 60 – 40 – 30 [kg/h]

Per quanto riguarda la sonda degradata software il numero di cut-off è salito a 3 (in alcuni casi 4) per ogni valore di portata. Il tempo di rilascio pedale imposto è di 100 ms, tempo piuttosto basso in concordanza con una strategia forzata.

Gli indici sono stati calcolati con due differenti calibrazioni per le soglie FT ed ST riportati in rosso e blu.

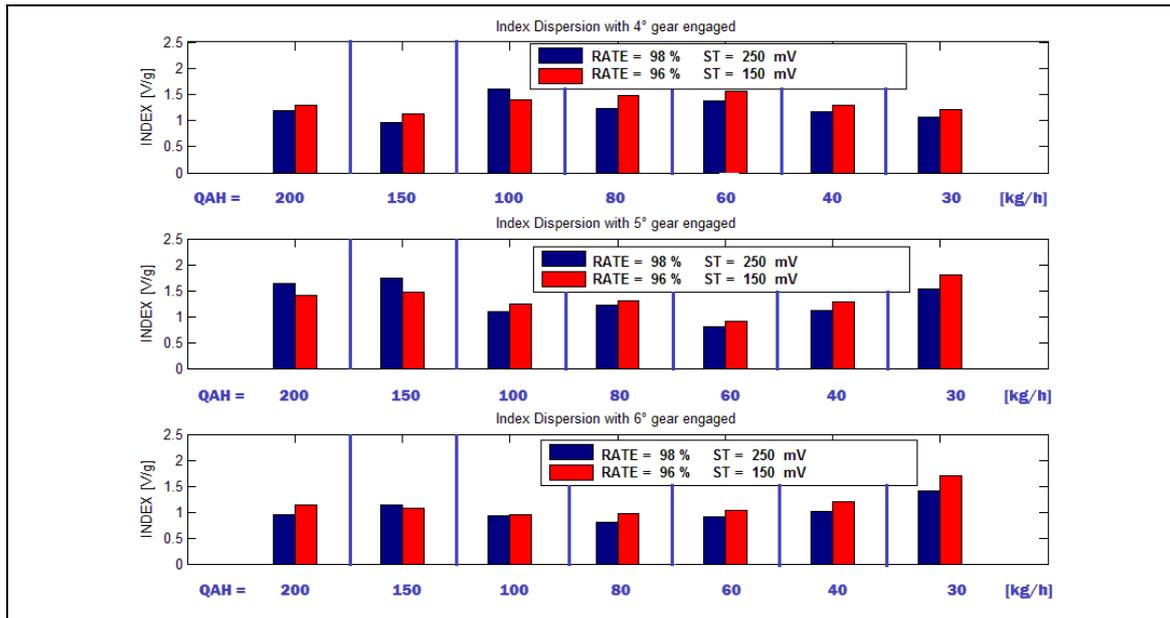


Fig. 6.5 – Indici elaborati dal modello in 4-5-6° marcia al variare della portata d'aria ottenuti con sonda nuova

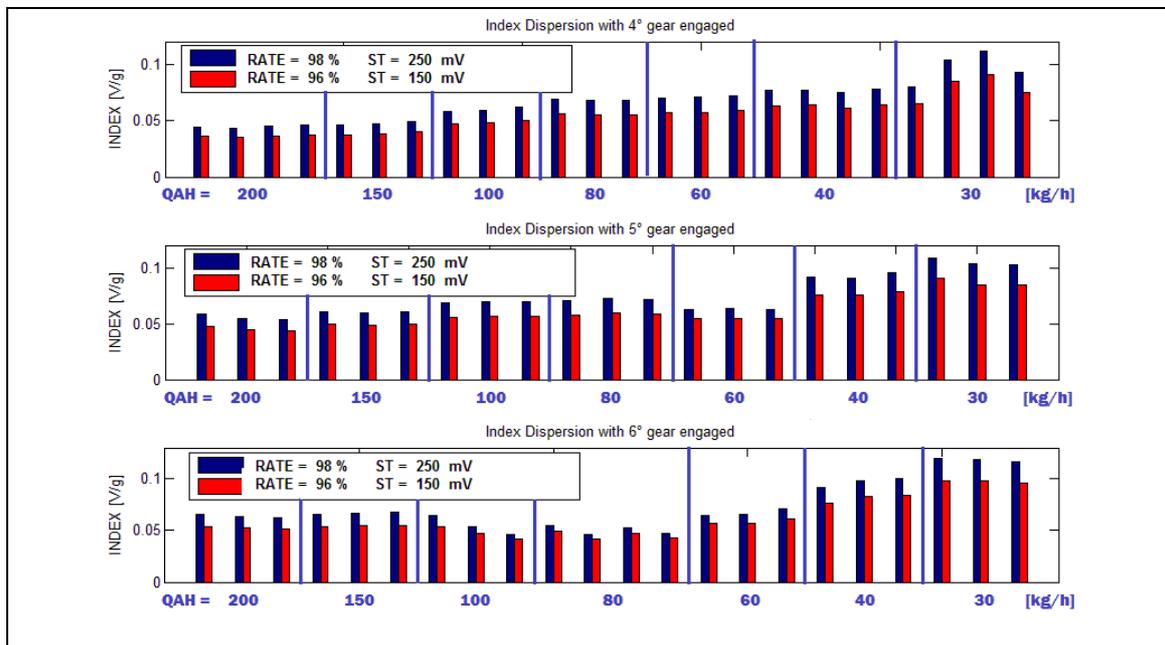
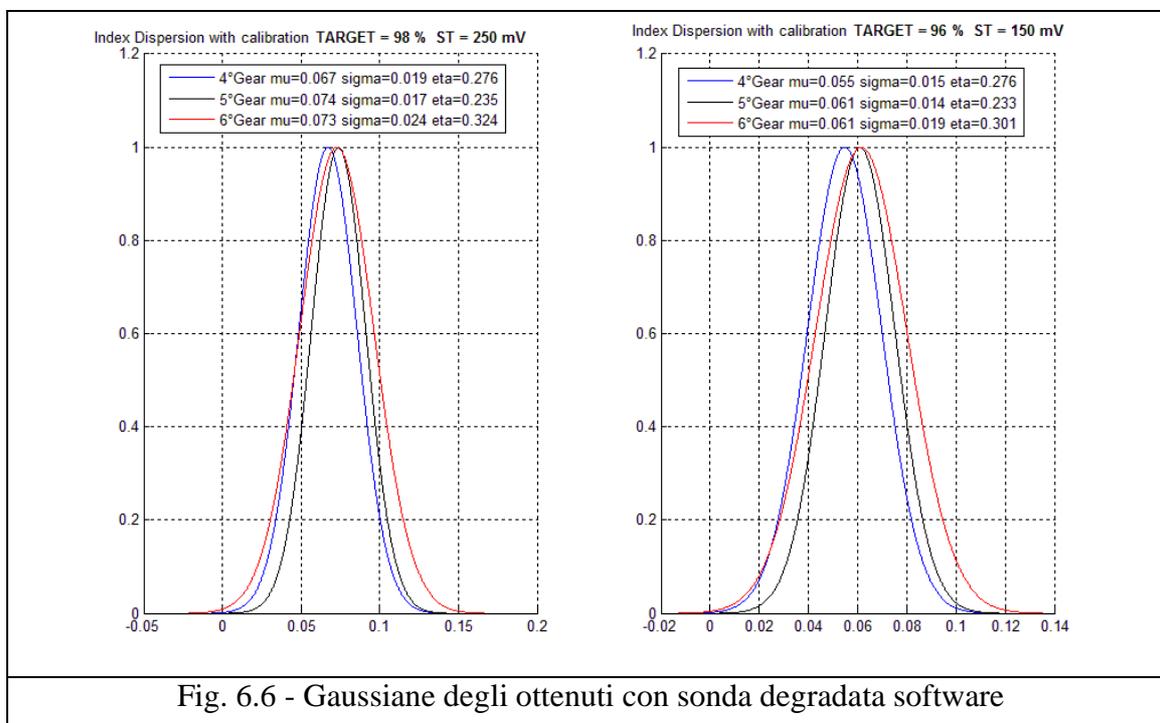


Fig. 6.5 – Indici elaborati dal modello in 4-5-6° marcia al variare della portata d'aria per sonda degradata software

I risultati riportati in Fig. 6.4 e 6.5 evidenziano nel complesso una dispersione molto simile a quella vista nel paragrafo 6.3.1 (meglio apprezzabile in Fig. 6.6); paragonando la deviazione standard normalizzata rispetto al valore medio (η) si riscontrano, in effetti, valori simili allo studio effettuato nel sottoparagrafo precedente.

Un'altra importante osservazione risiede nel progressivo aumento dell'indice (visibile maggiormente nel test con sonda degradata dove il numero di prove è maggiore) con il ridursi della portata d'aria, dovuto probabilmente alla riduzione del valore MEDIA PORTATA ARIA. Infatti, tale parametro, nel calcolo dell'indice, è posizionato al denominatore e causa l'evidente trend crescente dell'indice. Questa considerazione sembrerebbe suggerire che la normalizzazione, rispetto alla portata d'aria, funziona bene ai medi ed alti carichi, ma alle basse portate la correzione sembra non essere sufficiente a livellare l'indice.



Infine, si può verificare che partendo dalle stesse condizioni di portata la dispersione dell'indice risulta accettabile ai fini della diagnosi, risultato quest'ultimo di notevole importanza.

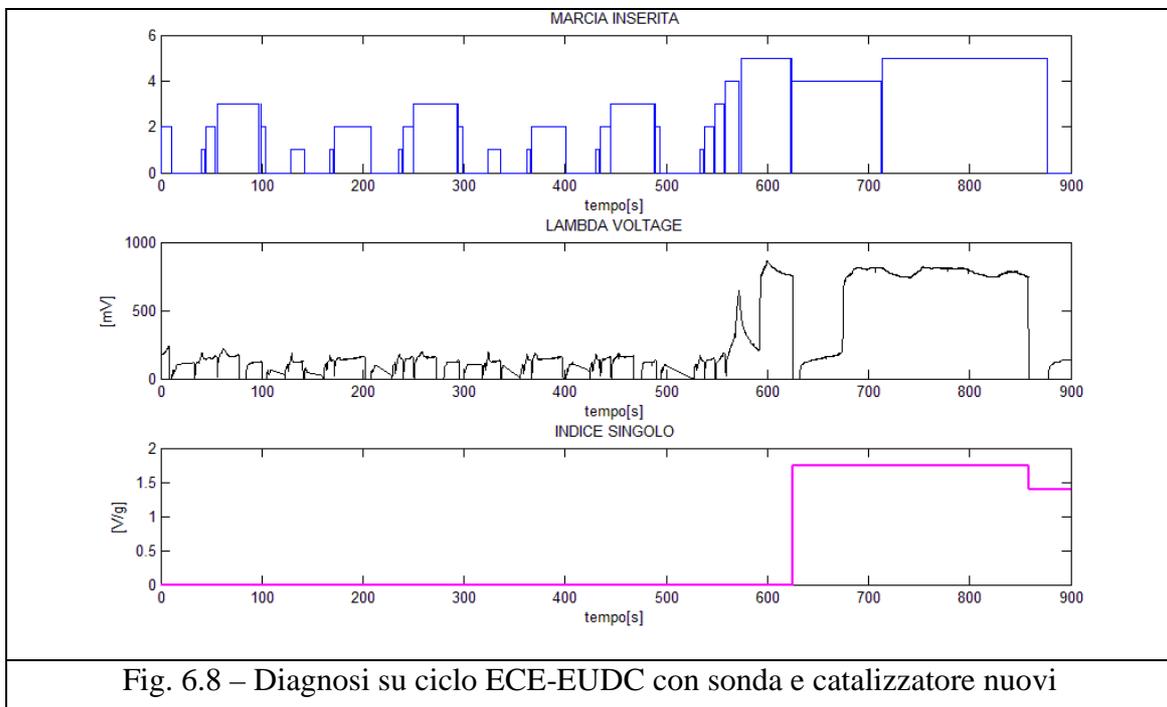
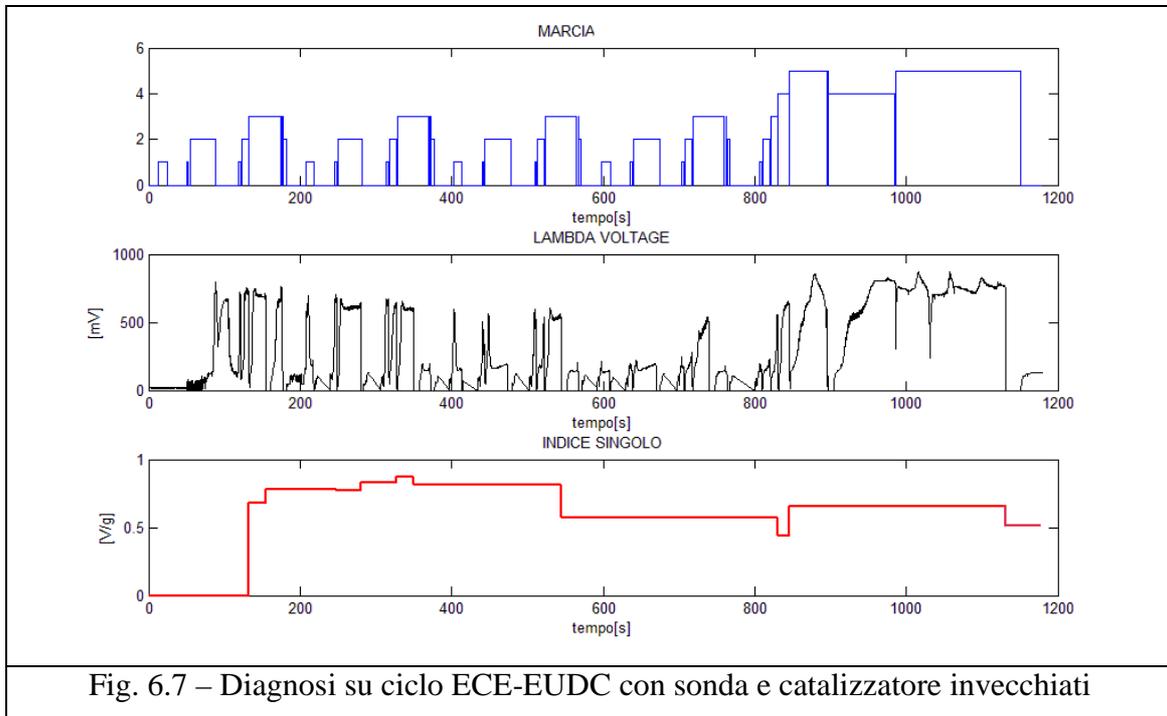
6.4 – Diagnosi sul ciclo ECE-EUDC

Di notevole interesse per un ipotetico cliente interessato all'acquisto di un modello autodiagnostico è la capacità di diagnosi sul ciclo di omologazione ECE-EUDC. A questo proposito, si è tentato di validare il modello su alcuni cicli di omologazione ottenuti con sonda e catalizzatori entrambi invecchiati ed entrambi nuovi. Nel primo caso, la diagnosi viene completata con successo in quanto viene rilevato un numero di indici (INDICE SINGOLO) sufficiente all'elaborazione di un valore medio (INDICE DIAGNOSI) identificativo dello stato del sensore (KO).

Durante i primi secondi del ciclo, che ricordiamo prevede il rilevamento delle emissioni a partire dall'avviamento, il motore non è termicamente regimato e le condizioni di abilitazione della diagnosi sono quindi dichiarate FALSE, non consentendo l'elaborazione di nessun indice.

Nel secondo caso, quello cioè di catalizzatore e sonda entrambi nuovi, le transizioni utili al calcolo dell'indice si riducono a due in quanto l'elevato potere assorbente del catalizzatore non consente la visione della transizione generata dai cut-off brevi di cambio marcia. Le uniche due transizioni visibili sono quelle generate dai cut-off attuati nel percorso extraurbano, la cui durata permette la saturazione del catalizzatore da parte dell'ossigeno e, quindi, la visione dei pacchetti d'aria agli elettrodi della sonda lambda posta a valle. Per riuscire a terminare la diagnosi anche su questo ciclo occorrerà intervenire sulla soglia NUMERO INDICE che, ricordiamo, individua un numero di indici da rilevare prima di procedere al calcolo

della media e, quindi, all'evasione del risultato della diagnosi, riducendo il suo valore per un sistema di abbattimento di emissioni nuovo.



Per ottenere questo risultato si può pensare di calibrare il parametro NUMERO INDICI in base al valore dell'OSC (indicatore del grado di invecchiamento del sistema di abbattimento), variabile attualmente stimata dalla centralina. Nello specifico otterremmo per valori:

- $OSC > OSC_{target}$ l'adozione di un NUMERO INDICI pari a 2;
- $OSC < OSC_{target}$ l'adozione di un NUMERO INDICI superiore a 2;

6.5 – Auto-calibrazione delle soglie FT ed ST

Con l'obiettivo di ridurre il lavoro dei calibratori, è stato elaborato un codice che permetta di individuare i valori di soglia FT (funzione di RATE) ed ST che producono la minor dispersione in termini di deviazione standard normalizzata rispetto al valor medio. In pratica, il codice simula le recenti acquisizioni riguardanti sonda e catalizzatori nuovi eseguite in quarta, quinta e sesta marcia al variare della portata d'aria, modificando per ogni simulazione il valore delle calibrazioni (RATE ed ST). Gli indici ricavati vengono elaborati per la generazione di Gaussiane che semplificano l'individuazione della coppia di calibrazione che meglio riduce la dispersione. Nel singolo grafico vengono paragonate le Gaussiane ottenute mantenendo fissa la soglia FT e facendo variare la soglia FT, agendo sul parametro RATE.

Si può osservare che:

- A parità di FT (RATE) la dispersione, in termini di deviazione standard normalizzata rispetto al valor medio (σ), tende a diminuire con l'abbassarsi del valore della seconda soglia. I valori più bassi vengono registrati per ST pari a 40 mV.

- A parità di ST la dispersione non sembra avere un andamento direttamente proporzionale o inversamente proporzionale al variare della FT (RATE).

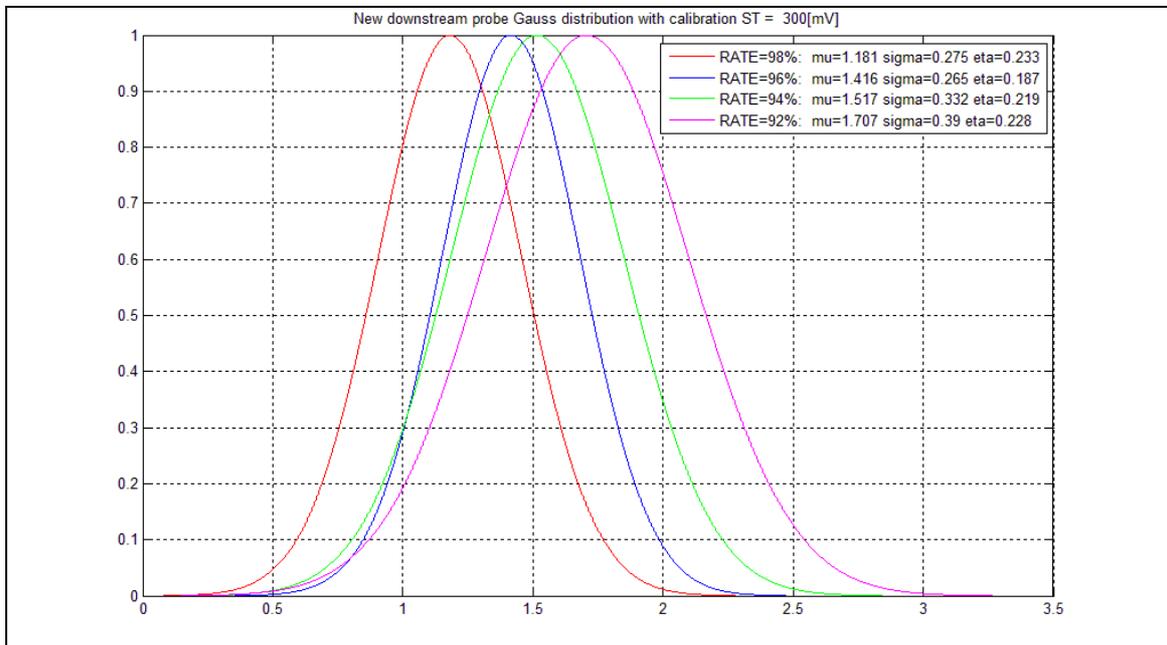


Fig. 6.9 – Gaussianhe degli indici al variare della soglia FT (RATE) ed ST = 300 mV

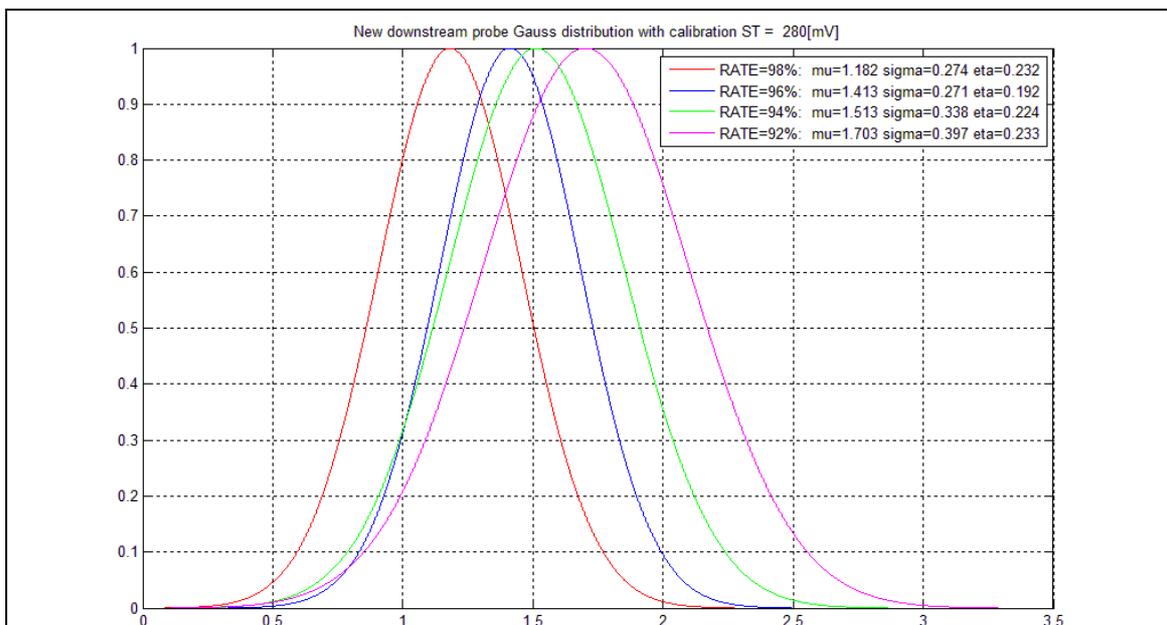


Fig. 6.10 – Gaussianhe degli indici al variare della soglia FT (RATE) ed ST = 280 mV

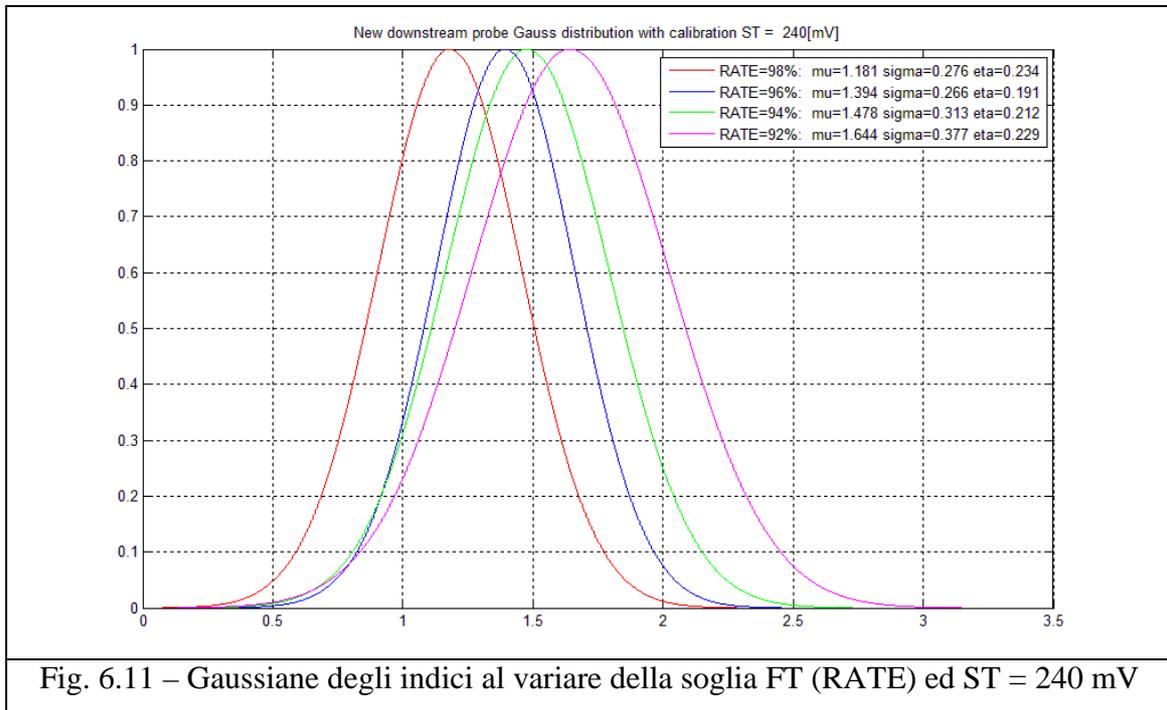


Fig. 6.11 – Gaussianhe degli indici al variare della soglia FT (RATE) ed ST = 240 mV

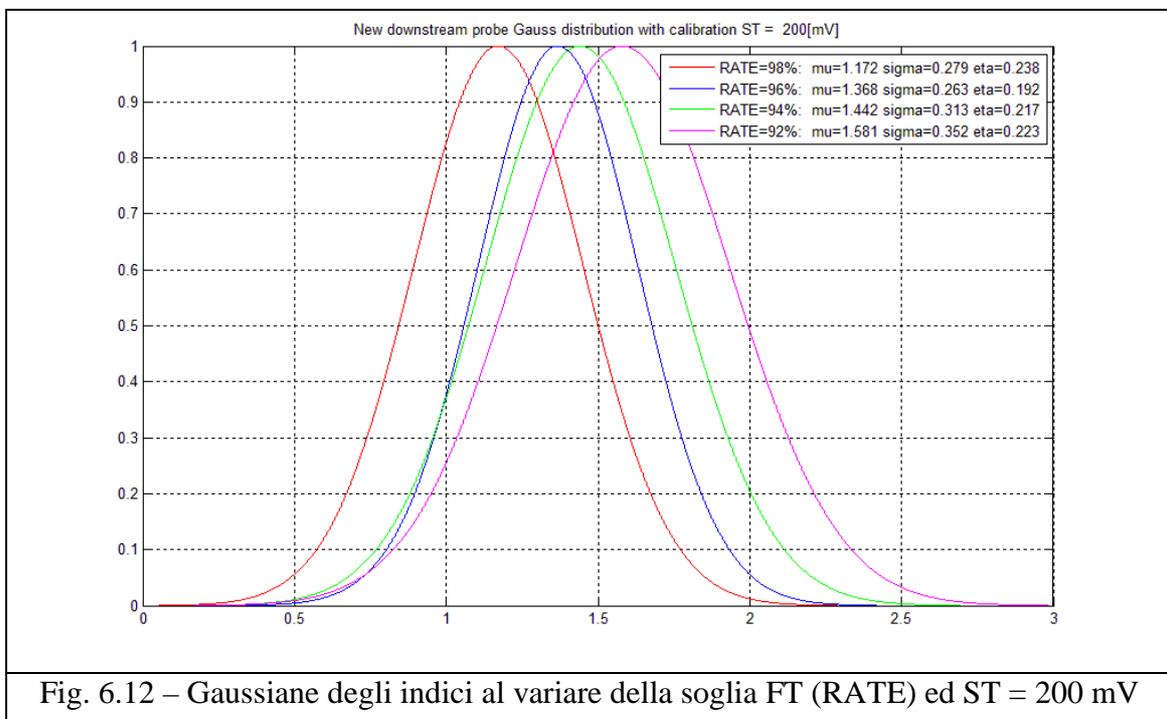


Fig. 6.12 – Gaussianhe degli indici al variare della soglia FT (RATE) ed ST = 200 mV

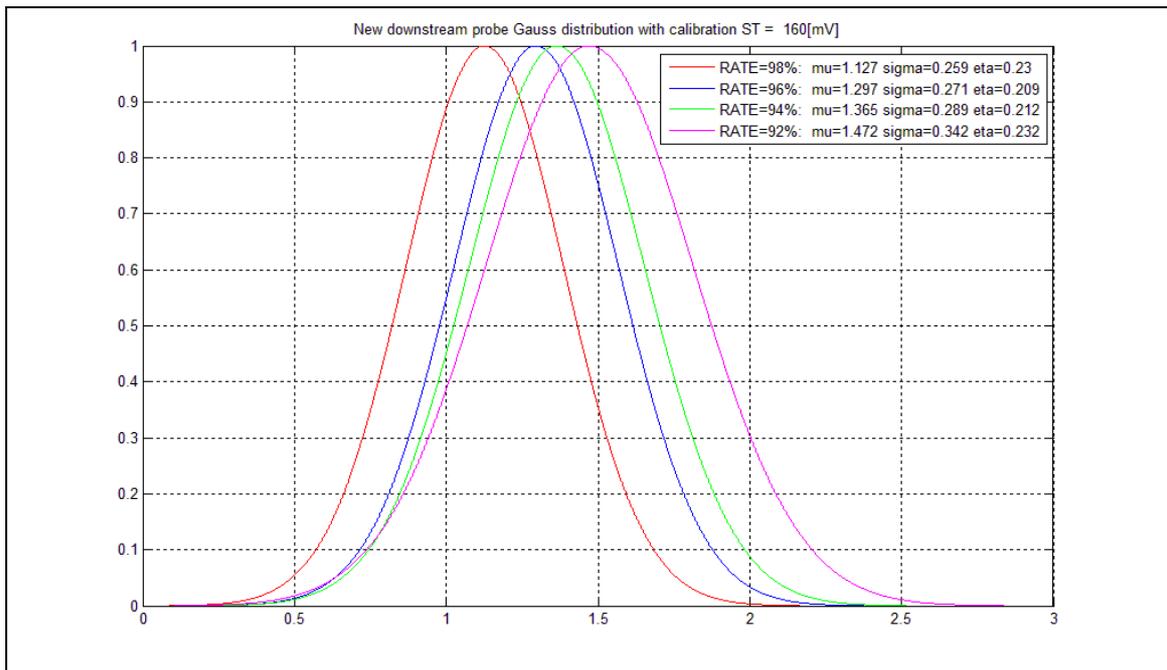


Fig. 6.13 – Gaussianhe degli indici al variare della soglia FT (RATE) ed ST = 160 mV

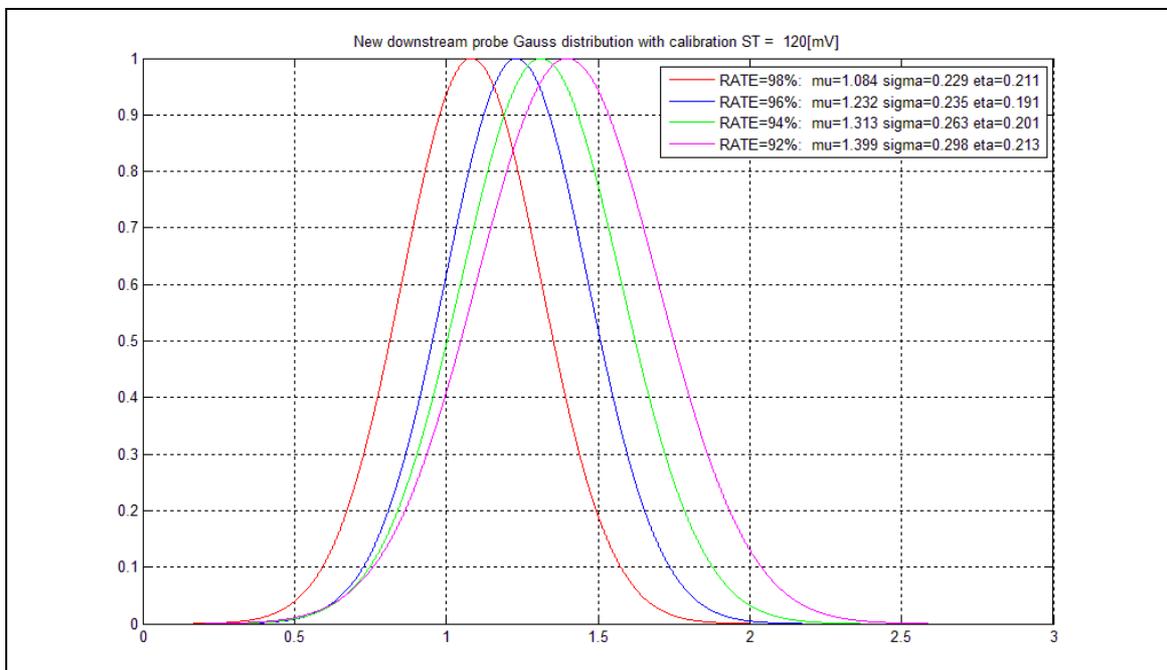


Fig. 6.14 – Gaussianhe degli indici al variare della soglia FT (RATE) ed ST = 120 mV

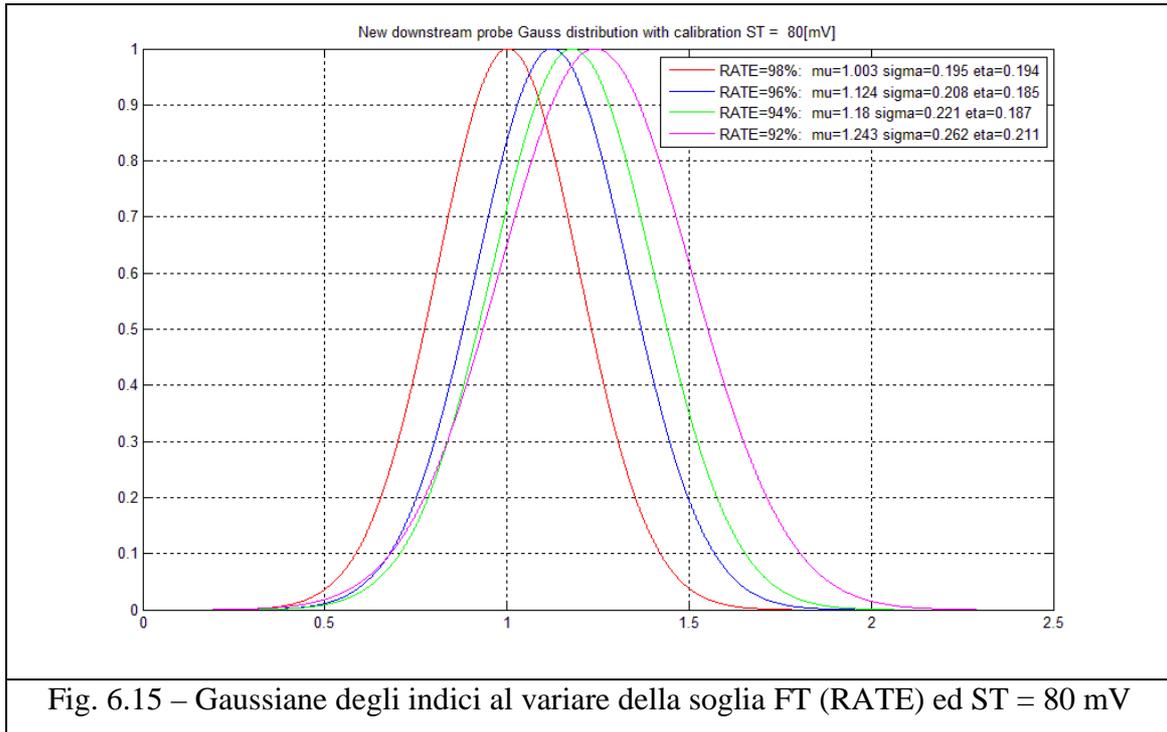


Fig. 6.15 – Gaussianne degli indici al variare della soglia FT (RATE) ed ST = 80 mV

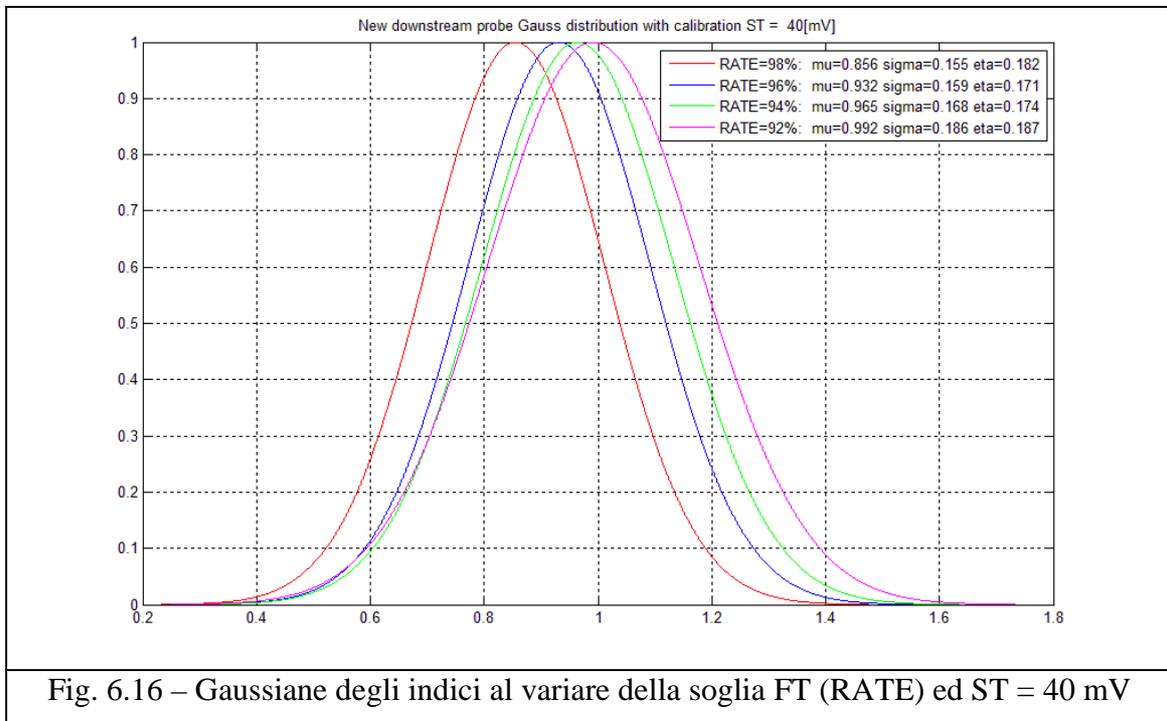


Fig. 6.16 – Gaussianne degli indici al variare della soglia FT (RATE) ed ST = 40 mV

In tutti i test si evidenzia un minimo per valori di RATE del 96 %.

In conclusione di queste analisi, effettuate su un numero considerevole di transizioni, possiamo affermare che la coppia di soglie che minimizza la dispersione dell'indice per una sonda nuova è quella composta da RATE pari a 96 % ed ST pari a 40 mV.

Queste brevi considerazioni potranno essere consegnate ai calibratori in modo da ridurre i tempi di caratterizzazione della strategia.

Conclusioni e sviluppi futuri

Lo scopo che era stato prefissato all'inizio dell'attività teorico - sperimentale, ovvero la realizzazione di un modello in grado di diagnosticare lo stato della sonda lambda posta a valle catalizzatore, può ritenersi al termine dell'attività di Tesi sufficientemente raggiunto.

In particolare, il sistema di diagnosi rileva correttamente la globalità delle transizioni utili simulate sul modello grazie alle acquisizioni a disposizione, confermando il corretto comportamento dell'algoritmo. A sostegno di ciò, è stata anche validata la possibilità di eseguire la diagnosi all'interno del ciclo di omologazione ECE – EUDC con i dovuti accorgimenti descritti in precedenza per una sonda nuova.

Inoltre, le analisi sulla dispersione proposte sembrano promettere una buona separazione dell'indice, eliminando la possibilità di incappare in falsi allarmi. A questo proposito sarebbe utile ottenere delle nuove acquisizioni, principalmente con catalizzatore e sonda invecchiati, per aumentare la popolazione degli indici da cui poter ricavare curve probabilistiche più attendibili.

Ulteriori sviluppi del presente lavoro richiederebbero in particolare di:

- 1) Completare la sezione di dialogo del modello con il controllo coppia per la correzione del tempo rilascio pedale (strategia forzata). Occorrerà, quindi, modificare l'attuale modello per l'attuazione del cut-off con l'inserimento di un flag che attivi la riduzione del tempo di rilascio pedale.
- 2) Validare il modello in vettura per controllare il corretto funzionamento dello stesso anche "on-board".

- 3) Valutare la possibilità di inserire una tabella correttiva in merito alla normalizzazione rispetto alla portata d'aria dell'indice, con lo scopo di ridurre la dispersione; questo proposito richiederà l'esecuzione di un elevato quantitativo di test in vettura da cui desumere le adeguate correzioni da applicare in base al punto motore.
- 4) Identificare un modello di correzione dell'OSC stimato laddove viene riconosciuto un invecchiamento della sonda lambda che ricordiamo concorre alla stima dell'OSC nella diagnosi catalizzatore.

Bibliografia

- [1] Legislazione Internazionale Unione Europea, “*Inquinamento atmosferico autoveicoli leggeri*”, *LI 11 – 711 1/222*, 2004

- [2] CARB, 1987 California Air Resources BOARD, <http://www.arb.ca.gov>

- [3] California’s OBD II, “*Title 13, California Code of regulation, section 1968, Malfunction and diagnostic system requirements for 2004 and subsequent model-year passenger cars, light-duty trucks, and medium-duty vehicles and engines (OBD II)*”, 2003

- [4] Enciclopedia virtuale Wikipedia

- [5] John B. Heywood – “*Internal Combustion Engine Fundamentals*”

- [6] Mario balenovic. “*Modeling and Model-Based Control of a Three-Way Catalytic Converter*” . PhD thesis, Eindhoven, Technische universiteit Eindhoven, 2002

- [7] Isao Tan, Mari Yamamoto, Koji Yamada, Hirohisa Tanaka. “*Influence of Oxygen Storage Characteristics on Automobile Emissions*”. SAE paper 1999-01-1076, 1999.

- [8] ScanTool.net LLC, <http://www.scantool.net>

- [9] Normativa UN/ECE Regulation 83

- [10] Jeffery S. Hepburn, Douglas A. Dobson, Carolyn P. Hubbard, Steven O. Guldberg, Eva Thanasiu, William L. Watkins, Beverly D. Burns, and Haren S. Gandi. “*A Review of the Dual EGO Sensor Method for OBD-II Catalyst Efficiency Monitoring*”. SAE paper 942057, 1994
- [11] Nicolò Cavina, “*Appunti del corso di Protocolli di Gestione dei Motori a Combustione Interna – M*”, 2010.
- [12] Direttiva 91/441/EEC o 93/59/EEC
- [13] Direttiva 94/12/EC o 96/69/EC
- [14] Direttiva 98/69/EC
- [15] Direttiva 98/69/EC
- [16] Direttiva 70/156/EC
- [17] Direttiva 70/156/EC
- [18] C. Buratti, E. Moretti “*Strumenti tecnologici per la riduzione delle emissioni da autoveicoli*”