

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA*

TESI DI LAUREA

In

MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA E PROPULSORI IBRIDI M

**SVILUPPO DI UN MODELLO ORIENTATO AL CONTROLLO
DI UN CATALIZZATORE TRIVALENTE PER APPLICAZIONI
GDI**

CANDIDATO

Mecheri Christopher

RELATORE

Chiar.mo Prof. Nicolò Cavina

CORRELATORI

Ing. Roberto Tonelli

Ing. Lucio Calogero

Ing. Ian Whelan

Ing. Andrea Borelli

Prof. Davide Moro

Prof. Enrico Corti

Anno Accademico 2016/2017

Sessione II

Indice

Introduzione.....	4
Capitolo 1. Il funzionamento del catalizzatore.....	5
1.1 OSC (Oxygen Storage Capacity).....	7
1.2 Reazioni chimiche globali.....	8
1.3 Misure di OSC a banco motore.....	8
1.4 Equilibrio delle reazioni del Cerio.....	10
1.5 Reazioni legate ai PGM, WGS e SR.....	11
Capitolo 2. Schema del controllo lambda.....	12
2.1 Definizione del target HEGO.....	14
2.2 Applicazione del controllo lambda su NEDC.....	16
Capitolo 3. Il modello del catalizzatore.....	19
3.1 Il ritardo di trasporto del gas nel catalizzatore.....	22
3.2 La risposta della sonda HEGO.....	23
3.3 Saturazione di ossigeno immagazzinato dal TWC.....	24
Capitolo 4. Caratterizzazione dell' oxygen storage.....	28
4.1 Pre-processing dei segnali lambda.....	32
4.2 Sweep di temperatura TWC e portata aria motore.....	35
4.3 Procedura standard di invecchiamento del catalizzatore.....	38
4.4 Modello di oxygen storage.....	39
4.5 Validazione del modello di oxygen storage.....	42

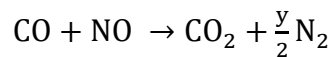
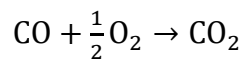
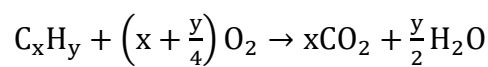
Capitolo 5. Calibrazione di f_{lean} e f_{rich}	47
5.1 Modello simulink per le calibrazioni di f_{lean} e f_{rich}	48
5.1.1 f_{lean} e f_{rich} per un catalizzatore fresh.....	53
5.1.2 f_{lean} e f_{rich} per un catalizzatore aged.....	59
Capitolo 6. Conclusioni e sviluppi futuri.....	63
6.1 Inversione del modello del catalizzatore.....	67
6.2 Sviluppo di una strategia di controllo lambda predittiva.....	73
6.3 Sviluppo di un modello per i layout a cascata.....	75
Bibliografia.....	76

Introduzione

Questo elaborato di tesi è stato svolto all'interno dell'azienda Ferrari S.p.A. in particolare nel gruppo Emissioni della divisione Meccanica Calda. I sempre più stringenti vincoli normativi riguardanti le emissioni, richiedono lo sviluppo di modelli in grado stimare on-board le emissioni engine-out e le emissioni a valle del catalizzatore. Per modellare la chimica di un catalizzatore, descritta nel primo capitolo, è richiesto un elevato sforzo computazionale e questo va in contrapposizione con la necessità di poter elaborare il modello in real-time, per finalità controllistiche. Nel secondo capitolo si è approfondita la parte riguardante il controllo lambda implementato attualmente in centralina, focalizzandosi soprattutto sul closed-loop relativo alla sonda ON-OFF valle catalizzatore. Il passo successivo è stato quello di concentrarsi sulle variabili che maggiormente influenzano la dinamica del catalizzatore, arrivando a definire un modello *oxygen storage dominated* nel terzo capitolo. Con questa tipologia di modellazione semplificata il catalizzatore viene descritto come un serbatoio di ossigeno con una sua dinamica di riempimento e svuotamento. La capacità massima di stoccaggio dell'ossigeno da parte del catalizzatore viene modellata nel quarto capitolo con un modello map-based. La calibrazione del modello è stata effettuata su misure di lambda anteriore e posteriore nei test di OSC, con i risultati riportati nel quinto capitolo. Nel capitolo conclusivo si sono affrontate le possibili applicazioni su cui il modello potrebbe lavorare, ovvero l'implementazione di una strategia di controllo lambda predittiva per i progetti con singolo brick e la modellazione del titolo a valle del GPF nei progetti con layout a cascata.

Capitolo 1. Il funzionamento del catalizzatore

Considerando una miscela aria-combustibile stechiometrica e una combustione ideale, il motore genera allo scarico unicamente N_2 , CO_2 , e H_2O . In una combustione reale, i gas uscenti dai cilindri non hanno raggiunto l'equilibrio chimico e questo porta alla formazione di inquinanti come HC, CO. Ad oggi il sistema di post trattamento più comune per i motori ad accensione comandata è il TWC (three-way catalytic converter), il quale deve il suo nome alla capacità simultanea di far avvenire le seguenti tre reazioni chimiche:



La capacità di ossidare HC e CO e di ridurre gli NO_x dipende fortemente dal valore di λ che viene definito nel seguente modo:

$$\lambda = \frac{AFR_{act}}{AFR_{stechio}}$$

In una miscela stechiometrica il valore di λ è unitario. Una miscela magra (λ maggiore di uno) si genera da un eccesso di O_2 , mentre in una miscela ricca il valore di λ risulta essere minore di uno a causa dell'eccesso di CO, HC e H_2 . Per poter ossidare CO e HC nel catalizzatore è necessario attuare una strategia che porti il valore di λ a monte del catalizzatore leggermente magro. In queste condizioni la reazione di riduzione degli NO_x è sfavorita, in quanto essa presenta la massima efficienza solo in assenza di ossigeno. Per poter dunque ottenere un valore massimo di efficienza di abbattimento per le tre specie chimiche in esame occorre modulare il valore di λ attorno ad uno. In *Figura 1.1* un esempio di efficienza di abbattimento di HC, CO ed NO_x al variare del titolo. La struttura del TWC presenta un monolita (cordierite o metallo) in cui viene depositato il washcoat. Il washcoat è uno strato di ossido ceramico, principalmente allumina con una certa percentuale di cerio aggiunto. Il Cerio viene utilizzato grazie alla sua stabilità termica e chimica, alla sua reversibilità all'avvelenamento da zolfo e alla sua rapida cinetica di intrappolamento e rilascio di ossigeno. Il washcoat è molto poroso in modo tale da aumentare la superficie attiva di contatto tra la fase gas e il catalizzatore.

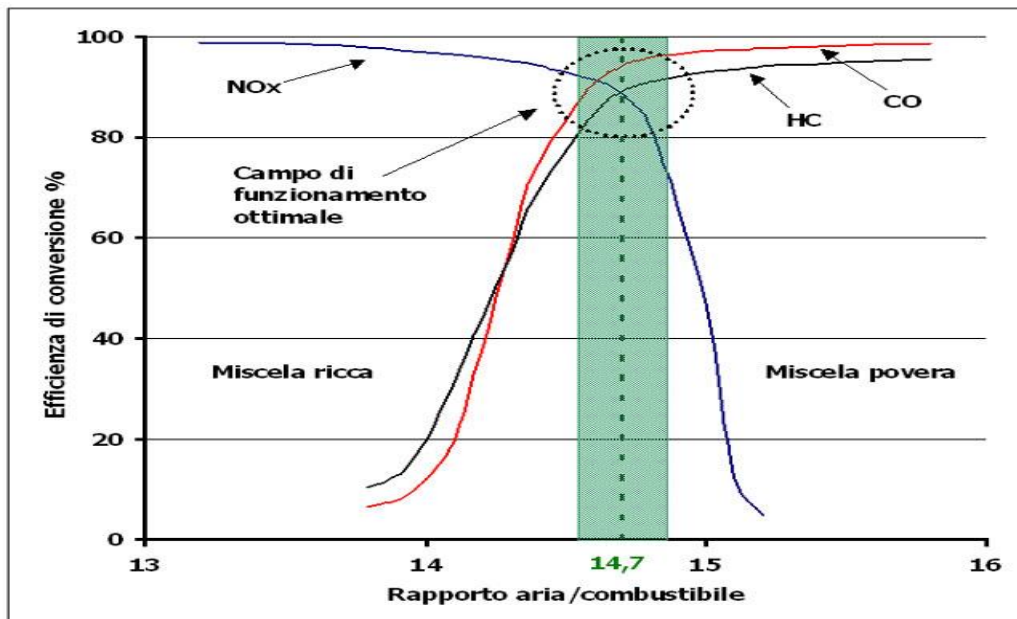


Figura 1.1 – Efficienza di conversione HC, CO, NOx al variare del titolo

Nel washcoat inoltre vengono depositati i metalli nobili quali platino, palladio e rodio che favoriscono le reazioni di catalisi. L'esatta composizione e struttura di un convertitore catalitico è di solito un segreto ben custodito dal produttore. In *Figura 1.2* viene riportato un esempio semplificato.

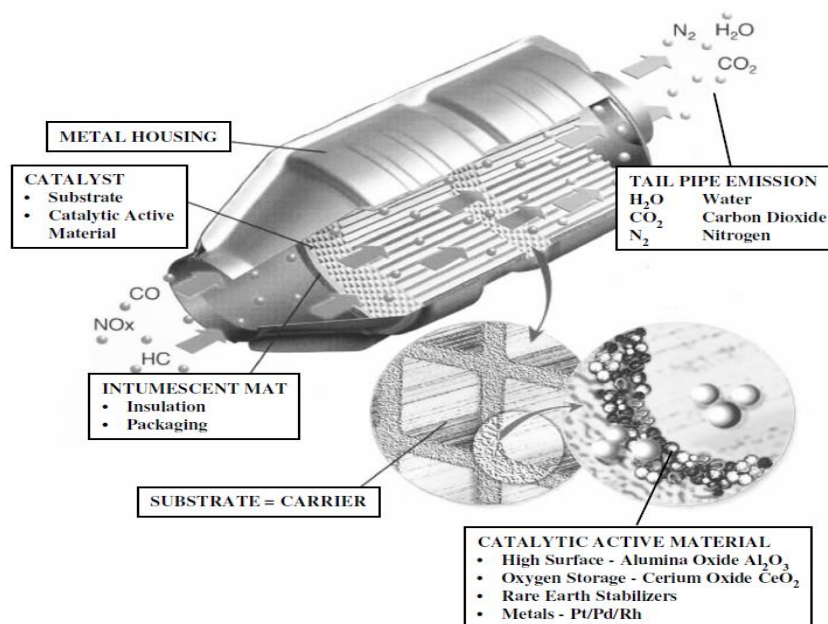


Figura 1.2 – Struttura semplificata di un TWC

1.1 OSC (Oxygen Storage Capacity)

Il Cerio viene depositato nel washcoat sotto forma di ossido di cerio CeO₂ insieme ad una certa percentuale di ossido di zirconio ZrO₂. L'aggiunta di zirconio migliora le performance del catalizzatore aumentando la resistenza dei materiali alla sinterizzazione (promuovendo la stabilità termica) e inoltre aumenta la capacità di immagazzinamento dell'ossigeno da parte del CeO₂. Tipicamente il 20-50% in peso della miscela di ossidi (CeZrO_x) è costituito da CeO₂, la restante parte è ZrO₂ e qualche dopante addizionale. Il CeZrO_x possiede differenti caratteristiche fra cui:

- Migliorare la dispersione dei metalli nobili
- Promuovere le reazioni di water gas shift (WGS) e steam reforming
- Intrappolare e rilasciare ossigeno a fronte di condizioni rispettivamente di miscela magra e ricca.

Il Cerio presenta due stati di ossidazione stabili, il +4 e il +3, e la relativa facilità di switching fra questi due stati è il fattore essenziale che determina l'attività catalitica. (Figura 1.3).

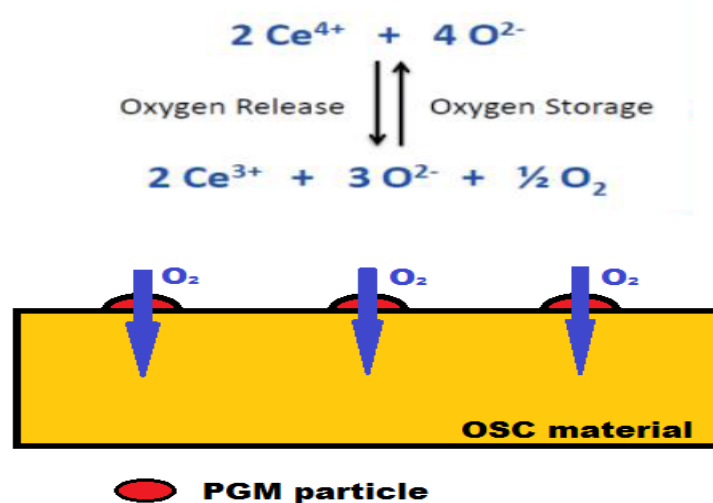
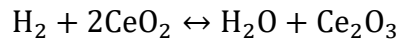


Figura 1.3 – Meccanismo di intrappolamento e rilascio ossigeno

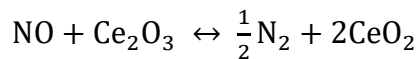
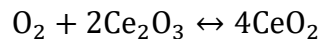
Il rapido cambiamento dello stato di ossidazione è legato alla capacità di immagazzinare e rilasciare ossigeno, una proprietà misurata con l'OSC (Oxygen Storage Capacity). Al massimo un atomo di ossigeno viene rilasciato per ogni due atomi di Cerio; tuttavia l'atomo di ossigeno deve combinarsi con un altro atomo di ossigeno prima di poter essere rilasciato nella fase gas. Questo processo avviene ad opera dei PGM (Platinum Group Metals). Un catalizzatore senza PGM presenta un OSC non misurabile, anche se "fresh".

1.2 Reazioni chimiche globali

Durante le perturbazioni di lambda da uno ad una miscela ricca ($\lambda < 1$), si ha un aumento delle emissioni di CO, HC ed H₂ a causa della mancanza di specie ossidanti. Allo stesso modo, durante le escursioni verso il magro ($\lambda > 1$), la mancanza di un ambiente riducente provoca un aumento delle emissioni di NO_x. Grazie alla presenza di CeZrO_x, il TWC riesce a compensare temporaneamente lo squilibrio di ossidanti o riducenti, in quanto è in grado di intrappolare o rilasciare ossigeno in quantità adeguate ed in tempi sufficientemente rapidi. Quindi l'efficienza di conversione del TWC dipende fortemente dall'OSC, dalla cinetica con cui avviene il rilascio e l'intrappolamento di ossigeno e dallo stato di ossidazione del materiale. Durante un transitorio ricco di lambda, il Cerio può reagire con HC, CO, H₂ presenti nei gas di scarico, rilasciando ossigeno:



Durante una transizione in magro della miscela, il Cerio può rimuovere ossigeno e l'ossido di azoto dai gas di scarico grazie alle seguenti reazioni:



Quando il TWC è esposto a condizioni dinamiche di lambda, mostra una serie di fenomeni che possono essere spiegati solo se le reazioni appena descritte raggiungono un equilibrio (presenza anche della reazione inversa). Per capire meglio questo aspetto andiamo ad analizzare come vengono effettuate le misure di OSC a banco motore.

1.3 Misure di OSC a banco motore

Un test di OSC in generale rappresenta una misura della cinetica di intrappolamento e rilascio di ossigeno da parte del catalizzatore. Prima di poter misurare la capacità di intrappolare ossigeno del convertitore catalitico occorre "svuotarlo". Questo viene eseguito attraverso un transitorio in ricco, per un tempo calibrato. Infatti per quanto descritto in precedenza, un catalizzatore si può considerare vuoto di ossigeno quando la sonda posteriore misura un valore di lambda (UEGO) o un valore di tensione (HEGO) ricco, indice del fatto che la miscela ricca in ingresso al TWC non viene più ossidata dall'ossigeno contenuto nel catalizzatore stesso. Successivamente, viene

imposta una transizione rich-to-lean, in cui si può osservare l'aspetto decisivo alla misura del oxygen storage capacity, ovvero la presenza di una miscela ricca misurata a valle del catalizzatore nonostante in ingresso si abbia una composizione magra dei gas di scarico. La misura di OSC si conclude nel momento in cui a valle del catalizzatore viene registrata una miscela magra (tensione della sonda HEGO inferiore ai 450mV) *Figura 1.4.*

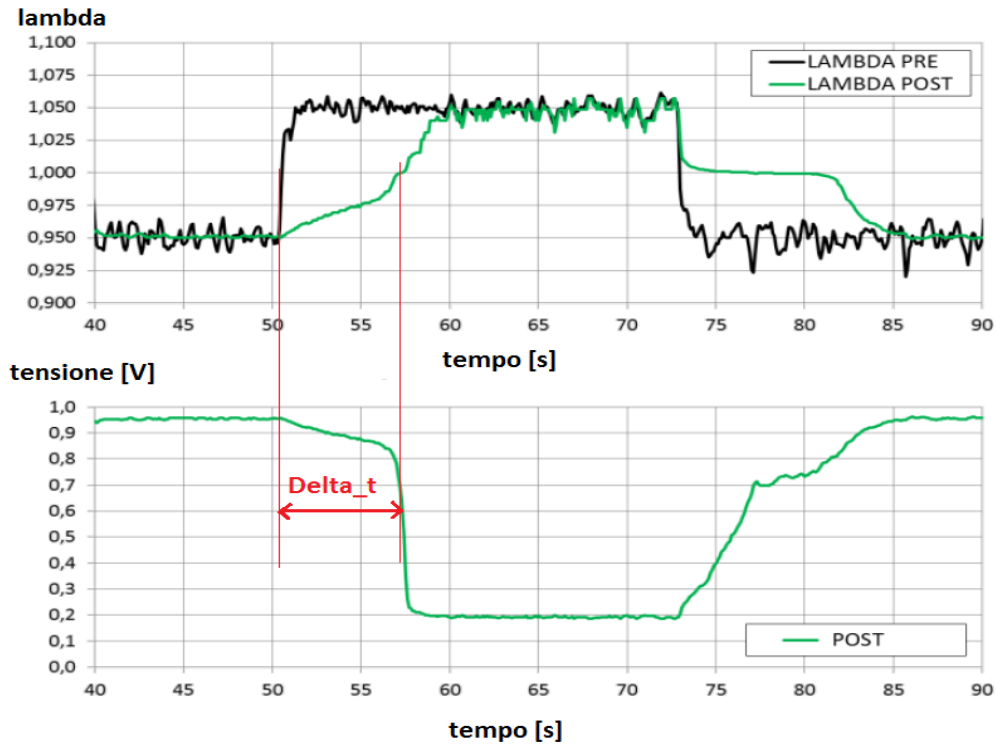


Figura 1.4 – Procedura per la misura di OSC

L'equazione che viene implementata è la seguente:

$$OSC = \dot{m}_{aria} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda} \cdot \Delta t \cdot 63.89$$

In cui:

- L' OSC è in mg
- \dot{m}_{aria} è la portata di aria entrante nel sistema in kg/h
- Delta_t rappresenta il tempo che intercorre dalla lettura della sonda anteriore di un $\lambda > 1$ e la consecutiva lettura di un valore di tensione della sonda posteriore di una miscela magra (circa 450mV).
- 63.89 contiene il fattore di conversione da kg/h a mg/s e la percentuale in massa dell'ossigeno contenuto nell'aria (0.23%).

1.4 Equilibrio delle reazioni del Cerio

I fenomeni che coinvolgono il TWC possono essere spiegati solamente se le reazioni che avvengono nel washcoat presentano una condizione di equilibrio infatti da prove sperimentali si evidenzia in *Figura 1.5* che:

- L'OSC misurato in presenza di H_2O e CO_2 è inferiore. Questo è legato all'ossidazione del Cerio ad opera di H_2O e CO_2
- L'OSC misurato dipende dalla concentrazione di CO e H_2
- Quando il catalizzatore è sottoposto ad uno step di lambda pre-catalizzatore rich-lean, la lambda in uscita dal catalizzatore rimane in una condizione di ricco per un certo tempo dopo la transizione in magro della lambda monte catalizzatore. Questo implica che il catalizzatore sta emettendo CO e H_2 quando si ha in ingresso solo H_2O e CO_2 .
- Quando il TWC sta operando in condizioni oscillanti di lambda attorno ad un target leggermente ricco, esse vengono filtrate dall'oxygen storage e non vengono più rilevate dalla sonda posteriore.

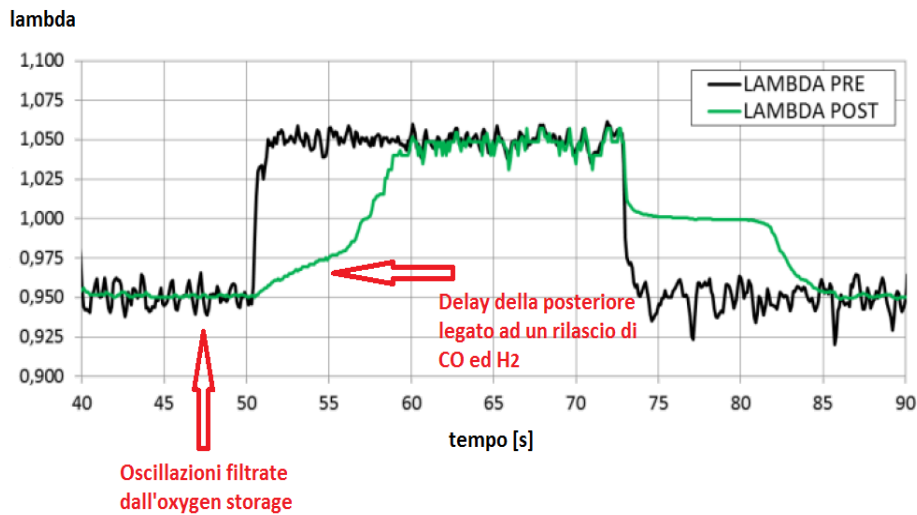
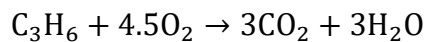
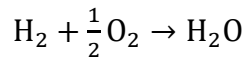
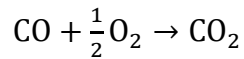


Figura 1.5 – Fenomeni legati all'equilibrio delle reazioni del Cerio

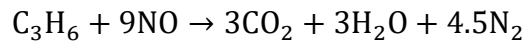
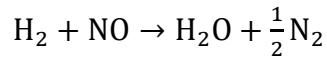
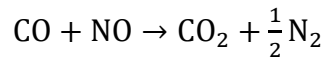
1.5 Reazioni legate ai PGM, WGS e SR

La presenza dei metalli nobili, come evidenziato nella sezione 1.1, favorisce le reazioni di ossido-riduzione che contraddistinguono un TWC. In particolare possiamo suddividere le reazioni legate ai PGM in due gruppi:

- Ossidazione

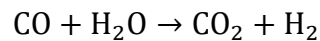


- Riduzione

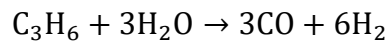


Le efficienze di conversione del CO e dell'HC del catalizzatore rimangono particolarmente elevate in condizioni di miscela ricca grazie alle reazioni di water gas shift (WGS) e steam reforming (SR), le quali avvengono a temperature elevate.

- WGS



- SR



Capitolo 2. Schema del controllo Lambda

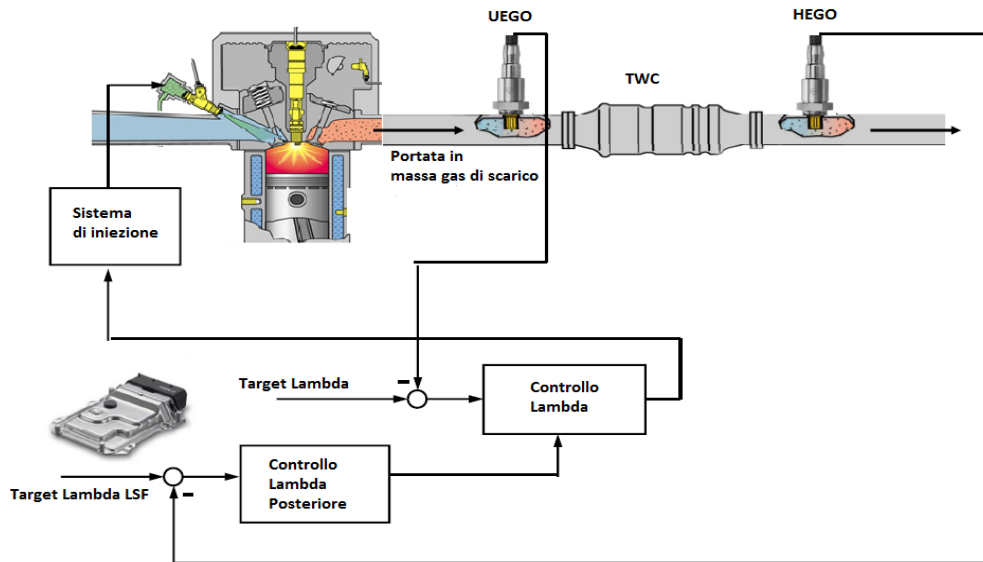


Figura 2.1– Schema semplificato del controllo Lambda

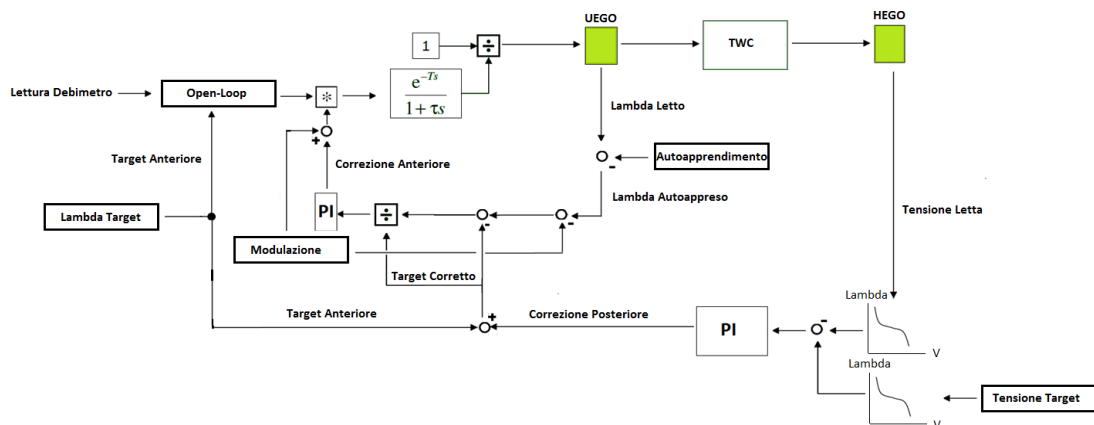
Nella ECU (Engine Control Unit) è presente una sezione dedicata al controllo del titolo. Tipicamente il valore target della Lambda in camera di combustione e in ingresso al catalizzatore è unitario in modo tale da ottenere una combustione stechiometrica e massimizzare l'efficienza del catalizzatore. In realtà esiste una serie di mappe di Lambda target funzione di giri motore e carico che tengono in considerazione i seguenti aspetti:

- Protezione componenti allo scarico (turbina, TWC)
- Protezione dalla detonazione
- Condizioni di Tip-In
- Diagnosi
- Spurgo catalizzatore

La Motronic (centralina controllo motore) misura un valore di portata in massa di aria dal debimetro attraverso la quale è possibile calcolare la portata di combustibile che deve essere iniettata istante per istante al fine di soddisfare il target di lambda:

$$m_{\text{fuel}} = \frac{\dot{m}_{\text{aria}}}{\lambda_{\text{target}} \cdot \text{AFR}_{\text{stechio}}}$$

La richiesta viene inviata al sistema di iniezione, il quale attraverso la caratteristica dell'iniettore calcola un tempo di iniezione. Se l'iniettore fosse ideale e non ci fossero errori di misura o calcolo il controllore del titolo sarebbe in grado di soddisfare il target in open-loop iniettando ad ogni step di calcolo esattamente la quantità di combustibile necessaria. Questo ovviamente non accade con un sistema reale e da qui la necessità di un controllo in closed-loop con una sonda in grado di misurare il valore di Lambda. Tipicamente viene montata una sonda UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen) a monte del catalizzatore, in modo tale da fornire un feedback al controllore del titolo. L'informazione che viene letta dalla sonda è in ritardo rispetto al valore di titolo presente in camera in quanto teoricamente la miscela in un motore GDI (Gasoline Direct Injection) viene a formarsi durante la fase di aspirazione e compressione, per cui prima di ottenere un feedback occorre attendere le fasi di espansione, scarico e tutto il tempo di trasporto fra la sezione uscita teste e la sezione in cui è posizionata la sonda. Per evitare instabilità nel sistema, in genere l'errore rispetto al target viene elaborato da un PI (Proporzionale, Integrale) e non da un PID (Proporzionale, Integrale, Derivativo). Un controllo base di questo tipo utilizza la sonda posteriore solo in fase di diagnosi, monitorando il degrado del catalizzatore attraverso il calcolo dell'OSC. Un controllore più evoluto è mostrato in *Figura 2.1*, in cui la sonda posteriore HEGO (Heated Exhaust Gas Oxygen) viene utilizzata in maniera attiva generando un feedback anche del titolo a valle del catalizzatore. L'idea è quella di correggere il target dato alla sonda anteriore in modo tale da soddisfare un obiettivo di tensione letto a valle del catalizzatore. Lo scopo è quello di massimizzare l'efficienza di abbattimento del catalizzatore, la quale varia in maniera sensibile in funzione della tensione misurata dalla sonda posteriore.



. Figura 2.2– Schema di gestione del titolo nella ECU

In *Figura 2.2* viene illustrato uno schema più dettagliato del controllo Lambda. Per aumentare le performance del TWC viene introdotta una modulazione che si va a sovrapporre alla correzione applicata all'open-loop. Essa viene poi sottratta al segnale letto dalla sonda anteriore in modo tale da non interferire con il controller primario. Il segnale grezzo letto dalla UEGO viene inoltre corretto da un autoapprendimento che si attiva in determinate condizioni di funzionamento del motore, dove viene rilevata per un certo periodo una correzione costante derivante della posteriore la quale viene auto appresa dal sistema. Il feedback della HEGO viene confrontato con una tensione target, generando un errore di Lambda posteriore grazie alla curva caratteristica del sensore, mostrata in *Figura 2.3*.

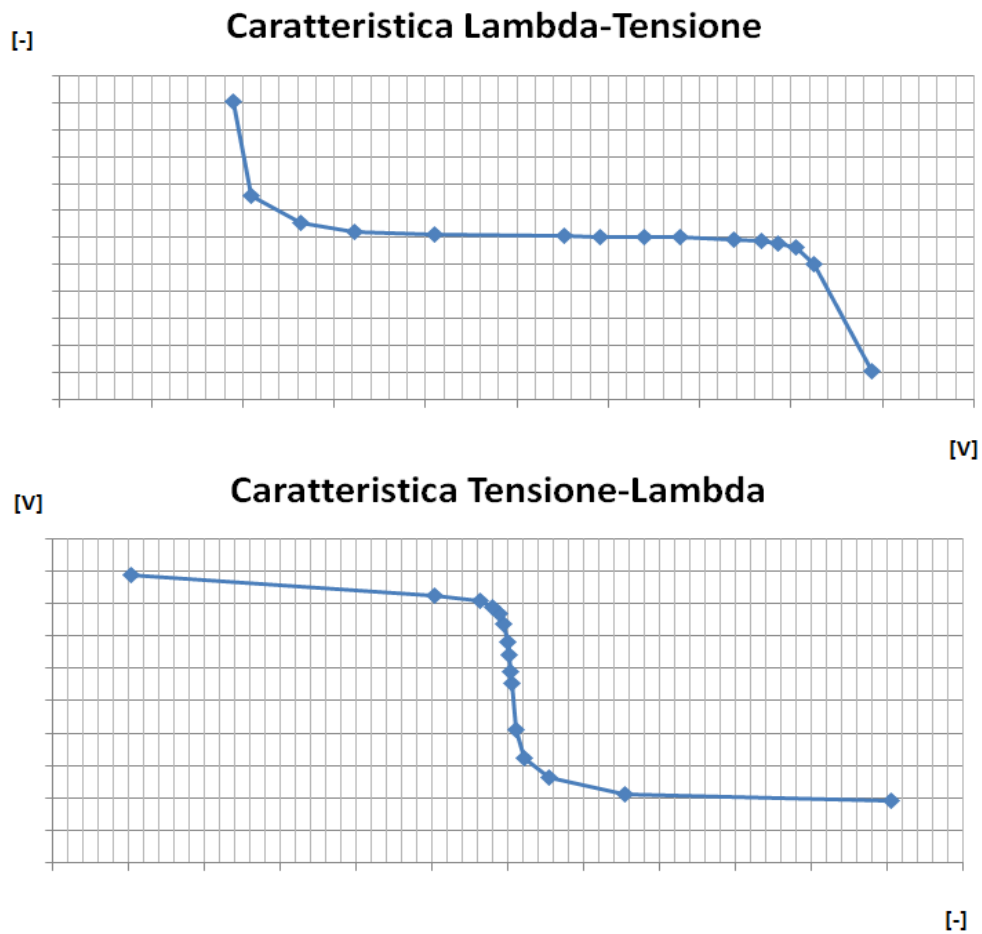


Figura 2.3– Caratteristica della sonda HEGO

2.1 Definizione del target della HEGO

La tensione obiettivo che la sonda posteriore deve inseguire deriva da un'attività eseguita a banco motore in cui si cerca di trovare una correlazione fra tensione posteriore letta dalla sonda e efficienza di abbattimento delle tre specie chimiche HC,

CO, NOx. La vettura viene portata ad una velocità costante al fine di ottenere una condizione di funzionamento stabile, vengono eseguiti dei prelievi di emissioni monte e valle catalizzatore in modo tale da poter calcolare l'efficienza di conversione della specie i-esima. Attraverso una mappa calibrata in open loop si riesce ad ottenere il controllo della tensione obiettivo della sonda posteriore per cui vengono eseguiti due sweep di tensione posteriore partendo da una condizione di magro andando progressivamente ad arricchire e viceversa. In questo modo si riesce ad avere un quadro di come varia l'efficienza in funzione della tensione letta dalla sonda posteriore sia in una condizione lean-to-rich che rich-to-lean. In *Figura 2.4 e 2.5* un esempio.

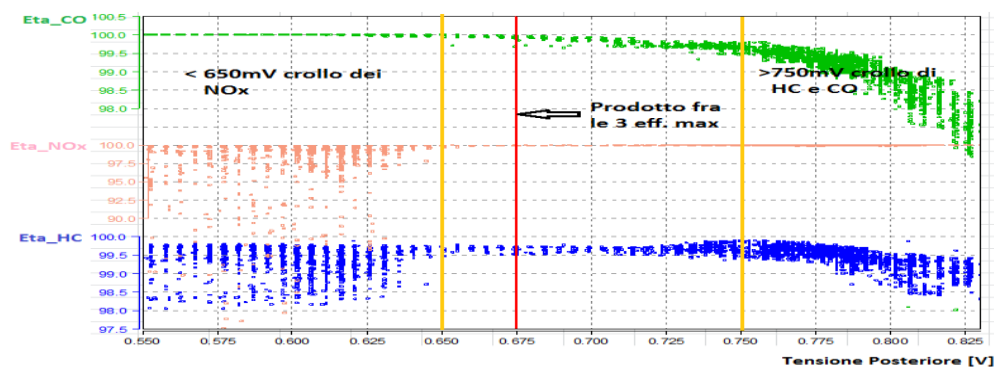


Figura 2.4– Sweep tensione posteriore lean-to-rich

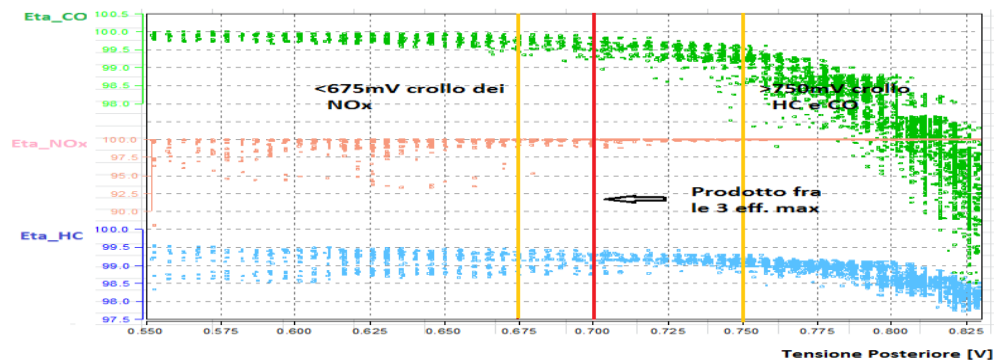


Figura 2.5– Sweep tensione posteriore rich-to-lean

In entrambe le prove effettuate l'efficienza degli HC e dei CO crolla ad una tensione maggiore dei 750mV ($\lambda=0.9992$). Nella prova lean-to-rich il crollo degli NOx si ha per una tensione inferiore ai 650mV ($\lambda=1.002$), mentre per la spazzolata rich-to-lean il crollo avviene ad una tensione inferiore ai 675mV ($\lambda=1.00002$). Un altro aspetto interessante è la dispersione dei risultati in termini di efficienza di

conversione fuori dalla banda di tensione in cui si hanno le massime efficienze. Un possibile criterio per definire un unico target di tensione posteriore è quello di ricercare il punto in cui viene massimizzato il prodotto delle tre efficienze.

2.2 Applicazione del controllo lambda su ciclo NEDC

Definito il target che la sonda posteriore deve inseguire, andiamo a verificare il comportamento del controllore su ciclo NEDC, *Figura 2.6 e 2.7*.

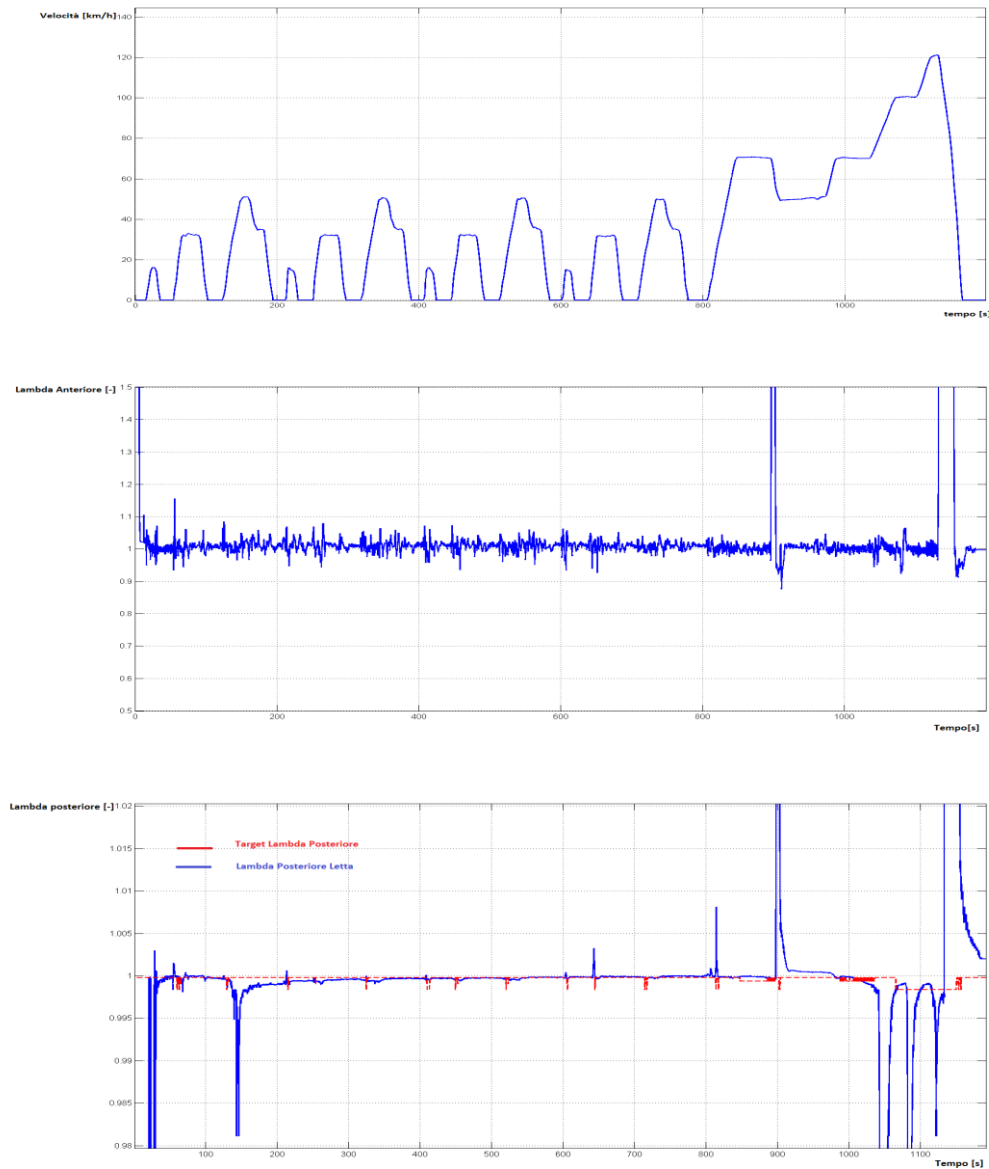


Figura 2.6– Lambda anteriore e posteriore su ciclo NEDC

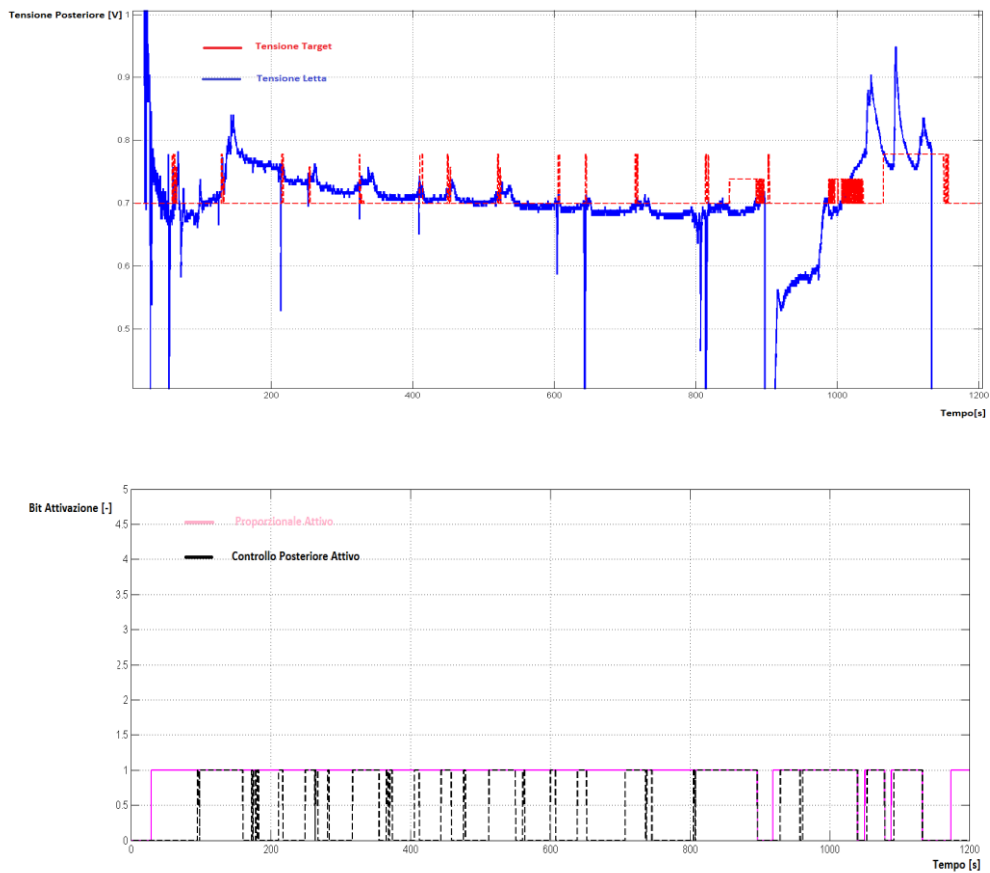


Figura 2.7– Tensione e Bit Attivazione controllo posteriore

Il segnale misurato dalla sonda monte catalizzatore oscilla attorno al valore unitario, coerentemente con l'obiettivo derivante dalla mappa di lambda target. L'aspetto su cui ci focalizziamo è il comportamento della sonda posteriore, il quale mostra sia in termini di tensione che di lambda ricalcolata un comportamento che si discosta in maniera rilevante dal target in punti in cui il controllo posteriore è attivo ed invia un feedback di correzione alla anteriore. Analizzando nel dettaglio il ciclo, durante i primi secondi il segnale letto dalle due sonde non deve essere preso in considerazione in quanto esse sono ancora spente per cui generano come output il fondo scala del sensore. Successivamente però intorno nel range compreso fra i 150 secondi e 200 secondi il controllore è attivo (anche il proporzionale) ma la sonda risulta essere fuori target, in particolare legge un valore di lambda più ricco rispetto al target. Analogamente intorno al secondo 820 il controllore della posteriore è acceso ma inizialmente la sonda si discosta dal target, questa volta con un valore più magro rispetto al target. Successivamente la HEGO riesce a riportarsi sul target fino

al raggiungimento del cut-off. Una prima ipotesi potrebbe essere la non corretta calibrazione dei guadagni del PI della posteriore, ma in realtà in alcuni punti del ciclo la sonda riesce ad inseguire il target. Ripercorrendo lo schema di gestione del titolo, si nota come il titolo letto dalla sonda posteriore sia influenzato dalla dinamica del catalizzatore, il quale si presenta come un oggetto “black box”.

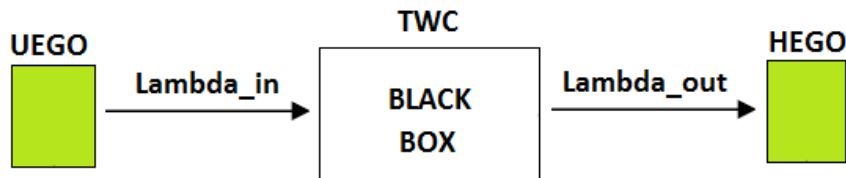


Figura 2.8– TWC modello black box

Teoricamente conoscendo la dinamica del catalizzatore, si riuscirebbe ad ottimizzare il controllo posteriore agendo in maniera predittiva sulla correzione da attuare al target della sonda anteriore. Il mancato inseguimento del target da parte della HEGO sembra essere legato ad un momentaneo riempimento o svuotamento di ossigeno da parte del TWC provocando instabilità nel controllo. In effetti un catalizzatore che si trova quasi completamente vuoto di ossigeno ha maggiori difficoltà ad ossidare le specie chimiche quali HC e CO, le quali influenzano il titolo della miscela a valle del catalizzatore, provocando instabilità nel controllo. Allo stesso modo un catalizzatore quasi completamente pieno di ossigeno, genera instabilità nel controllo in quanto la probabilità che l'ossigeno attraversi il catalizzatore senza essere intrappolato dal Cerio aumenta. Dal punto di vista chimico la dinamica del catalizzatore è influenzata da centinaia di reazioni, le quali sono state riassunte in reazioni cosiddette globali nel primo capitolo. L'obiettivo di questo elaborato è quello di realizzare un modello del catalizzatore a scatola grigia, in cui si cercherà di catturare la variabile che domina la dinamica di funzionamento del catalizzatore. Il motivo principale è legato al costo computazionale che un modello chimico richiede, in quanto esso dovrà poi essere inserito in centralina e generare un output ad ogni step di calcolo. Il modello a scatola grigia consentirà di modificare il controllo attuale della lambda, forzando una dinamica del catalizzatore tale da migliorare l'attuale controllo posteriore.

Capitolo 3. Il modello del catalizzatore

In generale esistono diversi approcci per studiare la dinamica del catalizzatore, i quali possono essere suddivisi in tre gruppi di modelli:

- Modelli fisico-chimici
- Modelli fisico-chimici semplificati
- Modelli oxygen storage dominated

I *modelli fisico-chimici* vengono utilizzati di solito durante la progettazione di un catalizzatore. Essi sono basati sulle equazioni della fluidodinamica, del trasferimento di massa, calore e della cinetica chimica. Le reazioni chimiche vengono modellate in dettaglio tenendo in considerazione una struttura tridimensionale del singolo canale del monolita. Il limite di questi modelli è la complessità e il grande sforzo computazionale che essi richiedono nel risolvere sistemi di equazioni differenziali. Nei *modelli fisico-chimici semplificati* vengono ridotte le specie chimiche coinvolte nelle reazioni, introducendo reazioni chimiche globali che escludono tutte le reazioni intermedie che portano alla formazione dei prodotti partendo dai reagenti. Anche i bilanci di massa ed energia vengono semplificati considerando un singolo canale modellato in una dimensione in cui esiste solo una fase gas ed una fase solida. Tipicamente viene trascurata la diffusione radiale delle specie rispetto a quella assiale, riducendo così il numero di equazioni del sistema. Come per i modelli fisico-chimici gli input sono le specie chimiche engine out che non possono essere misurati direttamente dai sensori standard presenti in vettura, ma possono essere soltanto stimati con modelli “map based” che introducono ulteriore incertezza negli output del catalizzatore. I modelli *oxygen storage dominated* descrivono il catalizzatore come un “serbatoio” in grado di immagazzinare e rilasciare ossigeno con una dinamica dominante nel comportamento del TWC. Gli input del modello sono tipicamente il valore di lambda monte catalizzatore e la portata aria misurata dal debimetro. Questi modelli sono caratterizzati dalla loro bassa complessità e la possibilità di descrivere il catalizzatore con un’unica variabile di stato ovvero il ROC

(Relative Oxygen Capacity). Il modello di partenza a cui facciamo riferimento è il *modello di Brandt* (rif. [2]), il quale si basa su un bilancio di massa di ossigeno nel catalizzatore. La portata entrante ed uscente di ossigeno (o meglio dell'eccesso di ossigeno) possono essere calcolate rispettivamente dalle misure della sonda lambda monte catalizzatore e dalla sonda lambda valle catalizzatore.

$$\frac{dROC}{dt} = m_{O_2in} - m_{O_2out}$$

$$m_{O_2in} = 0.23 \cdot m_{aria} \cdot \frac{\lambda_{pre} - 1}{\lambda_{pre}}$$

$$m_{O_2out} = 0.23 \cdot m_{aria} \cdot \frac{\lambda_{post} - 1}{\lambda_{post}}$$

Mettendo insieme le tre equazioni si ottiene:

$$\frac{dROC}{dt} = 0.23 \cdot m_{aria} \cdot \frac{(\lambda_{pre} - \lambda_{post})}{\lambda_{pre} \cdot \lambda_{post}}$$

Quindi le incognite del modello sono due ma l'equazione al momento è solo una. Infatti gli output del modello dovranno essere una variabile di stato (la ROC del catalizzatore) ed una lambda posteriore predetta a fronte degli input di portata aria e lambda monte catalizzatore. La seconda equazione del modello, calcola la lambda a valle del catalizzatore nel seguente modo:

$$\lambda_{post}(i + \tau) = \lambda_{pre}(i) - f_{prob} \cdot [\lambda_{pre}(i) - 1]$$

f_{prob} rappresenta una funzione di probabilità che l'eccesso o il difetto di lambda venga intrappolato dalla superficie del catalizzatore andando ad alterare il valore del titolo in uscita dal catalizzatore. Supponiamo di effettuare una misura di OSC a banco motore, sappiamo che a seguito di un pre-condizionamento ricco il catalizzatore si svuota completamente di ossigeno, poi effettuando uno step rich-to-

lean andiamo a riempire il TWC di ossigeno valutandone la sua capacità massima. Analizzando questo transitorio, qualitativamente la probabilità di accumulo dell'ossigeno da parte del catalizzatore sarà una funzione monotona decrescente con la ROC. Infatti un catalizzatore completamente vuoto di ossigeno possiede una probabilità unitaria di assorbimento da parte del Cerio dell'ossigeno, la quale decade fino a zero nel momento in cui il catalizzatore è completamente saturo di ossigeno. Ragionando in maniera analoga possiamo affermare che durante un transitorio lean-to-rich la probabilità di rilasciare ossigeno nei gas di scarico decade da un valore unitario (TWC pieno di ossigeno) fino a zero nel momento in cui il catalizzatore non possiede più ossigeno da rilasciare. In questo senso andiamo a suddividere la funzione di probabilità a seconda del titolo della miscela in ingresso al catalizzatore.

$$f_{\text{prob}} = \begin{cases} f_{\text{lean}} , & \lambda_{\text{pre}} > 1 \\ f_{\text{rich}} , & \lambda_{\text{pre}} < 1 \end{cases}$$

Nella formula appare anche un *Tau* che è legato fondamentalmente alla velocità del gas e al ritardo nella risposta della sonda posteriore. Infatti se all'istante *i*-esimo la sonda anteriore misura un certo valore di titolo, la variazione a valle del catalizzatore verrà percepita della sonda posteriore con un certo delay.

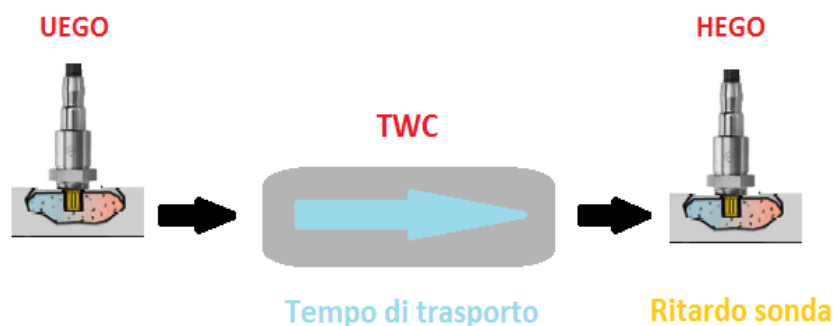


Figura 3.1– Schema del ritardo fra le due sonde

3.1 Il ritardo di trasporto del gas nel catalizzatore

La sonda anteriore nello step i-esimo misura un certo valore di titolo monte catalizzatore, il quale genererà una perturbazione nel titolo a valle del catalizzatore con un certo ritardo temporale che dipende della velocità del gas. Semplificando, si può schematizzare questo ritardo dalla legge dei gas perfetti come segue:

$$\text{Delay}_{\text{BTW}_{\text{LSU}_{\text{LSF}}}} = \frac{p_{\text{media}} \cdot V_{\text{eff}}}{R_{\text{gas}} \cdot T_{\text{media}}} \cdot \frac{1}{\dot{m}_{\text{exhgas}}}$$

In cui:

- p_{media} rappresenta la pressione media misurata monte e valle TWC
- V_{eff} rappresenta il volume effettivo che è presente fra la sonda anteriore e posteriore
- R_{gas} è la costante universale dei gas
- T_{media} rappresenta la temperatura media misurata monte e valle catalizzatore
- \dot{m}_{exhgas} è la portata dei gas di scarico entrante nel catalizzatore

In prima approssimazione il volume che separa le due sonde corrisponde al volume del catalizzatore, il quale però presenta un'area effettiva di passaggio legata al numero di canali che compongono il washcoat. Per tenere conto di questo aspetto viene aggiunto un fattore correttivo *epsilon* che risulterà essere minore di uno.

$$V_{\text{eff}} = L_{\text{cat}} \cdot A_{\text{passaggio}} \cdot \epsilon$$

In cui:

- L_{cat} rappresenta la lunghezza del catalizzatore
- $A_{\text{passaggio}}$ rappresenta l'area di passaggio del catalizzatore

3.2 La risposta della sonda HEGO

Il valore del titolo della miscela a valle del TWC viene letto dalla sonda ON-OFF la quale risponde con una sua dinamica che può essere agevolmente modellata con un filtro del primo ordine.

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

Le costanti di tempo della sonda vengono fornite dal costruttore, in questo caso BEG (Bosch Engineering GmbH), il quale effettua delle misure a banco, in un condotto primo di catalizzatore, in modo da isolare le dinamiche di trasporto e risposta della sonda in diverse condizioni operative e con diversi gradi di invecchiamento.

Condizioni operative	Sonda nuova	Sonda invecchiata
tr-s <i>Switch=V1 mV</i>	$\leq T_1 \text{ ms}$	$\leq T_2 \text{ ms}$
tl-s <i>Switch=V1 mV</i>	$\leq T_3 \text{ ms}$	$\leq T_4 \text{ ms}$
tr-l <i>V3 mV → V2 mV</i>	$\leq T_5 \text{ ms}$	$\leq T_6 \text{ ms}$
tl-r <i>V2 mV → V3 mV</i>	$\leq T_7 \text{ ms}$	$\leq T_8 \text{ ms}$

Tabella 3.1– Risposta dinamica HEGO a temperatura ambiente

Analizzando le condizioni operative in uno step di lambda lean-to-rich e rich-to-lean:

- *tr-s* rappresenta il delay temporale che intercorre fra il gradino di lambda anteriore in magro e il crollo della sonda posteriore con soglia di attraversamento a 550mV

- $tl-s$ rappresenta il delay temporale che intercorre fra il gradino di lambda anteriore in ricco e la risalita della sonda posteriore con soglia di attraversamento a $V1$ mV
- $tr-l$ rappresenta l'intervallo temporale che intercorre fra il passaggio della sonda posteriore da $V3$ mV a $V2$ mV
- $tl-r$ rappresenta l'intervallo temporale che intercorre fra il passaggio della sonda posteriore da $V2$ mV a $V3$ mV

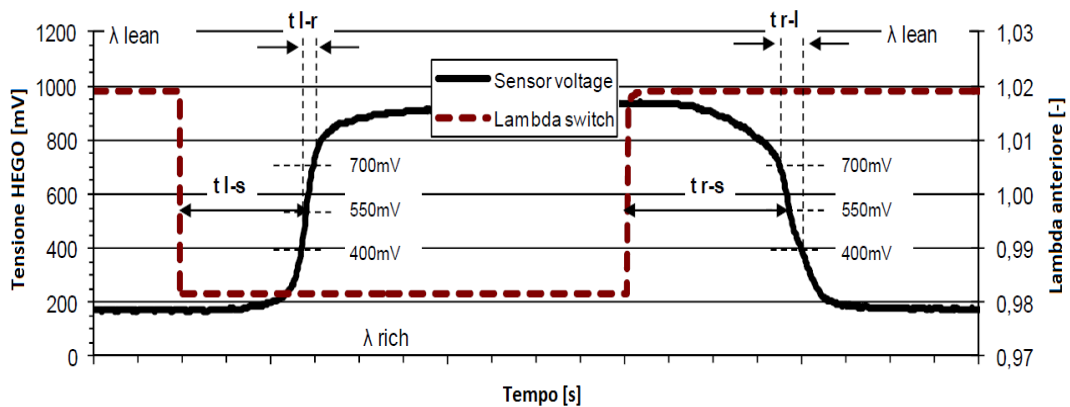


Figura 3.2– Definizione dei tempi di risposta della sonda HEGO

Nel modello della sonda, il filtro del primo ordine viene applicato ad una miscela che è a contatto con la sonda, per cui siamo interessati alle costanti di tempo $tr-l$ e $tl-r$. A seguito dell'invecchiamento si nota come la costante di tempo aumenti sia a seguito di uno step di lambda lean-to-rich che rich-to-lean, sintomo di una dinamica più lenta.

3.3 Saturazione di ossigeno immagazzinato dal TWC

Il modello presentato fino ad ora risulta essere valido solamente quando il catalizzatore possiede ancora la capacità di immagazzinare e rilasciare ossigeno. Infatti la variazione di ROC si annulla nel momento in cui il catalizzatore si riempie o si svuota completamente di ossigeno. Perciò occorre applicare la seguente modifica al bilancio di massa:

$$\frac{dROC}{dt} = \begin{cases} 0.23 \cdot m_{aria} \cdot \frac{(\lambda_{pre} - \lambda_{post})}{\lambda_{pre} \cdot \lambda_{post}} & 0 \leq ROC \leq OC \\ 0 & altrimenti \end{cases}$$

In cui la OC (Oxygen Capacity) rappresenta la capacità massima di stoccaggio dell'ossigeno. Per capire qual è il valore massimo a cui il catalizzatore satura concentriamoci sulla procedura che viene effettuata per misurare l'OSC, in modo tale da avere una fotografia completa della dinamica di riempimento e svuotamento del catalizzatore.

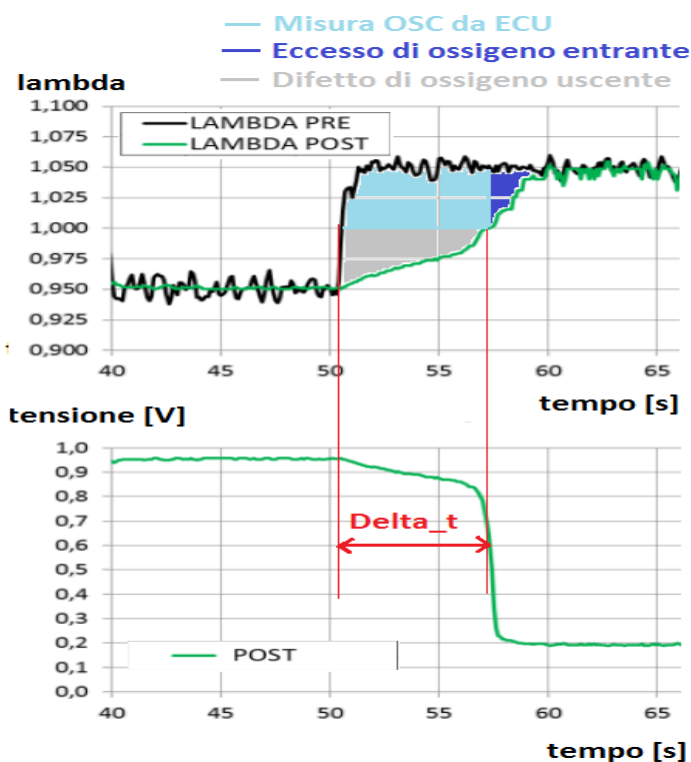


Figura 3.3– Definizione del TOC nello step rich-to-lean

Durante lo step rich-to-lean la ECU misura l'OSC (area azzurra) settando l'integrale a fronte di una lambda entrante nel catalizzatore maggiore di uno e resettando l'integrale stesso al raggiungimento di una soglia calibrata di tensione posteriore andando a definire il tempo Δt in cui viene integrato l'eccesso di ossigeno entrante. Considerando il bilancio di massa nel catalizzatore si ha che nell'intervallo

Δt è presente una portata di ossigeno negativa uscente dal catalizzatore che è funzione del titolo a valle del TWC. Questo contributo in termini di variazione di ROC all'interno è globalmente positivo in quanto il difetto di ossigeno uscente entra nell'equazione con un meno andando così ad incrementare la variazione di ossigeno all'interno del catalizzatore. Infine, superato il Δt il catalizzatore non è ancora completamente pieno di ossigeno in quanto è presente ancora un delta lambda positivo (area blu) sintomo che sta entrando più ossigeno di quello che sta uscendo. Riassumendo il TOC (Total Oxygen Capacity) è dato dalla somma delle tre aree (area azzurra, grigia e blu) *Figura 3.3*.

$$TOC = OSC + \text{Eccesso di } O_{2_{in}} + \text{Difetto di } O_{2_{out}}$$

In maniera analoga andiamo a definire un TNOC (Total Negative Oxygen Capacity) nello step lean-to-rich.

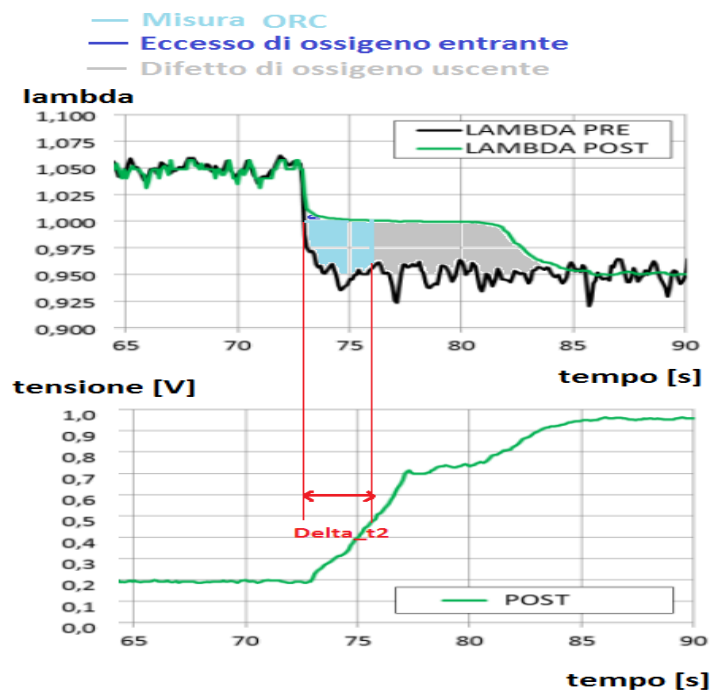


Figura 3.4– Definizione del TNOC nello step lean-to-rich

L'ORC (Oxygen Release Capacity) non viene misurato dalla ECU in quanto risulta essere poco ripetibile. Infatti in un test di OSC, si può anche misurare l'ORC ma la

sonda ON-OFF posteriore presenta una transizione magro-ricco con un gradiente inferiore rispetto allo step ricco-magro, generando una dispersione dei risultati in termini di deviazione standard molto elevata. Supponendo di avere una sonda lineare montata anche a valle del catalizzatore, il TNOC è dato anche questa volta dalla somma delle tre aree di *Figura 3.4*.

$$\text{TNOC} = \text{ORC} + \text{Eccesso di } \text{O}_2_{\text{in}} + \text{Difetto di } \text{O}_2_{\text{out}}$$

L'attività svolta a banco motore che andremo ad analizzare nel quarto capitolo si pone l'obiettivo di caratterizzare questi due parametri (TOC, TNOC), cercando di rispondere ad una serie di domande:

- TOC e TNOC rappresentano la stessa quantità?
- Come variano TOC e TNOC in funzione della portata d'aria entrante nel motore?
- Come variano TOC e TNOC in funzione della temperatura monolita?
- Come variano TOC e TNOC in funzione del livello di invecchiamento del catalizzatore?

Le risposte a queste domande ci consentiranno di generare un modello di Oxygen Storage in grado di avere in output ad ogni step di calcolo della ECU il massimo valore di ossigeno a cui il catalizzatore satura, in funzione del punto operativo.

Capitolo 4. Caratterizzazione dell'oxygen storage

La misura dell'oxygen storage di un catalizzatore viene eseguita effettuando un test di OSC a banco motore, strumentando il catalizzatore come mostrato in *Figura 4.1*.

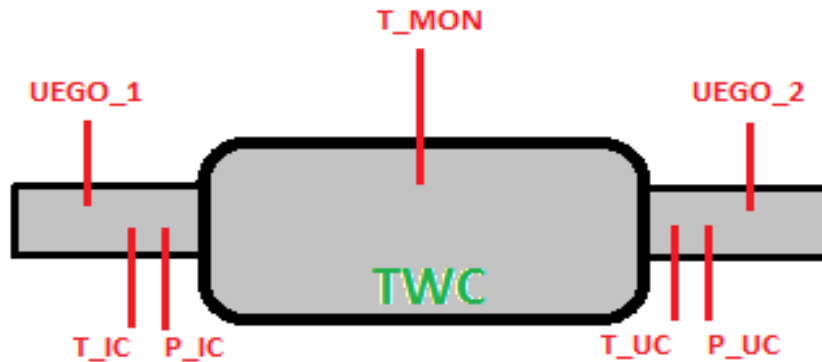


Figura 4.1– Layout sensori a banco motore

La possibilità di strumentare lo scarico con sensori che in vettura non sono presenti consente di ottenere informazioni utili alla comprensione del fenomeno, in particolare si riporta l'elenco dei sensori impiegati durante la prova.

Sensore	Nome completo	Unità di misura
UEGO_1	Sonda lambda lineare monte TWC	//
UEGO_2	Sonda lambda lineare valle TWC	//
T_IC	Temperatura ingresso TWC	°C
T_MON	Temperatura monolita	°C
T_UC	Temperatura uscita TWC	°C
P_IC	Pressione ingresso TWC	mbar
P_UC	Pressione uscita TWC	mbar

Tabella 4.1– Elenco sensori a banco motore

Tipicamente i sensori di temperatura e pressione vengono acquisiti in PUMA (software di gestione banco), in quanto in Motronic sono informazioni che non sono presenti oppure vengono modellate. Nelle nostre prove per comodità di visualizzazione e post trattamento dei dati le informazioni sono state raccolte tutte su INCA (software di calibrazione, misura e diagnosi), in modo tale da poter generare un unico file *.dat* da elaborare in Matlab&Simulink. La centralina è predisposta per acquisire un segnale derivante dalla UEGO_1 ed un segnale derivante dalla HEGO (non presente), per cui vengono spente alcune calibrazioni in modo tale da non mandare in errore la ECU a causa dell'assenza della sonda ON-OFF a valle del catalizzatore. Inoltre per poter acquisire anche il segnale derivante dalla UEGO_2 viene impiegato un modulo esterno aggiuntivo denominato *ES636*. Gli input derivanti dai sensori vengono elaborati dal tool in Simulink di *Figura 4.2 e 4.3* in grado di generare in output i valori di TOC e TNOC (diversi da OSC e ORC). I due schemi Simulink applicano il bilancio di massa dell'ossigeno all'interno del TWC durante lo step rich-to-lean e lean-to-rich.

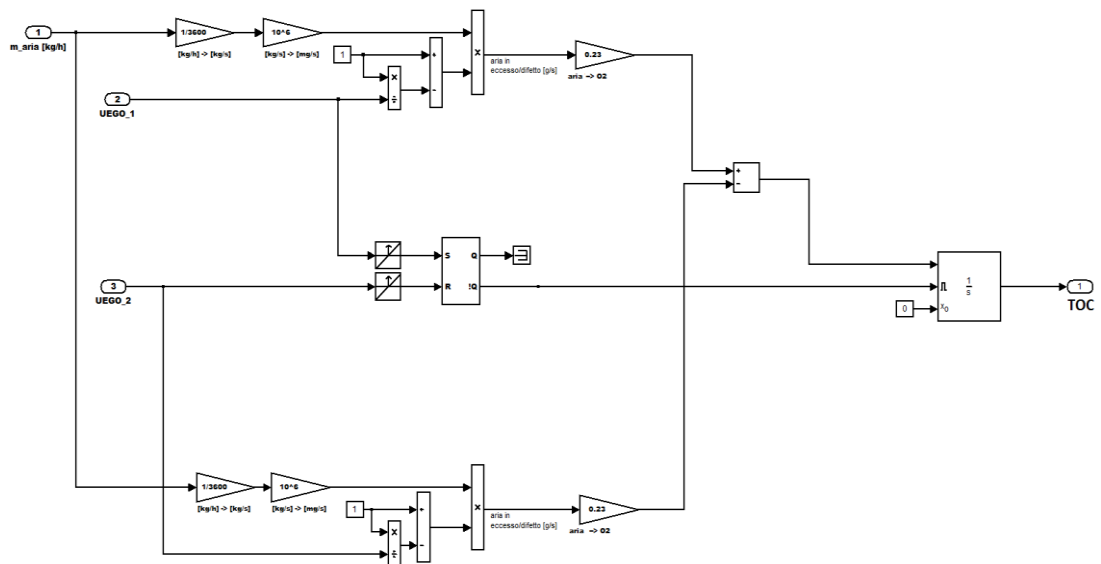


Figura 4.2– Schema simulink calcolo TOC

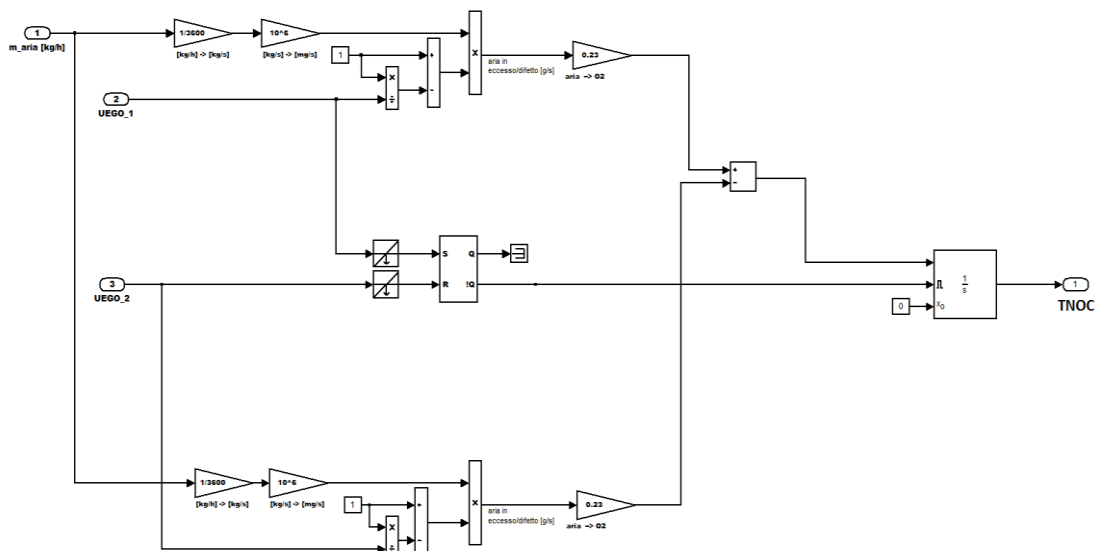


Figura 4.3– Schema simulink calcolo TNOC

L'integratore viene gestito da un *Flip-Flop SR* e si distingue nel calcolo del TOC e del TNOC per le condizioni di *Set* e di *Reset*.

- TOC
 - Set: UEGO_1 attraversa la soglia unitaria in salita
 - Reset: UEGO_2 attraversa la soglia di 1.04 in salita
- TNOC
 - Set: UEGO_1 attraversa la soglia unitaria in discesa
 - Reset: UEGO_2 attraversa la soglia di 0.96 in discesa

Le soglie sono state calibrate per un test di OSC con una lambda anteriore oscillante fra 0.95 e 1.05, evitando di settare o resettare l'integrale anticipatamente o posticipatamente a causa della rumorosità dei segnali lambda misurati. Le misure vengono effettuate in punti di giri e carico fissati, attendendo che i valori di temperatura monolita e portata aria entrante siano stabili. Per poter capire se TOC e TNOC rappresentano la stessa quantità sono stati effettuati test di OSC in diverse condizioni operative del catalizzatore.

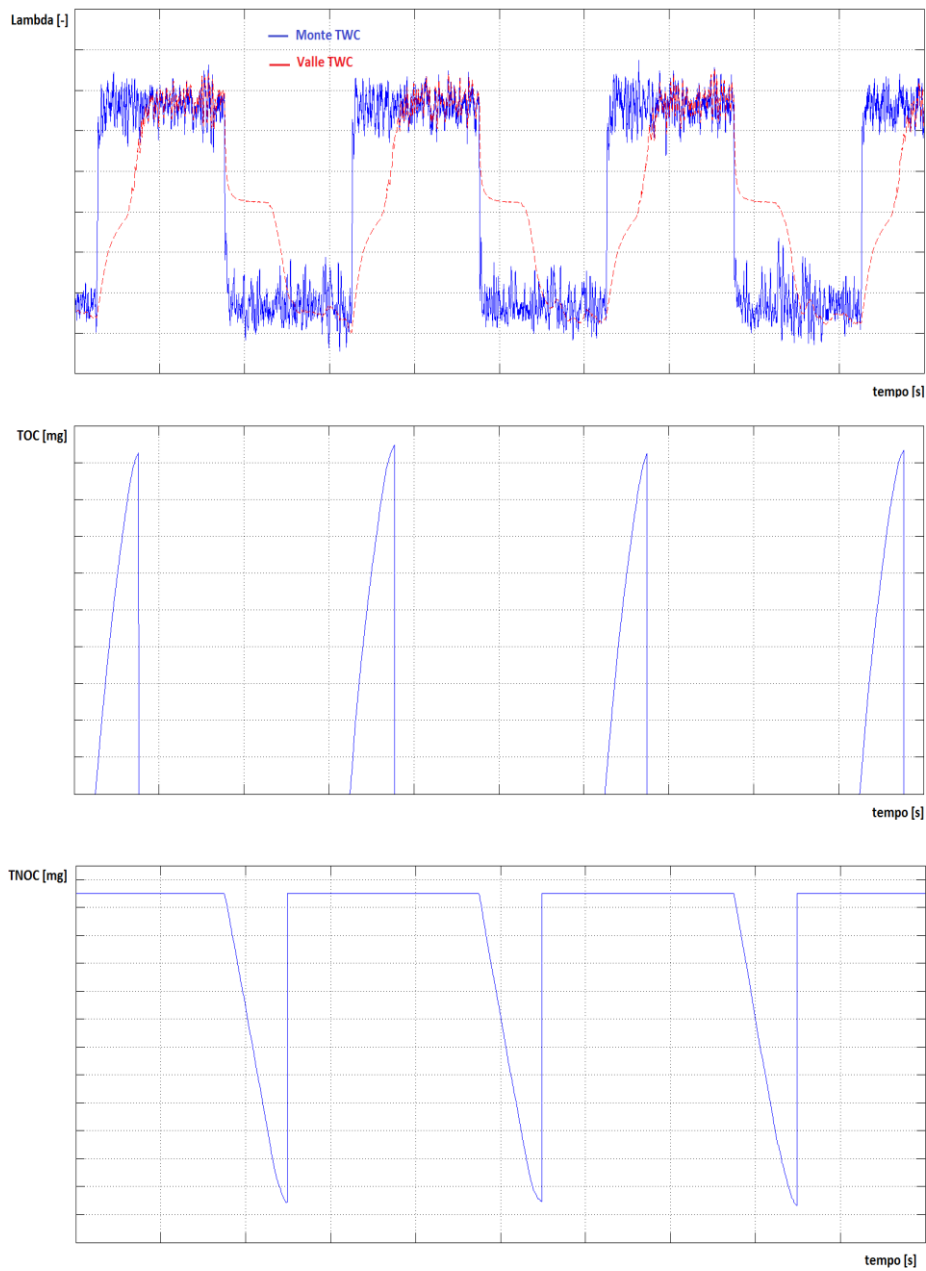


Figura 4.4 – TOC e TNOC, $\dot{m}_{\text{aria}} = 100\text{kg/h}$ $T_{\text{mon}} = 860^{\circ}\text{C}$

La *Figura 4.4* mostra un esempio dell'attività svolta a banco motore in cui è stato preso un catalizzatore “fresh”, fatto attraversare da una portata d'aria di circa 100kg/h ad una temperatura media del monolita di 860°C. Il modello simulink agisce sia nello step rich-to-lean che lean-to-rich per calcolare rispettivamente il TOC e il TNOC. La griglia su cui vengono riportate le figure presenta uno step di 200mg, evidenziando uno scostamento fra TOC e TNOC. In particolare, in questa misura il

TNOC in valore assoluto è mediamente più grande del 20% rispetto al TOC. Qualitativamente la stessa informazione si riusciva ad ottenere osservando il grafico con i segnali lambda monte e valle catalizzatore, infatti l'area sottesa fra le due curve è più grande nella transizione magro-ricco rispetto a quella ricco-magro. Anche le altre misure mostrano uno scostamento fra TOC e TNOC, portando a concludere che il catalizzatore si comporta come un serbatoio di ossigeno con volume variabile a seconda della lambda entrante. Prima di capire come queste due quantità variano in funzione della temperatura e della portata, affrontiamo il problema legato alla necessità di pre-trattare alcune misure in cui la lettura della sonda posteriore viene alterata dalla diversa composizione del gas in uscita dal catalizzatore in particolare in condizioni di miscela ricca.

4.1 Pre-processing dei segnali lambda

Per definizione i segnali lambda monte e valle catalizzatore in condizioni stazionarie sono uguali in quanto la variazione di ossigeno all'interno del TWC è nulla. In *Figura 4.5* si evidenzia un fenomeno in cui nel semi periodo dell'onda quadra in ricco i due segnali si discostano, in particolare la sonda lineare a valle del catalizzatore legge un valore più ricco rispetto alla miscela entrante.

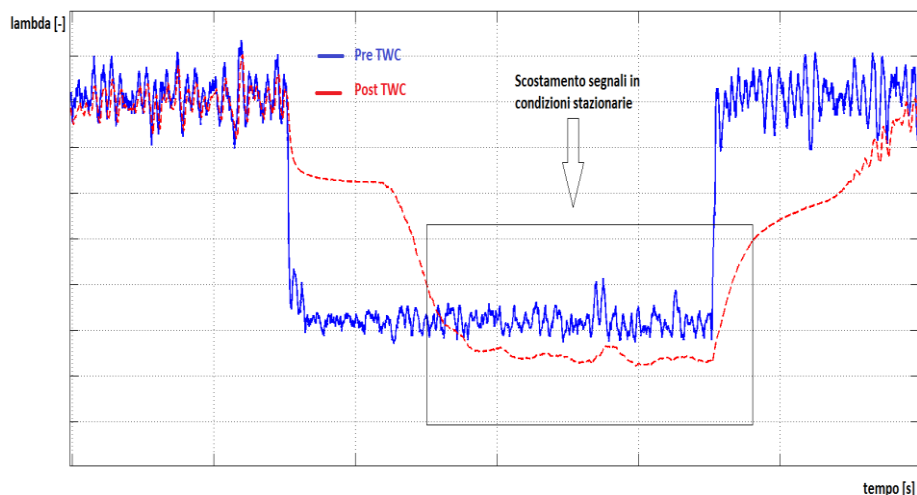
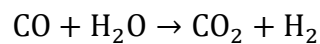


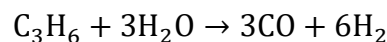
Figura 4.5– Errore nella lettura della sonda posteriore

I due sensori presentano una caratteristica di diffusione differente, all'interno del layer poroso, delle varie specie chimiche presenti nel gas. Il disturbo più rilevante è legato alla presenza di idrogeno allo scarico (in modo particolare in condizioni di miscela ricca) in quanto diffonde con facilità, generando così una lettura errata (il sensore rileva una ricchezza maggiore di quella effettivamente presente allo scarico). Questo aspetto non è sufficiente a descrivere lo scostamento dei due segnali, proprio perché entrambi i sensori sono potenzialmente affetti da questa deviazione rispetto al lambda presente allo scarico. Lo scostamento dei due segnali coincide con l'esaurimento dell'ossigeno disponibile all'interno del catalizzatore, e con la stessa costante di tempo i CO raggiungono la loro condizione di equilibrio. La risposta transitoria degli idrocarburi invece sembra richiedere più tempo e non sembra essere correlata solamente alla dinamica di storage e release con cui abbiamo modellato il catalizzatore. La formazione dell'idrogeno avviene a causa delle reazioni di WGS e SR, le quali diventano predominanti mentre l'ossigeno all'interno del TWC si sta esaurendo.

- WGS



- SR



Quindi le due reazioni possono spiegare il picco di idrogeno che provoca un picco di ricco letto dalla sonda. Perciò l'effetto combinato di formazione dell'idrogeno legato alle due reazioni chimiche e della forte sensibilità all'idrogeno da parte della sonda provoca uno shift delle misure. L'ipotesi al momento non è supportata da misure in quanto gli analizzatori non misurano l'idrogeno. La soluzione che viene adottata in queste condizioni prevede l'inserimento di una saturazione dinamica del segnale della sonda posteriore al valore di lambda letto dalla sonda anteriore, *Figura 4.6*.

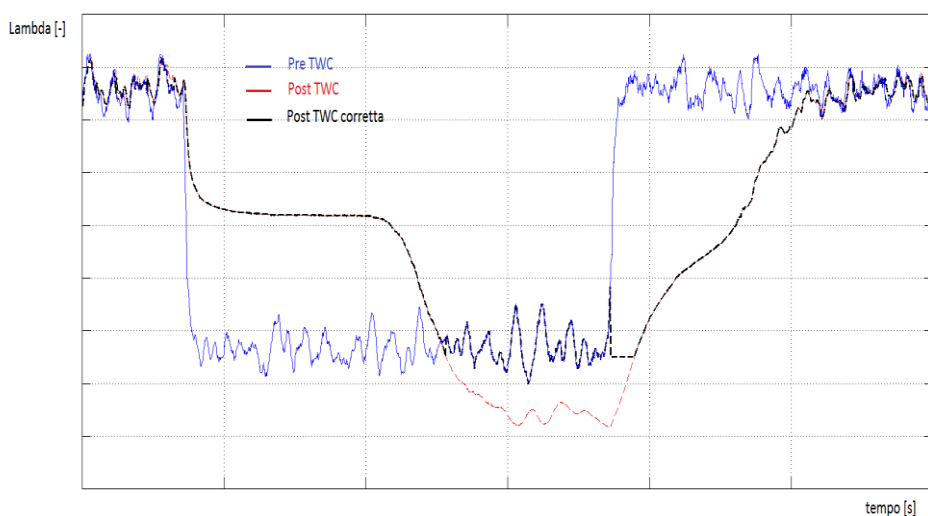


Figura 4.6– Correzione applicata alla lettura della sonda posteriore

L'esatto valore di TOC è sostanzialmente impossibile da ricavare, in quanto occorrerebbe conoscere la dinamica del catalizzatore nel tratto a lambda posteriore costante, dinamica che la sonda posteriore non è in grado di leggere in quanto affetta da forte sensibilità agli H₂. Il valore scelto come saturazione della lambda letta dalla sonda posteriore durante la fase di risalita del segnale è 0.95 ovvero il target imposto all'onda quadra durante il semiperiodo in ricco. Applicando questa correzione, coerentemente con il fenomeno fisico, si ha una riduzione del TOC calcolato in quanto l'area sottesa dalle due curve di lambda pre e post si riduce. La differenza che si ottiene post-processando il segnale corretto rispetto a quello "grezzo" è inferiore all'1%, perciò il valore reale si discosterà solamente di qualche milligrammo di ossigeno dal valore calcolato con le modifiche applicate al segnale post catalizzatore. Per poter caratterizzare l'oxygen storage, si è applicato il tool di simulink a diverse misure in cui si è modificata la temperatura del catalizzatore, la portata di aria entrante nel motore e il livello di degrado. Lo scopo finale di questa attività sarà quello di realizzare una mappa normalizzata di oxygen storage in funzione di portata aria e temperatura, utilizzabile per ogni tipo di catalizzatore. Nel paragrafo successivo andiamo a esplicitare la procedura eseguita a banco motore per la generazione degli sweep di temperatura e portata.

4.2 Sweep di temperatura TWC e portata aria motore

L'attività svolta a banco motore per la generazione di un modello di oxygen storage richiede l'esecuzione di diversi test di OSC al variare di temperatura catalizzatore e portata aria motore. Le leve a disposizione per variare questi due parametri sono:

- Anticipo di accensione attuato
- Carico motore (farfalla+boost)

Gli sweep di temperatura catalizzatore vengono eseguiti a pari portata aria in ingresso al motore, così come gli sweep di portata vengono eseguiti mantenendo costante la temperatura monolita. Degradando l'anticipo si ha uno spostamento della combustione verso la fase di scarico con l'effetto di aumentare la temperatura allo scarico e di conseguenza anche la temperatura del monolita. Un degrado di anticipo comporta un degrado dell'efficienza di combustione e di conseguenza della coppia erogata dal motore. Il banco è controllato in giri e carico e il sistema di controllo, nel tentativo di inseguire il target di punto operativo, reagirà ad un degrado di anticipo aprendo maggiormente farfalla con conseguente aumento della portata. Grazie alla seconda leva a disposizione viene variato il carico motore al fine di riportarsi al livello di portata desiderato. Gli sweep di temperatura sono stati eseguiti su un catalizzatore fresh utilizzando due livelli di portata aria entrante nella singola bancata: 75kg/h e 100kg/h, *Figura 4.7*. Nel grafico vengono riportati sia i valori di TOC che i valori di TNOC in funzione della temperatura monolita. Ragionando in valore assoluto, mantenendo costante la portata di aria entrante nella singola bancata motore, all'aumentare della temperatura si ha un aumento sia del TOC che del TNOC. Questo comportamento è coerente con la chimica del catalizzatore in quanto i siti attivi di immaginamento dell'ossigeno diventano più efficienti con l'aumentare della temperatura. Il livello di temperatura massimo si raggiunge con anticipi attuati negativi e i vincoli a cui la linea di scarico e il motore devono far fronte sono sostanzialmente due:

- Temperatura massima collettore di scarico e turbina
- Coppia netta erogata dal motore per potersi mantenere al target di giri

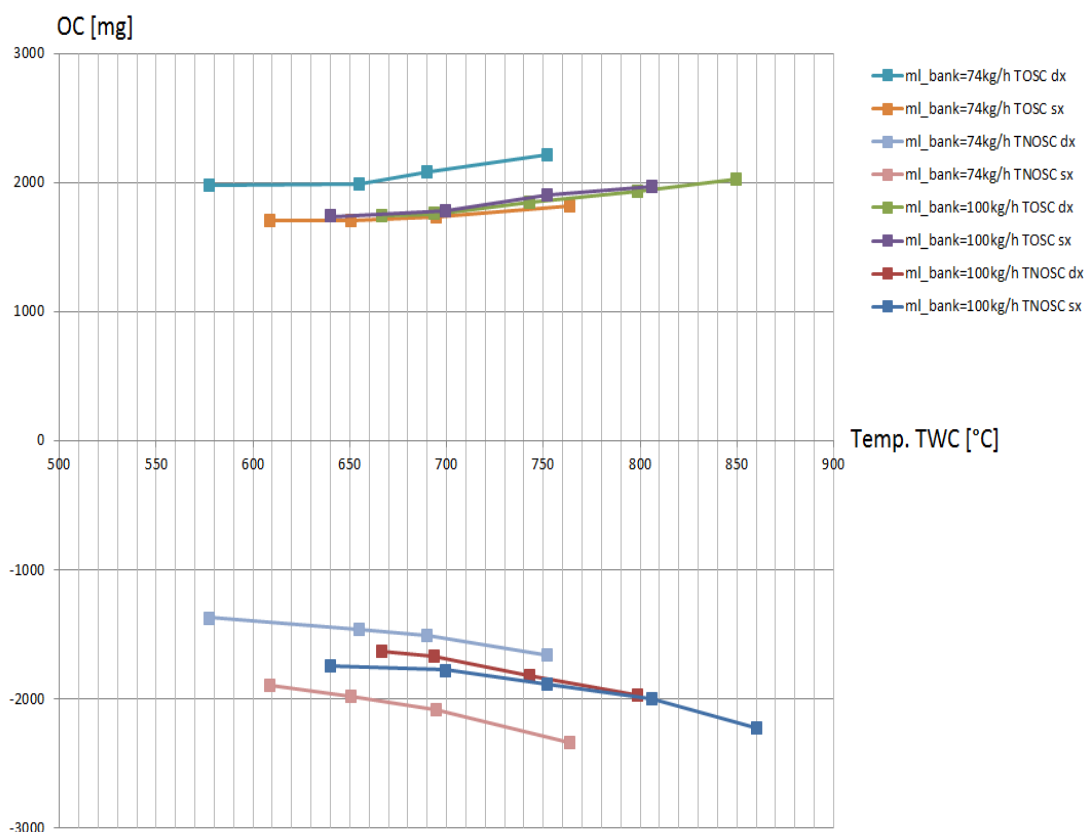


Figura 4.7– Sweep di temperatura TWC fresh

I collettori di scarico e la turbina vengono dimensionati termicamente per resistere a temperature di circa 950°C e a fronte di scambi termici lungo la linea di scarico si ottiene di conseguenza un tetto massimo più basso per la temperatura letta dalla termocoppia montata nel catalizzatore. Degradando anticipo, come detto, occorre aprire farfalla per riportarsi al livello di portata a cui si sta eseguendo lo sweep di temperatura e questo introduce un secondo vincolo alla temperatura massima legato all'apertura angolare minima raggiungibile dalla farfalla (con boost inattivo ovviamente). Gli swep di portata aria sono stati eseguiti su un altro tipo di catalizzatore, il quale è stato invecchiato a banco motore secondo una procedura standard descritta nel paragrafo successivo. In *Figura 4.8* i risultati su due livelli di temperatura TWC: 830°C e 930°C. Anche in questo caso si ha coerenza con il fenomeno fisico/chimico che stiamo analizzando infatti la possibilità di utilizzare le zone cosiddette di “*Slow Access OC*” dipende dalla portata aria entrante, in quanto diminuendo la portata dei gas entranti diminuisce anche la velocità (ipotizzando

sezione di ingresso del catalizzatore costante) e a pari lunghezza percorsa aumenta il tempo di attraversamento del brick e di conseguenza aumenta anche la probabilità che le zone più interne riescano ad immagazzinare ossigeno. *Figura 4.9.*

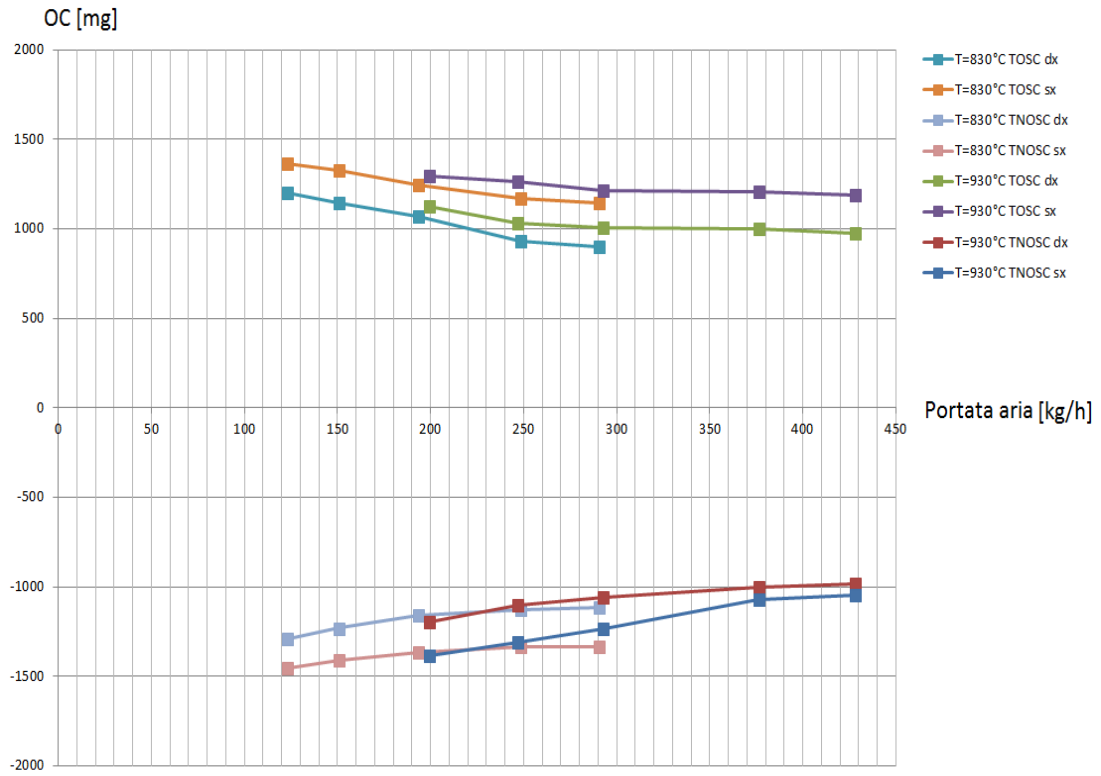


Figura 4.8– Sweep di portata TWC aged

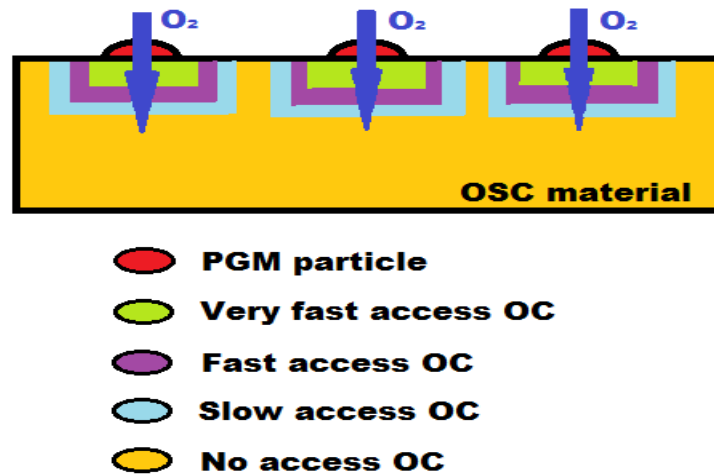


Figura 4.9– Zone di accessibilità dell'ossigeno nel coating

4.3 Procedura standard di invecchiamento del catalizzatore

L'invecchiamento del catalizzatore avviene secondo una procedura implementata a banco motore attraverso un ciclo automatico che alterna una fase di alte temperature ed alte portate dei gas di scarico (per un tempo calibrato) ad una fase di lean-spike tale da favorire le reazioni esotermiche di HC, *Figura 4.10*.

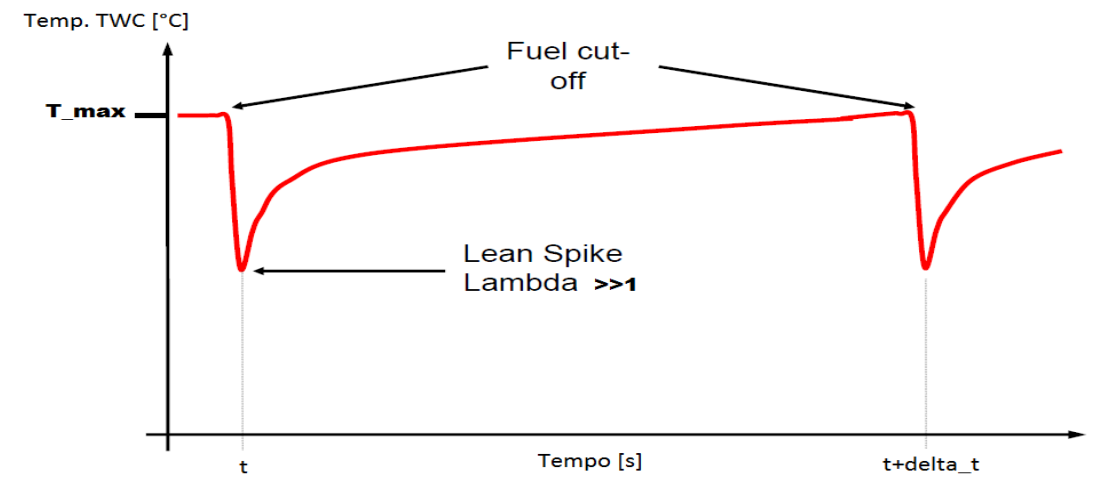


Figura 4.10– Ciclo automatico di invecchiamento a banco motore

Il parametro scelto per determinare l'invecchiamento di un catalizzatore è l'OSC, il quale grazie a questa procedura sviluppata a banco motore si riduce molto velocemente, raggiungendo i valori tipici per un chilometraggio pari a quello di un catalizzatore fine vita.

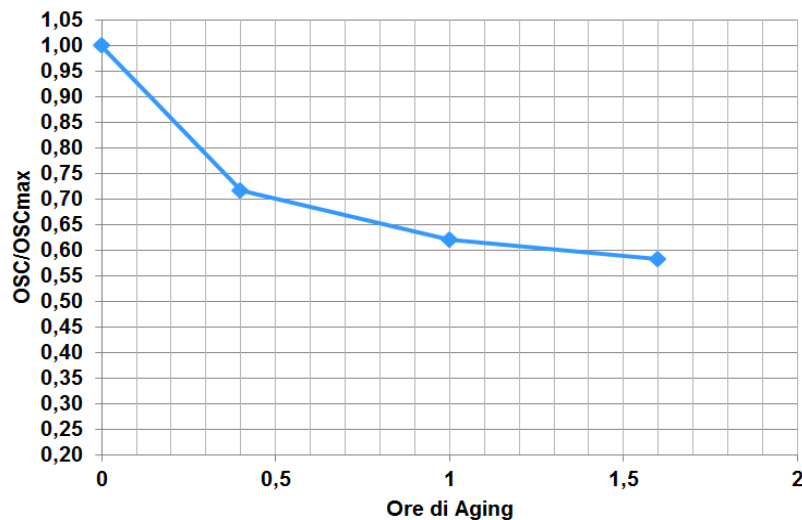


Figura 4.11– OSC in funzione delle ore di Aging

In *Figura 4.11* viene riportato l'invecchiamento normalizzato al valore massimo di OSC del catalizzatore a cui è stato effettuato lo sweep di portata aria. Interessante evidenziare come l'invecchiamento a banco provochi un calo dell'OSC a circa il 60% del suo valore fresh in solamente 1.6 ore di Aging. Superata la parentesi dedicata alla procedura di invecchiamento vediamo ora come utilizzare i dati ottenuti a banco motore per generare il modello di oxygen storage.

4.4 Modello di oxygen storage

I dati raccolti a banco motore sono i seguenti:

- Sweep di temperatura catalizzatore per un catalizzatore fresh
- Sweep di portata aria motore per un catalizzatore aged

I due catalizzatori provengono da due fornitori differenti e cambiano in termini di coating e PGML (Platinum Group Metals Loading). Il primo step è stato quello di riportare il TOC e il TNOC in valore assoluto sia negli sweep di temperatura e portata con generazione della linea di tendenza che meglio “fitta” i punti sperimentali, *Figura 4.12 e 4.13*.

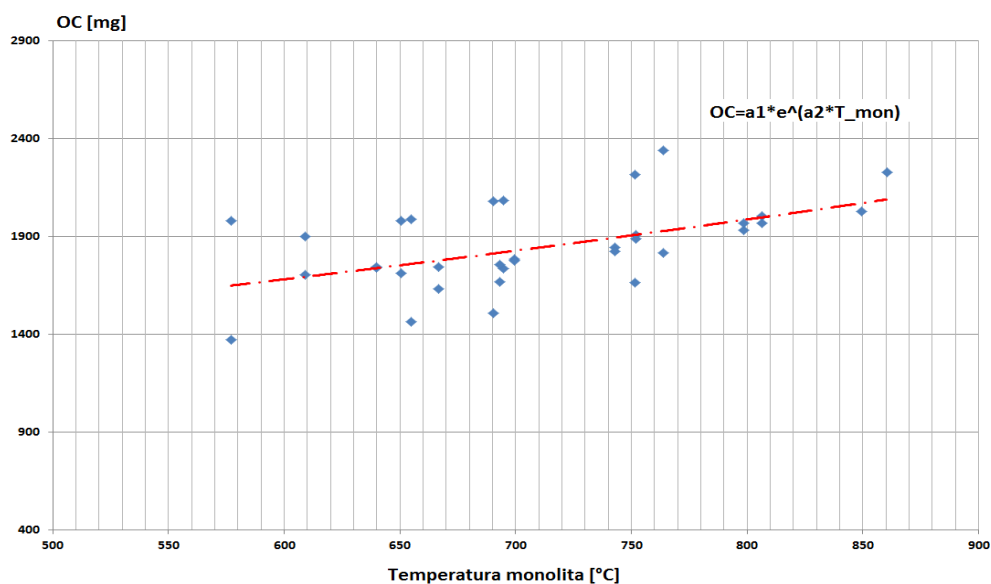


Figura 4.12– Modello di OC in funzione della temperatura TWC

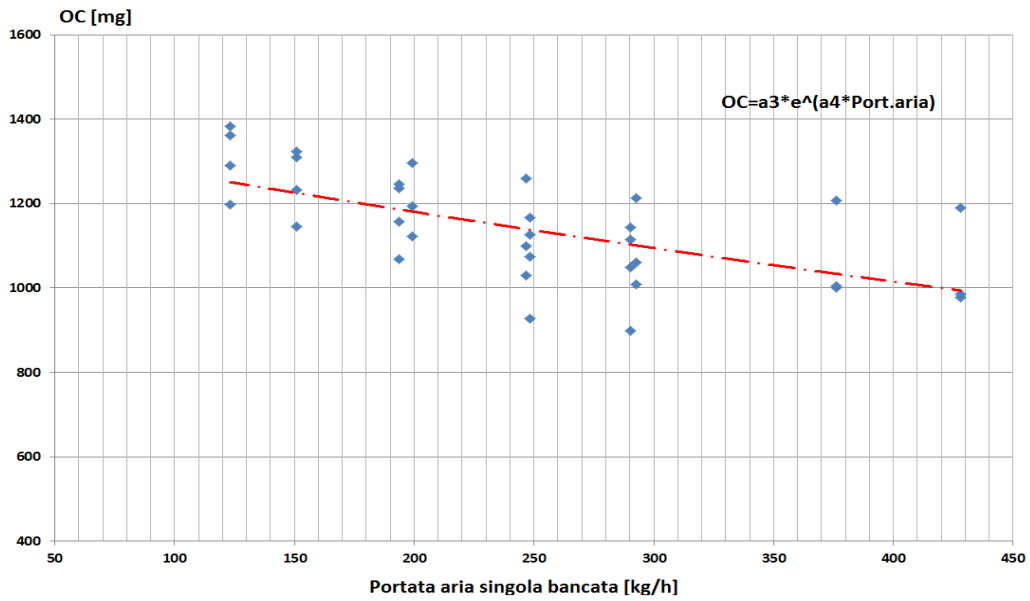


Figura 4.13– Modello di OC in funzione della portata TWC

Il modello scelto per catturare il comportamento dei dati sperimentali è di tipo esponenziale sia per la temperatura del catalizzatore che per la portata di aria per singola bancata:

$$OC_{temp} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot T_{mon}}$$

$$OC_{port} = a_3 \cdot e^{a_4 \cdot m_{aria}}$$

In cui a_1 , a_2 , a_3 , a_4 rappresentano i coefficienti che meglio rappresentano i dati sperimentali. Il passo successivo è stato quello di normalizzare il modello di OC in un range di portate e temperature in cui il catalizzatore si trova normalmente ad operare. Le due curve risultanti vengono riportate in *Figura 4.14 e 4.15*. Il valore scelto per la normalizzazione del modello di OC-Temperatura è convenzionalmente il valore di oxygen capacity che il modello registra ad una temperatura TWC di 1000°C, mentre quello per la normalizzazione del modello di OC-Portata è il valore di oxygen capacity ad una portata aria entrante per singola bancata di 40 kg/h.

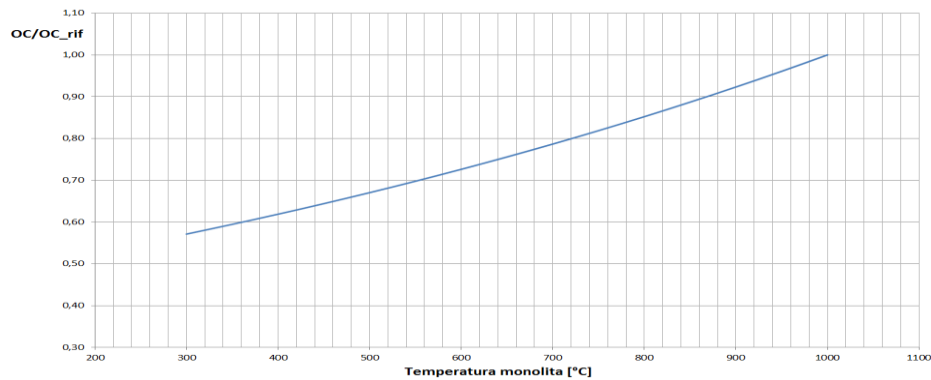


Figura 4.14– Modello di OC-Temperatura normalizzato

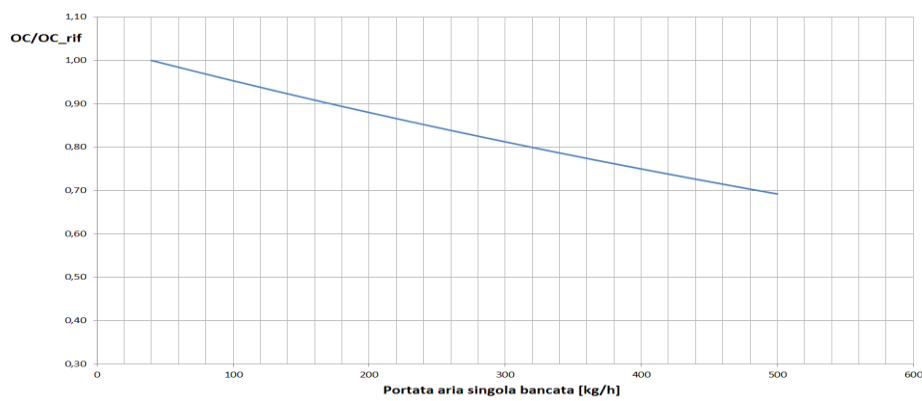


Figura 4.15– Modello di OC-Portata normalizzato

Le ipotesi che hanno accompagnato la costruzione del modello di OC sono:

- Il TOC e il TNOC presentano in valore assoluto lo stesso comportamento in funzione della temperatura TWC e portata aria
- L'andamento dell'OC in funzione di temperatura e portata non varia con l'invecchiamento del brick e dal tipo di catalizzatore studiato (infatti gli sweep di temperatura e portata sono stati realizzati su due catalizzatori differenti e due livelli di invecchiamento diversi)

La validazione del modello, come evidenziato nel paragrafo successivo, richiederà l'unione delle due curve normalizzate con lo scopo di generare una mappa per il TOC ed una per il TNOC.

4.5 Validazione del modello di oxygen storage

Il modello di oxygen storage è stato validato su alcuni dei punti sperimentali utilizzati per la costruzione dello stesso. I risultati vengono riportati nella *Figura 4.16 e 4.17*.

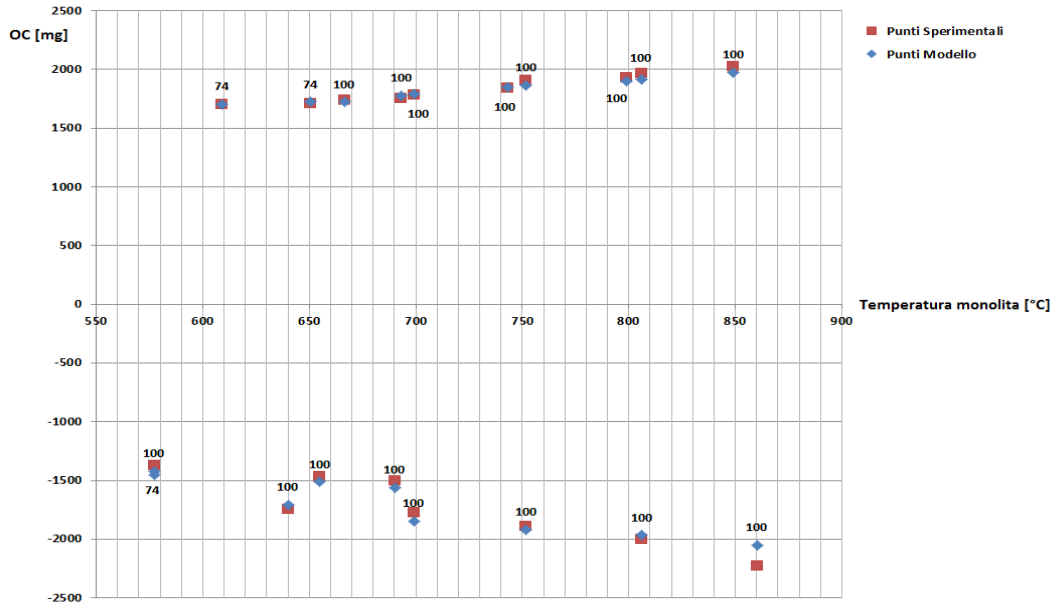


Figura 4.16– Validazione modello per TWC fresh

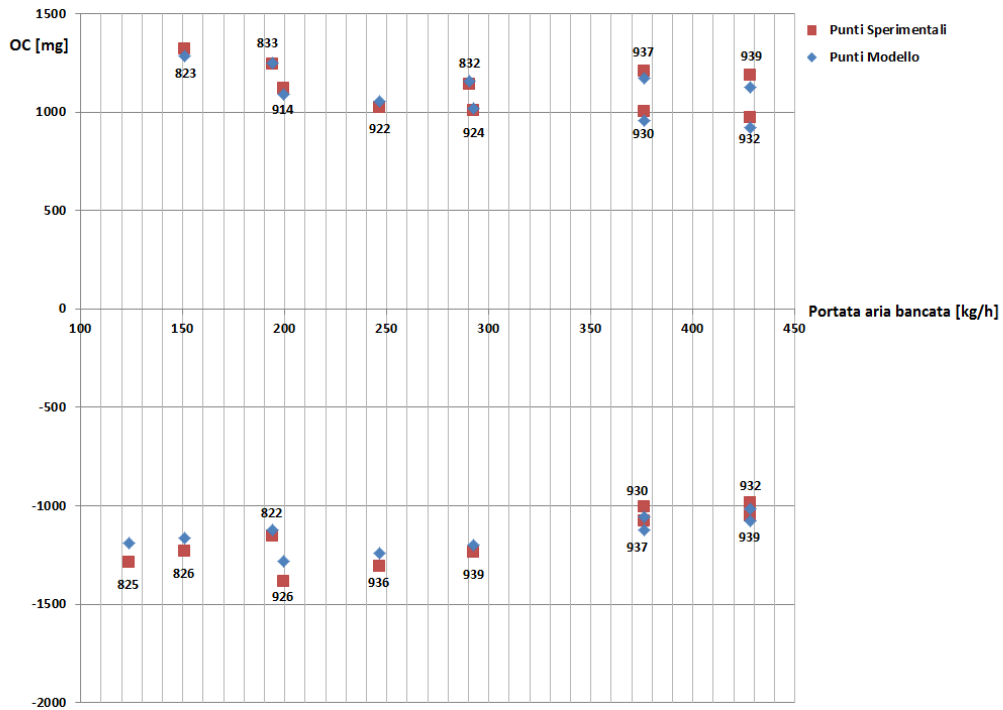


Figura 4.17– Validazione modello per TWC aged

Nella *Figura 4.16* i punti sperimentali e i punti del modello per il TWC fresh vengono riportati in funzione della temperatura del catalizzatore evidenziando per ogni punto a quale portata di aria entrante nella singola bancata si è effettuata la misura. Invece nella *Figura 4.17* i punti sperimentali e modellati vengono riportati in funzione della portata aria indicando per ogni punto a quale temperatura monolita si è effettuato il test di OSC. L'aspetto interessante è che durante i test di OSC le temperature e le portate di alcuni punti sperimentali sono elevate e la durata del test è di circa 15 minuti, in modo tale da realizzare un numero adeguato di punti da poter mediare e verificarne la bassa deviazione standard, generando così un invecchiamento durante la misura stessa. Infatti in generale il modello insegue bene i punti sperimentali, e nei punti in cui il modello realizza un valore assoluto di OC più basso rispetto al punto sperimentale, è riconducibile ad un invecchiamento del catalizzatore durante il recording della misura di OC stessa. I modelli di *OC-temperatura* e di *OC-portata* normalizzati sono stati integrati in un'unica mappa in modo tale da riportare tutti i dati in funzione di portata e temperatura. I dati sono stati validati inserendo le misure nel modello in funzione di temperatura e portata e verificandone l'output, come riportato in *Figura 4.18*.

VALORI DA INSERIRE					
	OSC [mg]	Temp. Monolita [°C]	Portata aria singola bancata [kg/h]		
1	1704	609	74	0,73	0,97
2	1710	650	74	0,76	0,97
3	1970	806	100	0,86	0,95
4	1783	699	100	0,79	0,95
5	1907	752	100	0,82	0,95
VALORI MODELLO					
	OSC [mg]	Temp. Monolita [°C]	Portata aria singola bancata [kg/h]		
1	1701	609	74		
2	1721	650	74		
3	1912	806	100		
4	1791	699	100		
5	1868	752	100		

Figura 4.18– Applicazione del modello per TOC di un TWC fresh

I fattori di portata e temperatura rappresentano i livelli di portata e temperatura a cui si trovano i punti sperimentali rispetto al valore di riferimento scelto per normalizzare i modelli di *OC-portata* e *OC-temperatura*. Gli output del modello

derivano da un'interpolazione bilineare della mappa *OC-temperatura-portata* di *Figura 4.19*.

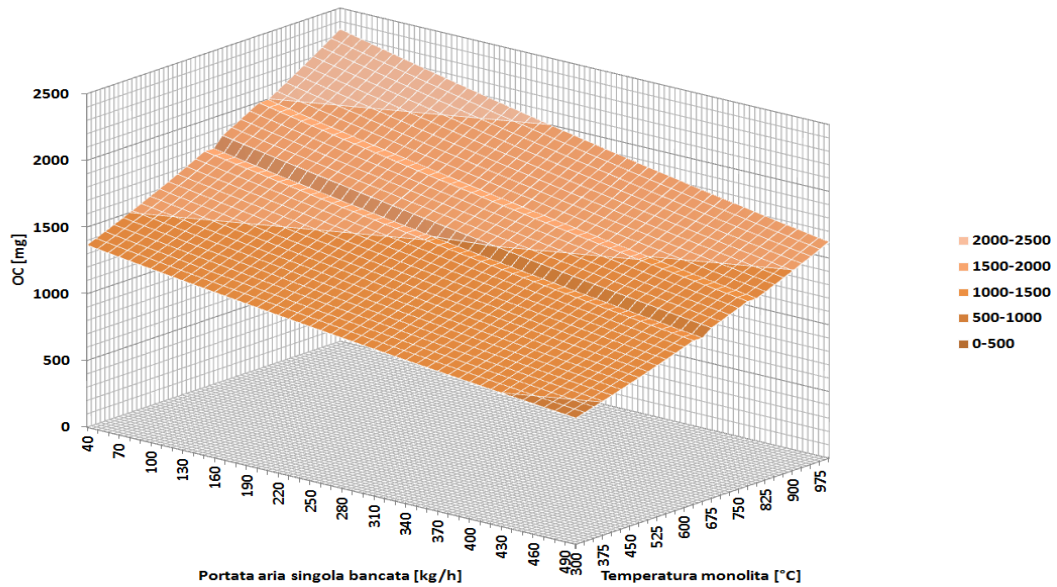


Figura 4.19– Modello TOC-temperatura-portata TWC fresh

La mappa in questo caso riporta l'andamento del TOC in funzione di portata e temperatura. Ogni punto sperimentale è in grado di generare una mappa di *OC-temperatura-portata* e la *Figura 4.19* è il risultato della media delle 5 mappe che si generano con i 5 punti sperimentali di TOC inseriti nel modello. Analogamente si riporta l'andamento di TNOC per il TWC fresh *Figura 4.21* risultato dei punti sperimentali di *Figura 4.20*.

VALORI DA INSERIRE					
	OSC [mg]	Temp. Monolita [°C]	Portata aria singola bancata [kg/h]	Fattore Temperatura	Fattore Portata
1	-1743	640	100	0,75	0,95
2	-1776	699	100	0,79	0,95
3	-1889	752	100	0,82	0,95
4	-2003	806	100	0,86	0,95
5	-2228	860	100	0,89	0,95
VALORI MODELLO					
	OSC [mg]	Temp. Monolita [°C]	Portata aria singola bancata [kg/h]		
1	-1708	640	100		
2	-1843	699	100		
3	-1922	752	100		
4	-1968	806	100		
5	-2054	860	100		

Figura 4.20– Applicazione del modello per TNOC di un TWC fresh

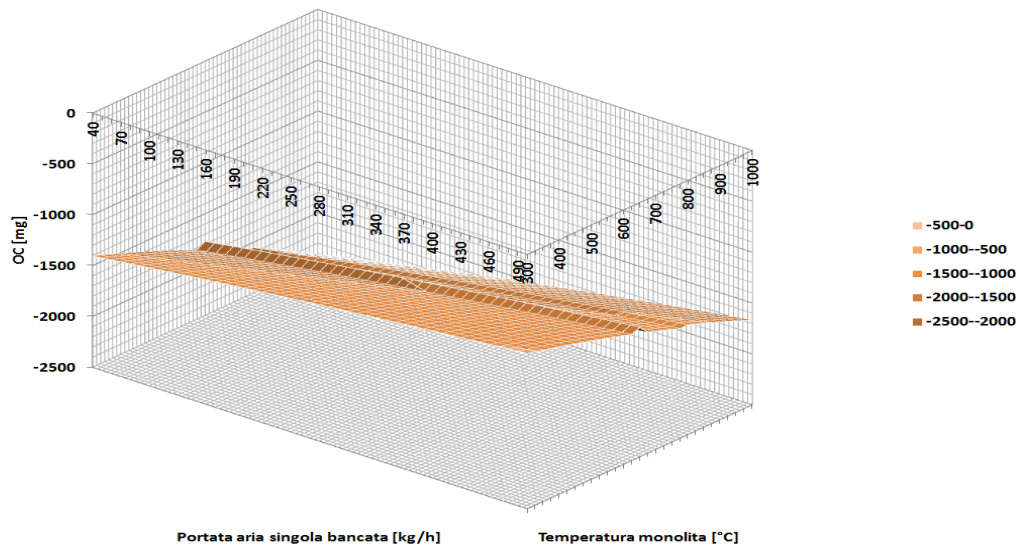


Figura 4.21– Modello TNOC-temperatura-portata TWC fresh

Per i dati sperimentali raccolti con il catalizzatore invecchiato si hanno dei valori assoluti di TOC e TNOC inferiori, ma a seguito dell'ipotesi iniziale in cui l'invecchiamento e la tipologia di catalizzatore non influenzano il modello di OC-temperatura-portata normalizzato, si può costruire con lo stesso layout gli andamenti di TOC e TNOC partendo dai 5 punti sperimentali di un TWC invecchiato. *Figura 4.22, 4.23, 4.24, 4.25.* Il modello di oxygen storage è dunque formato da quattro mappe che descrivono la capacità di immagazzinare ossigeno da parte del catalizzatore in condizioni di miscela entrante ricca, magra e in condizioni di catalizzatore fresh ed aged, quest'ultime interpolate da una curva di invecchiamento analoga a quella di *Figura 4.11.*

VALORI DA INSERIRE					
	OSC [mg]	Temp. Monolita [°C]	Portata aria singola bancata [kg/h]		
1	1189	939	428	Fattore Temperatura	Fattore Portata
2	1208	937	376	0,95	0,73
3	1143	832	290	0,95	0,76
4	1247	833	194	0,87	0,82
5	1323	823	151	0,87	0,88
				0,87	0,92
VALORI MODELLO					
	OSC [mg]	Temp. Monolita [°C]	Portata aria singola bancata [kg/h]		
1	1128	939	428		
2	1174	937	376		
3	1156	832	290		
4	1250	833	194		
5	1283	823	151		

Figura 4.22– Applicazione del modello per TOC di un TWC aged

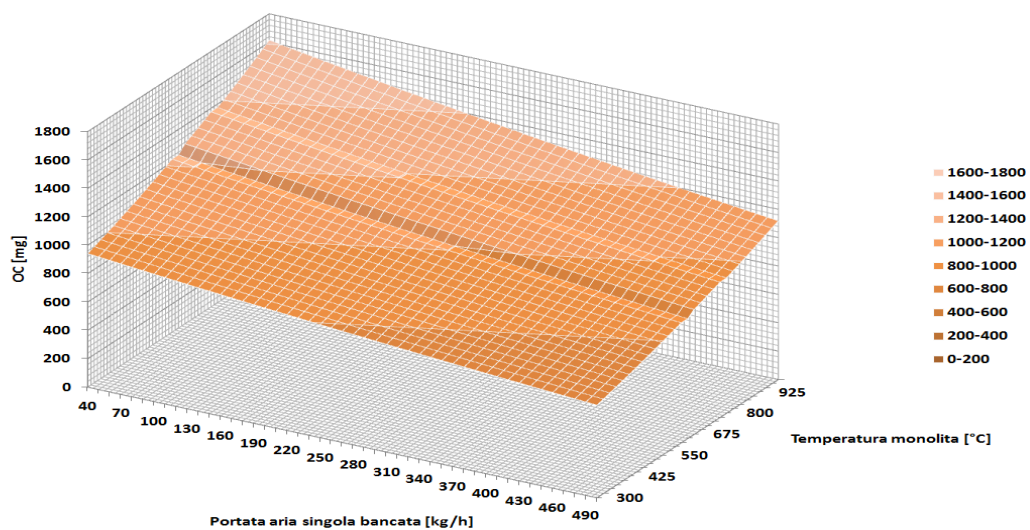


Figura 4.23– Modello TOC-temperatura-portata TWC aged

VALORI DA INSERIRE					
	OSC [mg]	Temp. Monolita [°C]	Portata aria singola bancata [kg/h]	Fattore Temperatura	Fattore Portata
1	-986	932	428	0,95	0,73
2	-1005	930	376	0,95	0,76
3	-1157	822	194	0,87	0,88
4	-1232	826	151	0,87	0,92
5	-1290	825	123	0,87	0,94

VALORI MODELLO			
	OSC [mg]	Temp. Monolita [°C]	Portata aria singola bancata [kg/h]
1	-1014	932	428
2	-1056	930	376
3	-1120	822	194
4	-1163	826	151
5	-1188	825	123

Figura 4.24– Applicazione del modello per TNOC di un TWC aged

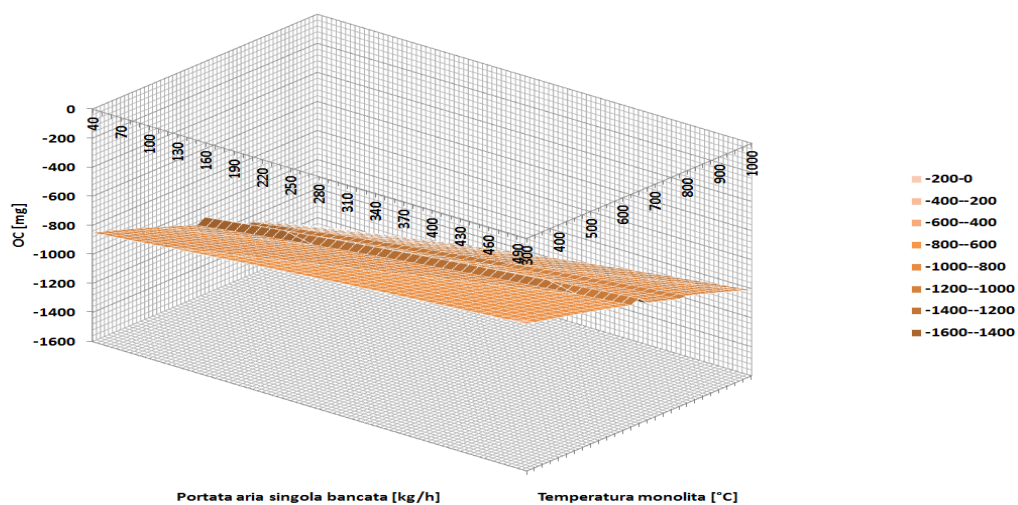


Figura 4.25– Modello TNOC-temperatura-portata TWC aged

Capitolo 5. Calibrazione di f_{lean} e f_{rich}

Dopo aver ottenuto nel quarto capitolo un modello di storage passiamo ora alla calibrazione delle funzioni di probabilità f_{lean} e f_{rich} che rappresentano la capacità del catalizzatore di filtrare il segnale lambda entrante, rispettivamente magro e ricco. Le ipotesi che vengono fatte sui parametri che influenzano queste due funzioni sono:

- Livello di riempimento del TWC \rightarrow ROC
- Temperatura del TWC
- Portata in massa dei gas entranti nel TWC
- Degrado del TWC

Per poter calibrare f_{lean} e f_{rich} occorre esplorare diversi livelli di ROC sia in condizioni di miscela entrante magra e ricca, diversi livelli di temperatura e portata e con catalizzatori nuovo e invecchiato. I test di OSC utilizzati per generare il modello di storage sembrano essere perfetti, in quanto contengono la dinamica di riempimento e svuotamento di ossigeno nel TWC effettuati come già visto a diversi livelli di temperatura e portata per un catalizzatore fresh ed uno aged. Riprendiamo le equazioni viste nel terzo capitolo, cercando di capire come realizzare un ottimizzatore in Matlab&Simulink in grado di generare le due curve di probabilità.

$$\frac{dROC}{dt} = 0.23 \cdot \dot{m}_{aria} \cdot \frac{(\lambda_{pre} - \lambda_{post})}{\lambda_{pre} \cdot \lambda_{post}}$$

$$\lambda_{post}(i + \tau) = \lambda_{pre}(i) - f_{prob} \cdot [\lambda_{pre}(i) - 1]$$

Il sistema è sempre composto da due incognite ma in questo caso sono la ROC e la funzione di probabilità f_{prob} in quanto useremo come lambda posteriore il segnale misurato dalla sonda UEGO montata dopo il TWC, ricordando la saturazione

dinamica applicata allo stesso per correggere la non corretta lettura a causa del picco di H2 in condizioni fortemente ricche (catalizzatore completamente vuoto di ossigeno). L'ottimizzatore che andremo a costruire dunque avrà come obiettivo quello di replicare il segnale lambda letto dalla sonda posteriore e corretto, utilizzando come leva proprio la funzione di probabilità. L'ottimizzazione dunque dovrà minimizzare una funzione costo così definita:

$$\min \rightarrow \text{abs} \left(\frac{\lambda_{post\ misu} - \lambda_{post\ simu}}{\lambda_{post\ misu}} \right)$$

L'output dell'ottimizzazione sarà la funzione di probabilità suddivisa in *f_lean* e *f_rich*, il segnale lambda simulato e il livello di ROC istantaneo.

5.1 Modello simulink per la calibrazione di *f_lean* e *f_rich*

Il modello simulink utilizzato per la costruzione delle due funzioni di probabilità riprende le equazioni viste nel terzo capitolo in cui partendo dal segnale lambda letto dalla sonda anteriore vengono inseriti:

- Il filtro del segnale dato dal catalizzatore
- Il tempo di trasporto che i gas di scarico impiegano ad arrivare alla lettura della sonda posteriore
- Il filtro del primo ordine rappresentativo della risposta della sonda posteriore

Il valore uscente istante per istante del segnale lambda posteriore simulato verrà poi confrontato con il segnale lambda misurato e corretto con la saturazione dinamica con l'obiettivo di minimizzarne l'errore fra il segnale modellato e quello misurato. Prima di entrare nel dettaglio di come lavora l'ottimizzatore andiamo a vedere come è stato costruito il modello di ogni singolo blocco simulink, ricordando che, per come lavora, il modello presenta dei blocchi che vengono ipotizzati linearmente indipendenti, anche se come si può facilmente intuire il segnale viene filtrato dal

catalizzatore nella stessa frazione di tempo in cui agisce il delay di trasporto fra la sonda LSU e LSF. Nel modello vale l'ipotesi di sovrapposizione degli effetti in cui prima agisce il filtro del segnale dato dalla dinamica del catalizzatore e poi il tempo di trasporto modellato con la legge dei gas perfetti ed infine il modello del primo ordine della sonda posteriore. Partendo dal contributo dato dal TWC, ricordiamo che vale il bilancio di massa fra l'eccesso di portata di ossigeno entrante ed uscente *Figura 5.1, 5.2*.

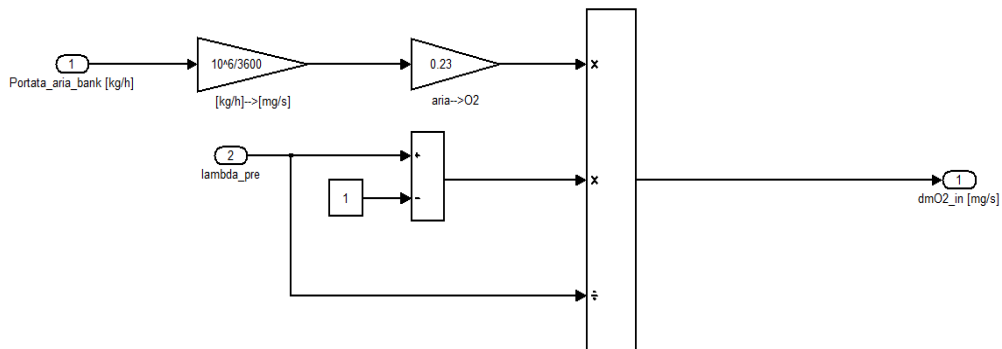


Figura 5.1– Eccesso di ossigeno entrante nel catalizzatore

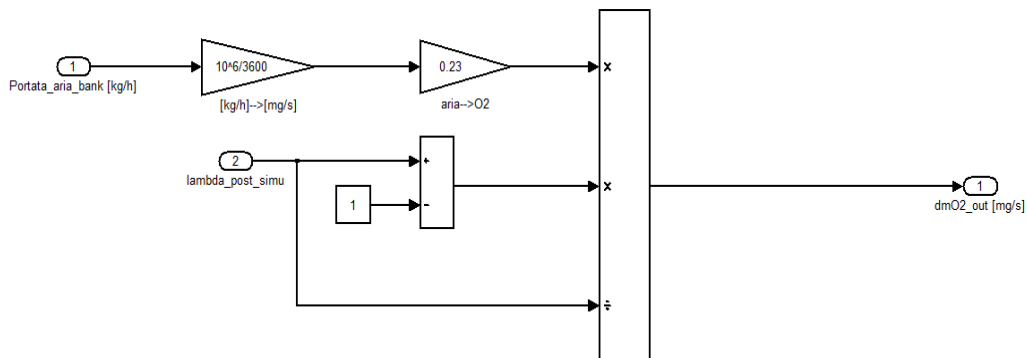


Figura 5.2– Eccesso di ossigeno uscente dal catalizzatore

Il segnale *lambda_pre* corrisponde al segnale lambda letto dalla sonda monte catalizzatore, mentre il segnale *lambda_post_simu* rappresenta il segnale lambda valle catalizzatore simulato. Il bilancio di massa dell'ossigeno presente nel

catalizzatore viene normalizzato al valore massimo che si differenzia in funzione della lambda entrante nel catalizzatore, *Figura 5.3*.

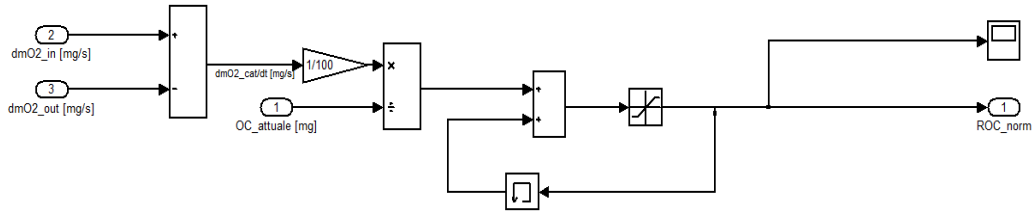


Figura 5.3– Bilancio della massa di ossigeno nel catalizzatore

Normalizzando il bilancio di massa al valore di OC istantaneo si può introdurre una saturazione statica con valore massimo unitario e valor minimo nullo. Infatti quando il catalizzatore si riempie o si svuota completamente di ossigeno il bilancio di massa non ha più ragion d'essere e di conseguenza il catalizzatore non è più in grado di filtrare il segnale lambda entrante il quale subirà unicamente il delay di trasporto ed il modello del primo ordine della sonda posteriore. Il valore iniziale inserito nel memory rappresenta la ROC normalizzata che si ha all'inizio dell'acquisizione, la quale per un test di OSC è facilmente deducibile dal pre condizionamento del segnale lambda imposto a monte del catalizzatore. Intuitivamente se l'acquisizione dei segnali incomincia durante il semi-periodo in ricco il catalizzatore risulterà vuoto di ossigeno cioè con una *ROC_norm* nulla e analogamente una *ROC_norm* unitaria in caso di start dell'acquisizione durante il pre condizionamento in magro del segnale lambda letto dalla UEGO. Il catalizzatore agisce sul segnale lambda entrante nel catalizzatore con la funzione di probabilità, che viene modellata con un vettore funzione della ROC normalizzata, *Figura 5.4*.

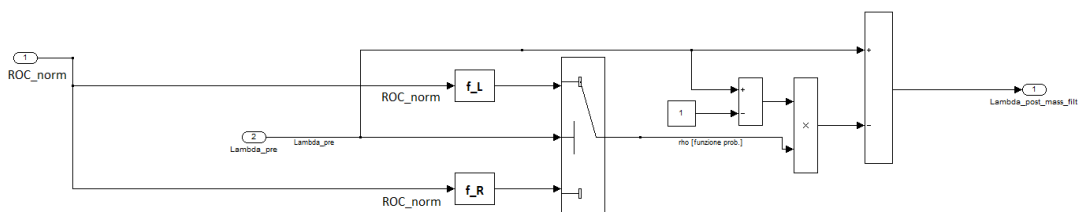


Figura 5.4– Filtraggio del segnale da parte del catalizzatore

A valle del filtro che il catalizzatore applica al titolo della miscela entrante applichiamo, attraverso il principio di sovrapposizione degli effetti il ritardo temporale legato al volume catalitico che separa la sonda LSU dalla LSF, modellato in simulink con un blocco unico riportato in *Figura 5.5*.

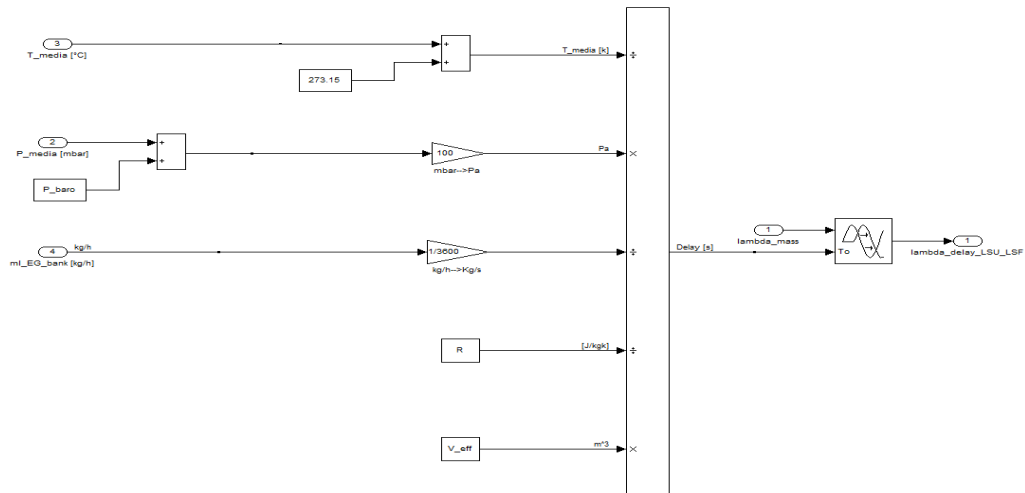


Figura 5.5– Ritardo di trasporto del gas nel volume catalitico

La temperatura media rappresenta il valor medio fra la temperatura monte e valle catalizzatore, entrambi letti da due termocoppie. Anche la pressione media deriva da due sensori montati prima e dopo il catalizzatore, ed entrambe le pressioni sono riferite alla pressione barometrica presente ed acquisita in quel momento nella cella motore. Il titolo della miscela entrante dopo aver subito un filtro dal catalizzatore ed aver ricevuto un delay temporale legato al volume catalitico viene letto alla sonda posteriore, la quale risponde come un filtro del primo ordine con la propria costante di tempo, riportato in *Figura 5.6*.

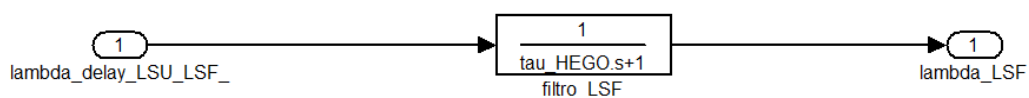


Figura 5.6– Filtro del primo ordine della sonda LSF

Il modello simulink appena descritto viene richiamato dalla funzione di Matlab che minimizza l'errore fra la lambda misurata e la lambda simulata a valle del catalizzatore, modificando iterativamente f_{lean} e f_{rich} . La funzione utilizzata è *fminsearch* la quale richiede una soluzione di primo tentativo di f_{lean} e f_{rich} "sensate". In *Figura 5.7* riportiamo le soluzioni di primo tentativo impiegate per un catalizzatore fresh ed uno aged.

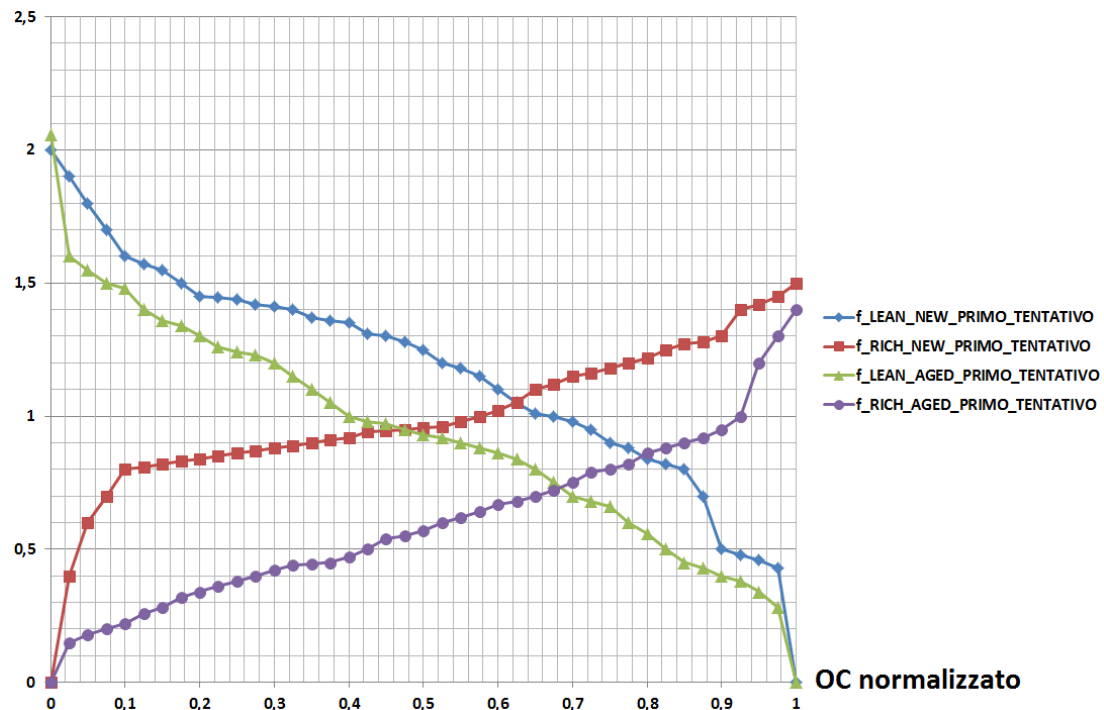


Figura 5.7– Soluzione di primo tentativo f_{LEAN} e f_{RICH} ,

Le due funzioni sono discretizzate con un vettore di ROC normalizzata che va da 0 ad 1 con uno step di riempimento del 2.5%. Lo step scelto per il vettore di ROC normalizzata deriva da un compromesso fra accuratezza della lambda simulata rispetto alla lambda misurata e lo sforzo computazionale che l'ottimizzatore richiede. La funzione f_{lean} ha un andamento decrescente con l'aumentare del livello di riempimento di ossigeno coerentemente con il fenomeno fisico di diminuzione della probabilità di immagazzinare ossigeno più ci si avvicina alla saturazione massima del catalizzatore. Infatti la f_{lean} si attiva in condizioni di miscela magra entrante quindi una miscela che possiede un eccesso di ossigeno potenzialmente stoccabile dal catalizzatore. La f_{rich} si attiva invece in condizioni di miscela ricca, e possiede un andamento crescente con l'aumento dell'ossigeno stoccato dal catalizzatore,

raggiungendo il suo valor massimo con catalizzatore completamente pieno di ossigeno. Anche questa curva è intuitivamente corretta in quanto un catalizzatore saturo di ossigeno, ricevendo una miscela ricca come input, tenderà a rilasciare ossigeno per ossidare HC e CO al massimo della sua efficienza, generando un effetto filtrante sul segnale in ingresso più rilevante. La funzione *fminsearch* riceve come input questi due vettori e iterativamente modifica tutti gli elementi di ogni vettore con l'obiettivo di minimizzare l'errore fra il segnale lambda misurato e quello simulato. Il comando *fminsearch* consente di trovare il minimo di una funzione costo di un problema non lineare, con l'accortezza di inserire una soluzione di primo tentativo vicina alla soluzione finale. Infatti utilizzando questa funzione di Matlab si potrebbe incappare in un minimo locale, portando l'ottimizzatore a convergere su una soluzione lontana da quella desiderata. Per ovviare a questo problema le soluzioni di primo tentativo sono state realizzate "manualmente", calibrando ogni breakpoint in modo tale da ottenere una lambda simulata di primo tentativo non troppo distante dalla lambda misurata con la sonda UEGO a valle del catalizzatore. Interessante evidenziare come già nelle soluzioni di primo tentativo le funzioni di probabilità differiscono per un catalizzatore fresh rispetto ad un catalizzatore aged. Il significato di questo scostamento sia per *f_lean* che *f_rich* è che un catalizzatore degradandosi non solo diminuisce la sua capacità di immagazzinare ossigeno ma anche la sua capacità di filtrare il segnale lambda entrate nel catalizzatore. La conferma di questa affermazione arriverà a ottimizzazione terminata. L'ottimizzatore durante le iterazioni modifica ogni breakpoint in modo tale da convergere alla soluzione obiettivo, con l'accortezza di forzare lo script ad escludere tutte le *f_lean* non monotone decrescenti e tutte le *f_rich* non monotone crescenti. L'ottimizzatore è stato impostato con una tolleranza di $1e-5$ come valore target per il raggiungimento della convergenza.

5.1.1 *f_lean* e *f_rich* per un catalizzatore fresh

Applicando l'ottimizzatore nei test di OSC per il catalizzatore fresh, in cui erano stati effettuati gli sweep di temperatura, vediamo i risultati che si sono ottenuti applicando le due funzioni probabilistiche di primo tentativo e quello che si è ottenuto dopo l'ottimizzazione.

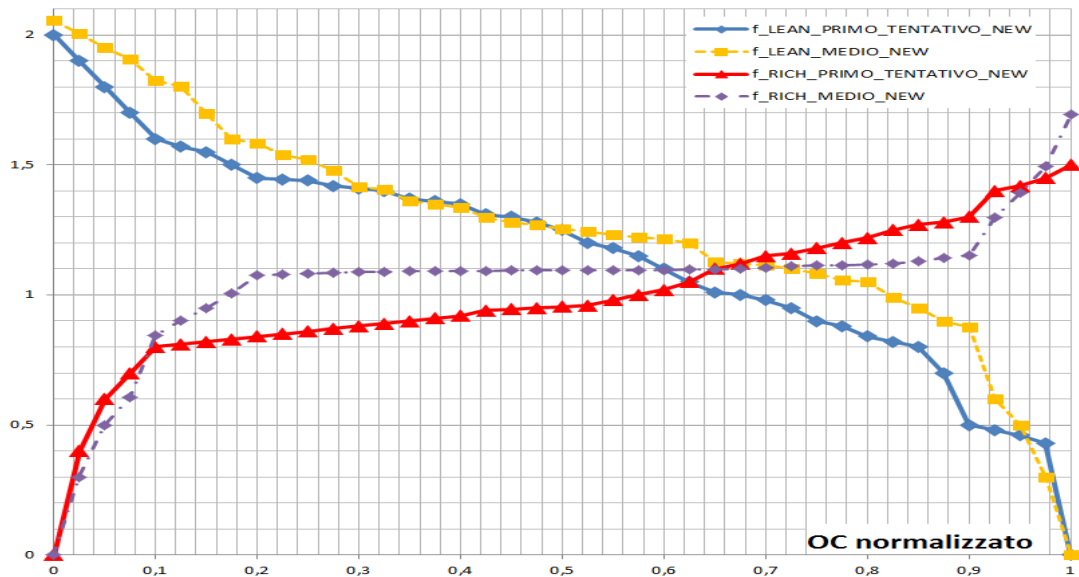


Figura 5.8– TWC fresh: f_{LEAN} e f_{RICH} prima e dopo ottimizzazione

Lo script in Matlab ha portato ad una variazione delle due funzioni f_{LEAN} e f_{RICH} cercando di minimizzare l'errore fra il segnale misurato e quello modellato dopo il catalizzatore. Confrontando i risultati che si sono ottenuti in termini di lambda si nota in *Figura 5.9* un netto miglioramento del segnale lambda modellato e ottimizzato rispetto a quello “grezzo” ottenuto con le soluzioni di primo tentativo.

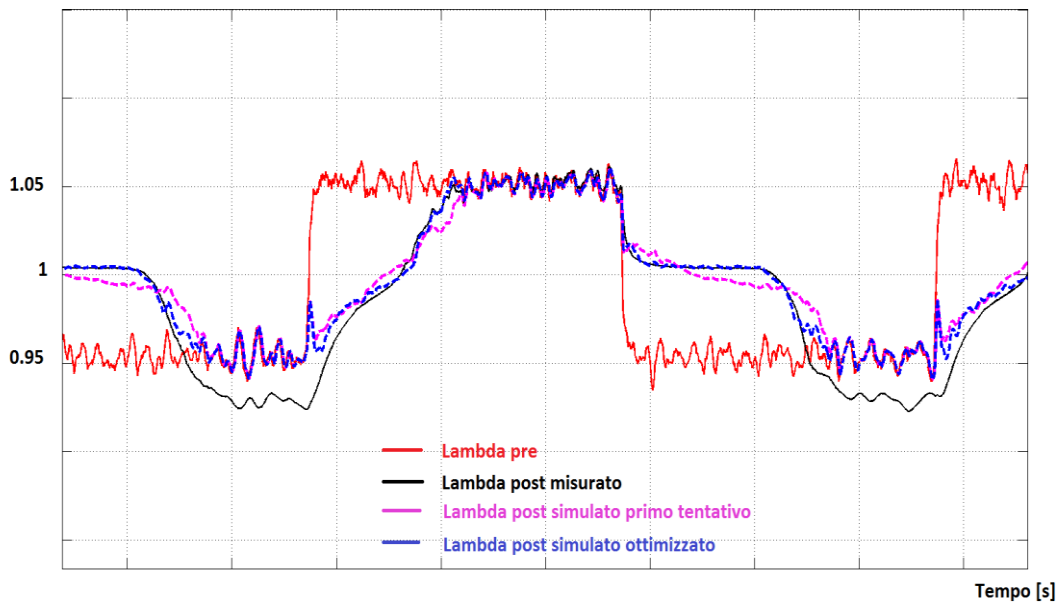


Figura 5.9– TWC fresh: lambda posteriore modellata e ottimizzata

L'ottimizzazione è stata effettuata su diversi test di OSC in cui veniva fatta variare la temperatura del monolita, mantenendo costante la portata di aria nel motore.

L'obiettivo era quello di capire se le curve probabilistiche, ovvero i fattori correttivi che la dinamica del TWC applica al segnale lambda entrante vengano influenzati in qualche modo dalla temperatura. Infatti le curve probabilistiche di *Figura 5.8* ottimizzate sono il risultato di una media delle diverse curve probabilistiche che si sono ottenute nei diversi test di OSC, partenti tutte dalla medesima soluzione di primo tentativo. In *Figura 5.10 e 5.11* si riporta i risultati delle curve probabilistiche a diversa temperatura monolita.

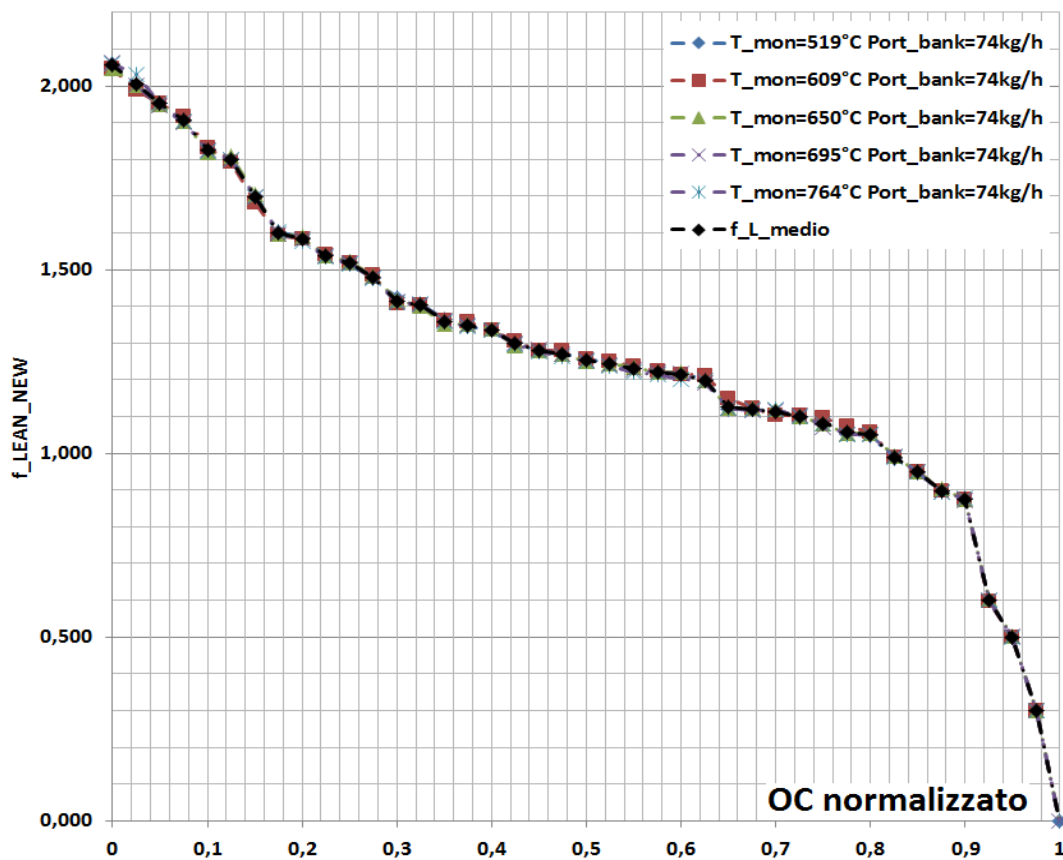


Figura 5.10– f_{LEAN} ottimizzato a diverse temperature monolita

La temperatura non interferisce con la funzione che apporta correzioni alla lambda entrante magra infatti l'ottimizzazione riporta sostanzialmente le stesse curve di f_{LEAN} . Di seguito si riporta i risultati relativi alla curva che applica la correzione in condizioni di lambda entrante ricca.

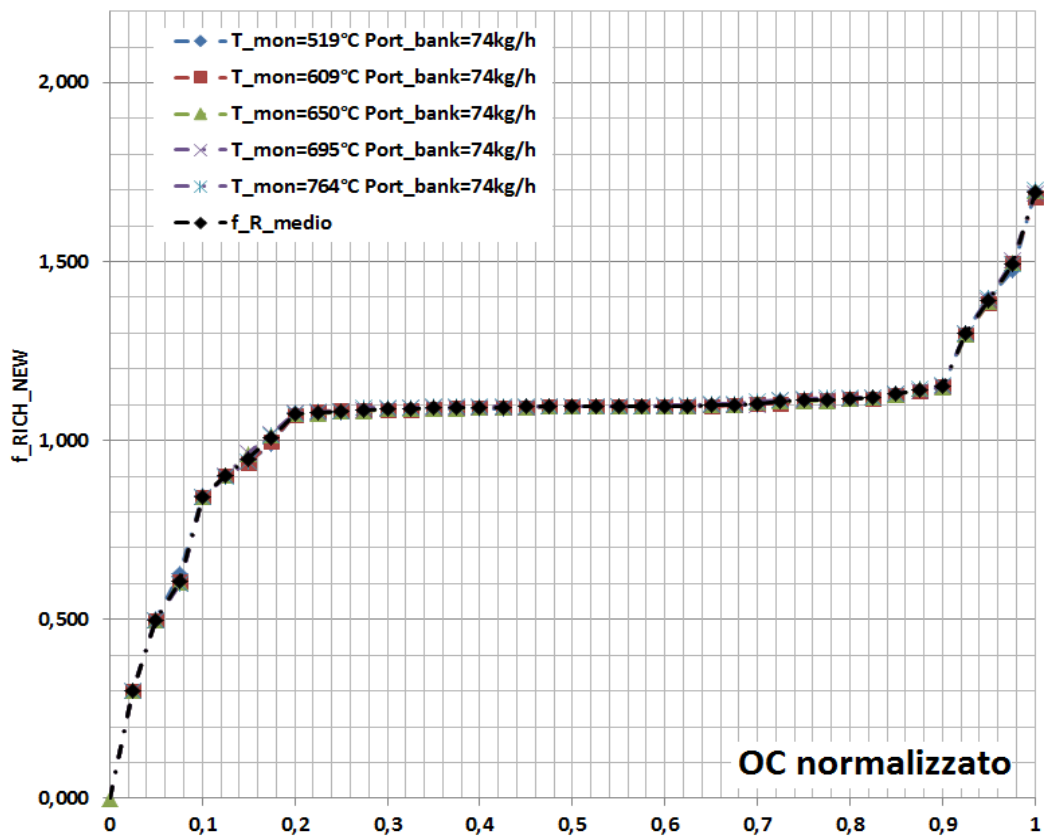


Figura 5.11– f_RICH ottimizzato a diverse temperature monolita

Anche in questo caso la temperatura non influisce nella correzione del segnale lambda entrante, portando alla conclusione che solo l'OC varia in funzione della temperatura. Questo implica che nei grafici appena presentati l'asse x, riportato in condizioni normalizzate, alle diverse temperatura sarebbe variabile se non fosse normalizzato al valore massimo di ogni prova. Entrando nel dettaglio del fenomeno, risulta interessante andare a vedere come si comporta il segnale lambda posteriore durante lo step rich-lean e lean-rich della sonda anteriore. Inoltre il modello genera un output del livello istantaneo di ossigeno contenuto nel catalizzatore, che intuitivamente presenta una dinamica di riempimento durante lo step in magro del titolo entrante, ed una dinamica di svuotamento durante lo step in ricco della miscela entrante.

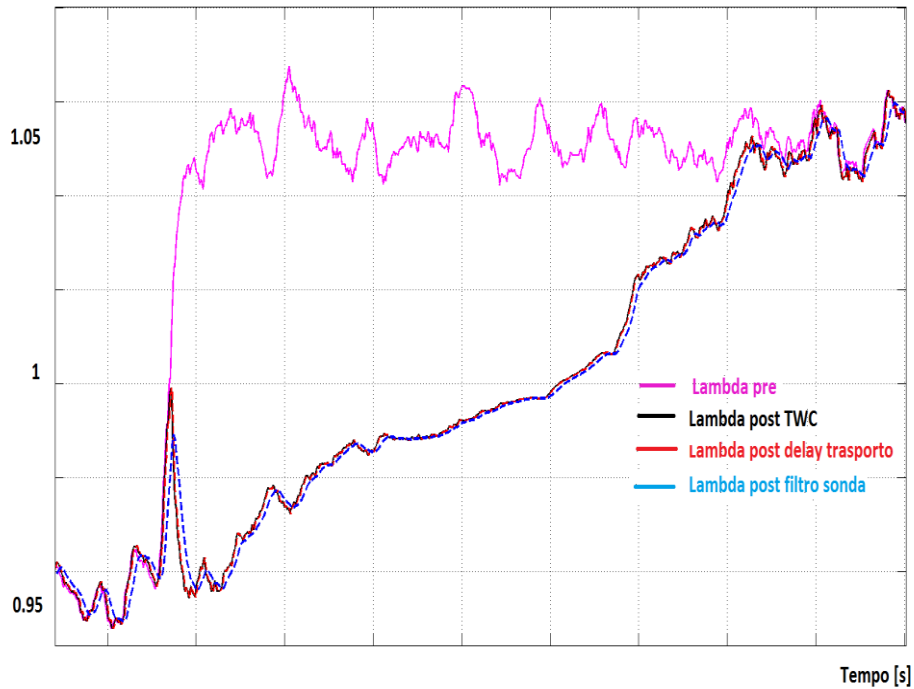


Figura 5.12– Step rich-lean per un catalizzatore fresh

In *Figura 5.12* il catalizzatore a fronte di una variazione di titolo da ricco a magro inizialmente il titolo della miscela uscente replica il segnale entrante a meno del delay di trasporto e del filtro del primo ordine della sonda posteriore. Questo tipo di andamento risulta coerente con il fenomeno fisico, in cui fino a quando non è presente ossigeno in ingresso al catalizzatore, esso risulta “inattivo” sulla correzione del segnale entrante. Sempre in *Figura 6.2* vengono messi a confronto i tre contributi che trasformano il segnale di lambda entrante nel segnale lambda uscente letto dalla sonda posteriore. Il maggior contributo è sicuramente dato dal catalizzatore, il quale è in grado di applicare correzioni tali da generare miscele ricche in uscita dal catalizzatore a fronte di miscele magre entranti nel catalizzatore stesso. Il delay temporale legato alla velocità del flusso che attraversa il TWC applica uno shift di qualche centesimo di secondo, mentre il filtro del primo ordine che la sonda applica al segnale letto genera l’output finale del modello che è stato messo a confronto con la misura effettuata durante i test a banco motore e successivamente ottimizzata. Si riporta in *Figura 5.13* la dinamica lean-to-rich della miscela entrante sempre per un catalizzatore fresh.

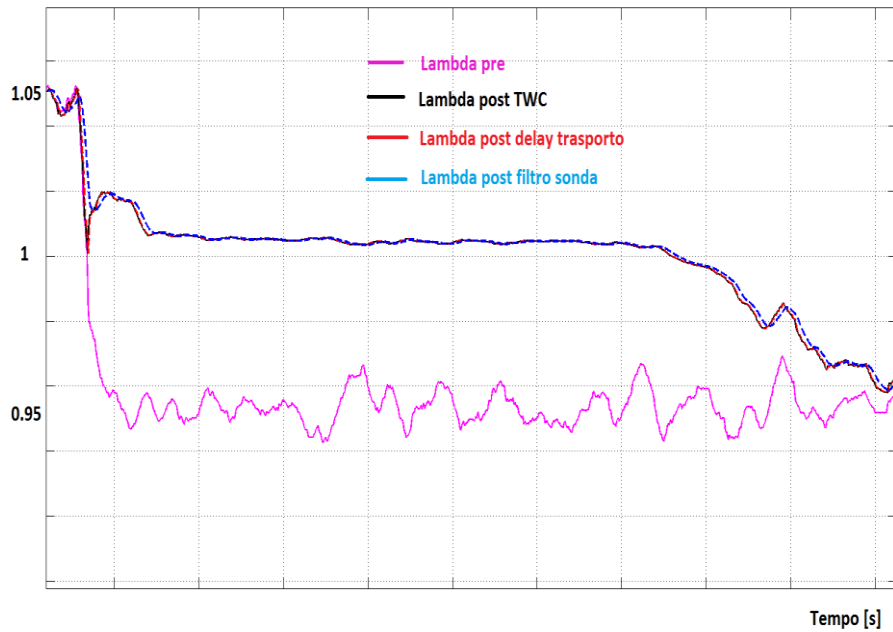


Figura 5.13– Step lean-to-rich per un catalizzatore fresh

Anche in questo caso il maggior contributo al segnale entrante viene dato dal catalizzatore, il quale apporta correzioni tali da generare un titolo magro a fronte di un titolo ricco entrante. La dinamica di riempimento e svuotamento del catalizzatore viene riportata in *Figura 5.14*, insieme al segnale lambda entrante ed uscente.

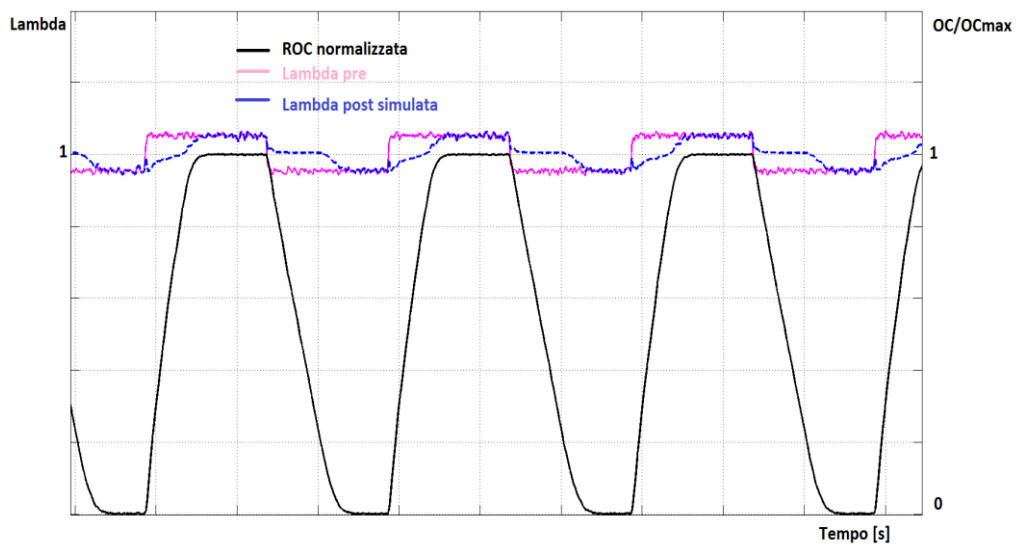


Figura 5.14– Dinamica di riempimento e svuotamento per un TWC fresh

I risultati mostrano come il catalizzatore raggiunga il valore massimo di riempimento nel momento in cui il segnale lambda uscente coincide, a meno del ritardo di trasporto e del filtro del primo ordine della sonda posteriore, con il segnale lambda entrante, durante il transitorio in magro. Analogamente durante il transitorio in ricco il catalizzatore termina la sua dinamica di svuotamento quando i due segnali coincidono. Nel paragrafo successivo andiamo a vedere come si comporta un catalizzatore invecchiato, soprattutto in termini di curve correttive che presentavano delle soluzioni di primo tentativo decisamente diverse rispetto ad un catalizzatore fresh.

5.1.2 f_{lean} e f_{rich} per un catalizzatore aged

Applicando l'ottimizzatore nei test di OSC per il catalizzatore invecchiato a banco motore, in cui erano stati effettuati gli sweep di portata, i risultati che si sono ottenuti applicando le due funzioni probabilistiche di primo tentativo e quello che si è ottenuto dopo l'ottimizzazione vengono riportate in *Figura 5.15*.

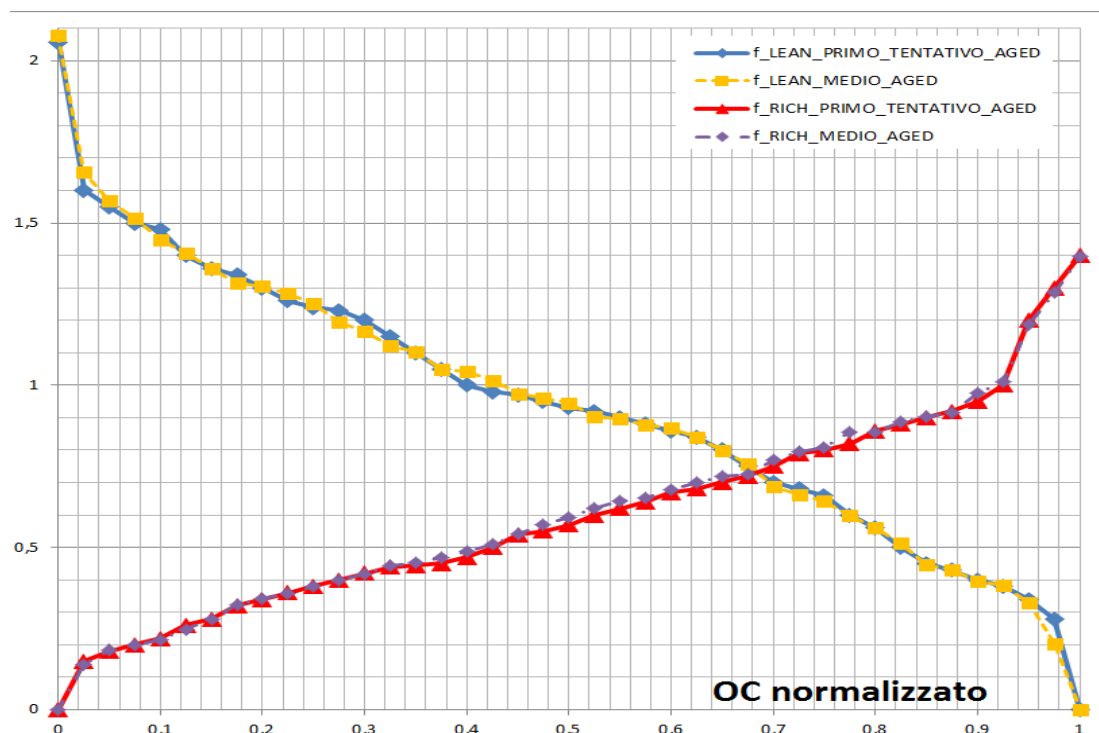


Figura 5.15– TWC aged: f_{LEAN} e f_{RICH} prima e dopo ottimizzazione

In questo caso la funzione di probabilità di primo tentativo sia in condizioni di miscela entrante magra che ricca presenta dei valori molto vicini ai risultati ottimizzati. Come termine di confronto si riporta la lambda misurata e la lambda simulata prima e dopo l'ottimizzazione, *Figura 5.16*.

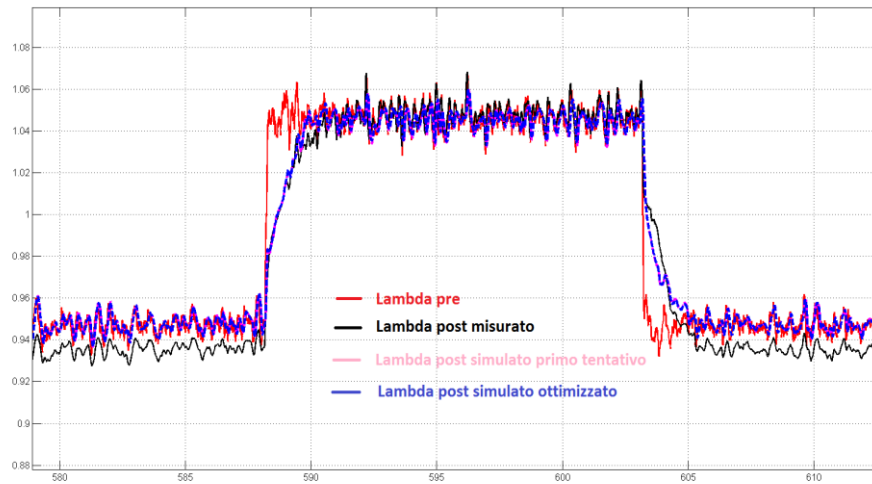


Figura 5.16– TWC aged: lambda posteriore modellata e ottimizzata

La curva di primo tentativo in questo caso rappresenta già una buona approssimazione del segnale misurato. Interessante evidenziare come l'andamento del segnale sia durante lo step rich-to-lean che lean-to-rich del segnale a valle del catalizzatore sia molto diverso rispetto a quello che si era visto per un catalizzatore fresh. Nel dettaglio si riporta in *Figura 5.17* la transizione ricco magro e in *Figura 5.18* la transizione magro ricco.

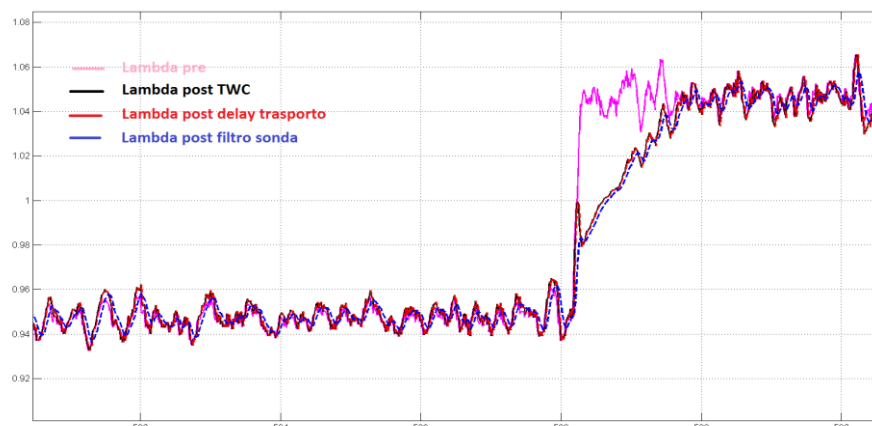


Figura 5.17– Step rich-lean per un catalizzatore aged

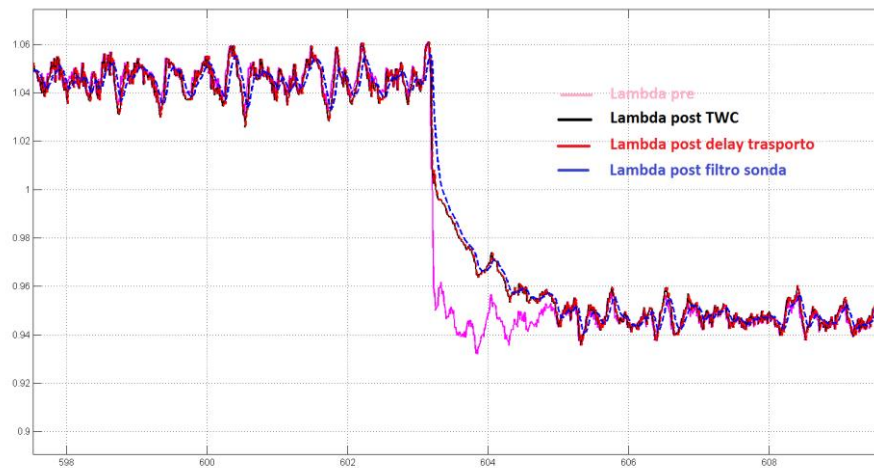


Figura 5.18– Step lean-to-rich per un catalizzatore aged

Quindi, a parità di sonda posteriore, un catalizzatore invecchiato non solo riduce la sua capacità massima di stoccaggio dell'ossigeno ma anche la sua capacità di modificare il segnale lambda entrante. Una verifica ulteriore si ha confrontando le funzioni di probabilità f_{LEAN} e f_{RICH} per un catalizzatore fresh rispetto ad un catalizzatore invecchiato, *Figura 5.19 e 5.20*.

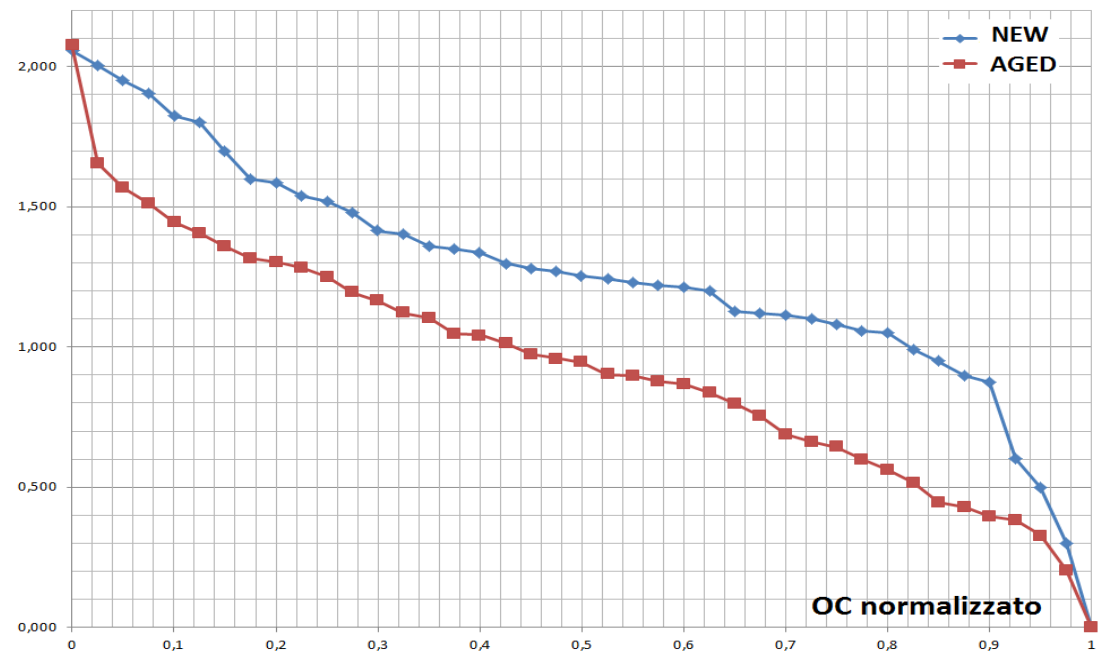


Figura 5.19– f_{LEAN} per TWC fresh e aged

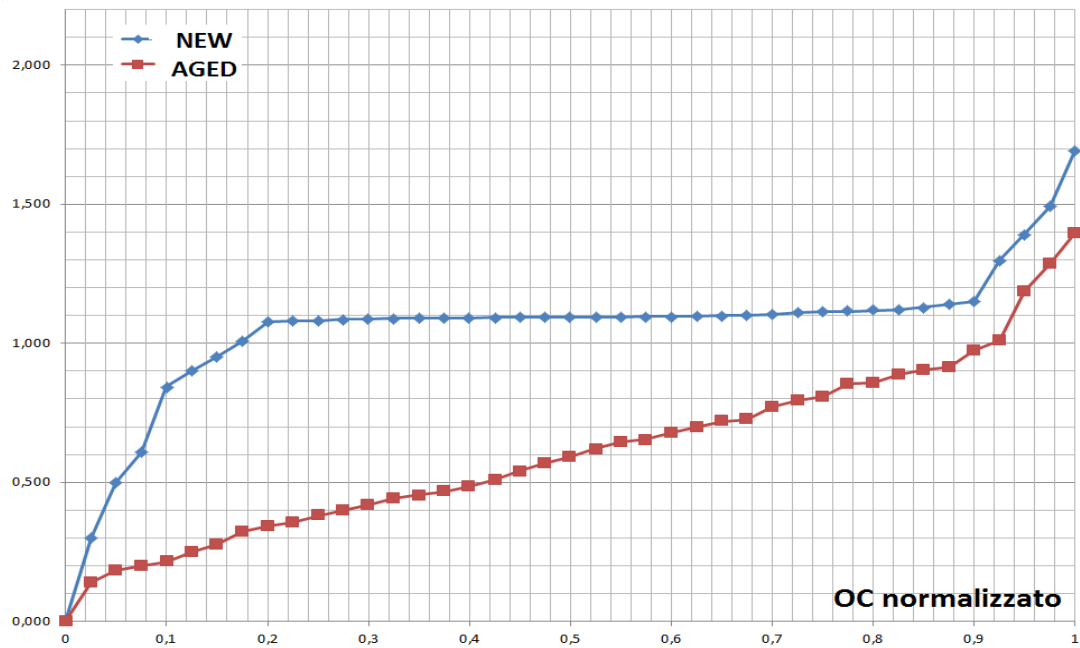


Figura 5.20– f_{RICH} per TWC fresh e aged

Un catalizzatore invecchiato riduce la sua capacità di immagazzinare ossigeno e risulta perciò interessante valutarne la sua dinamica di riempimento e svuotamento in un test di OSC, *Figura 5.21*. A parità di step di lambda entrante un catalizzatore invecchiato impiega meno tempo a raggiungere la saturazione di ossigeno, o lo svuotamento completo rispetto ad un catalizzatore fresh.

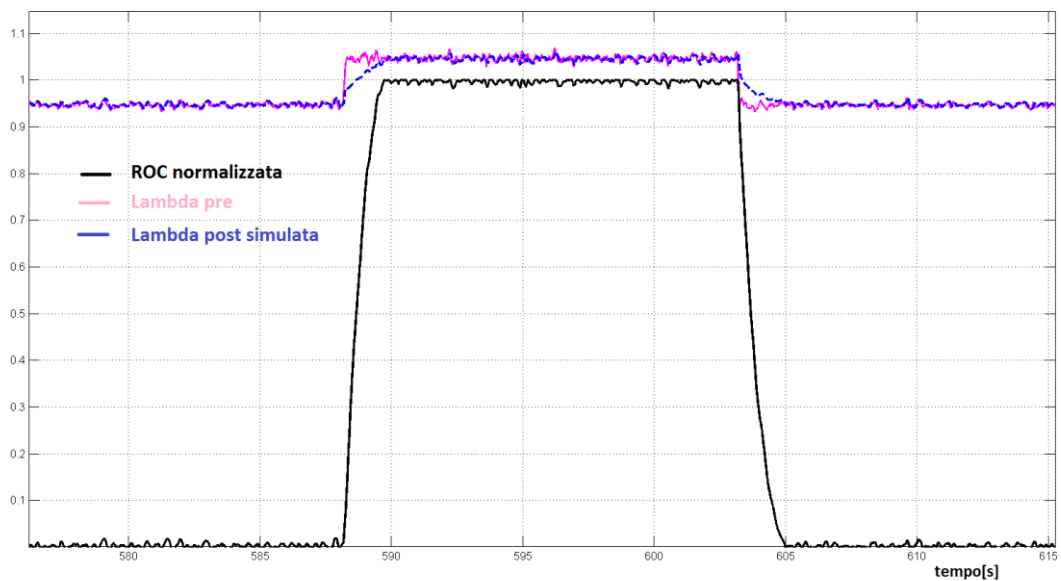


Figura 5.21– Dinamica di riempimento e svuotamento per un TWC aged

Capitolo 6. Conclusioni e sviluppi futuri

Il modello è stato calibrato con i test di OSC che operano uno step di lambda entrante nel catalizzatore da 0.95 a 1.05. Riportiamo un confronto finale fra la lambda uscente dal catalizzatore misurata da una sonda lineare, quella ottenuta dal ricalcolo della tensione letta da una sonda ON-OFF e quella simulata, *Figura 6.1*.

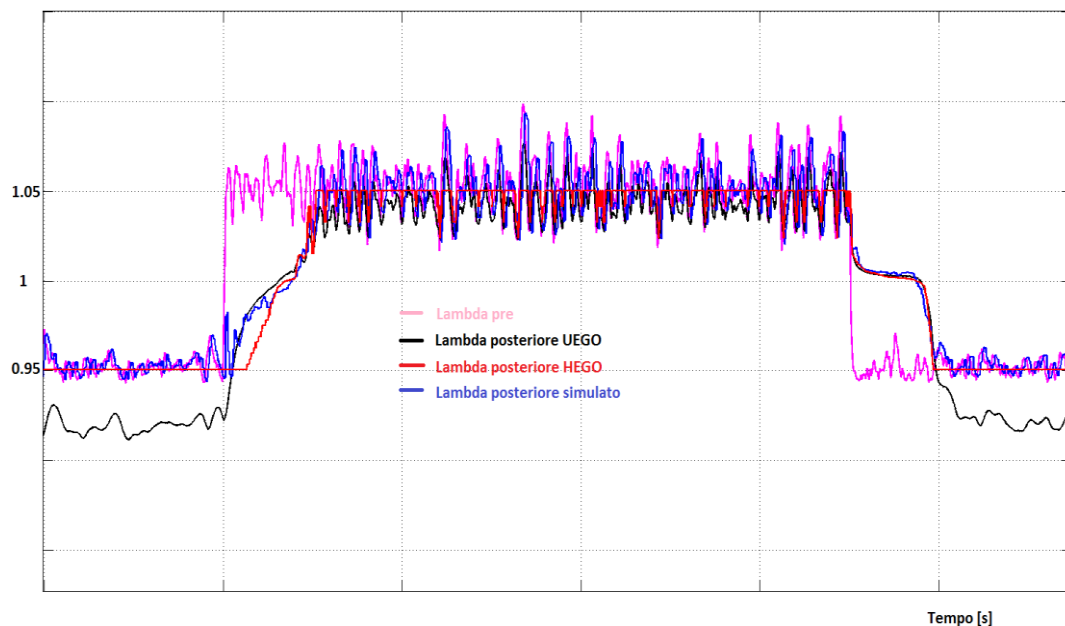


Figura 6.1– Confronto sensore UEGO, HEGO e segnale simulato

Durante il pre-condizionamento in ricco della miscela la sonda lineare legge un valore di lambda di circa 0.92, fenomeno come detto legato alle reazioni di WGS e SR. Invece la sonda HEGO ricalcola dalla tensione un valore di lambda che va a saturarsi a 0.95 ovvero il limite inferiore della caratteristica ma che raggiungerebbe in egual modo un valore più ricco rispetto al risultato atteso, se si estrapolasse a valori di tensione più elevati. Questo fenomeno non viene evidenziato dal modello in quanto, essendo basato su un bilancio di massa dell'ossigeno immagazzinato dal catalizzatore, non genera miscele uscenti dal catalizzatore più ricche di quelle entranti. Durante lo step rich-to-lean, *Figura 6.2*, si evidenzia uno scostamento fra i due segnali misurati, probabilmente legato ad una caratteristica tensione-lambda

poco accurata. Ritenendo dunque il segnale generato dalla UEGO come un segnale attendibile (WGS e SR ormai trascurabili), si è ottimizzato il modello cercando di minimizzare l'errore con il segnale dato dalla sonda lineare.

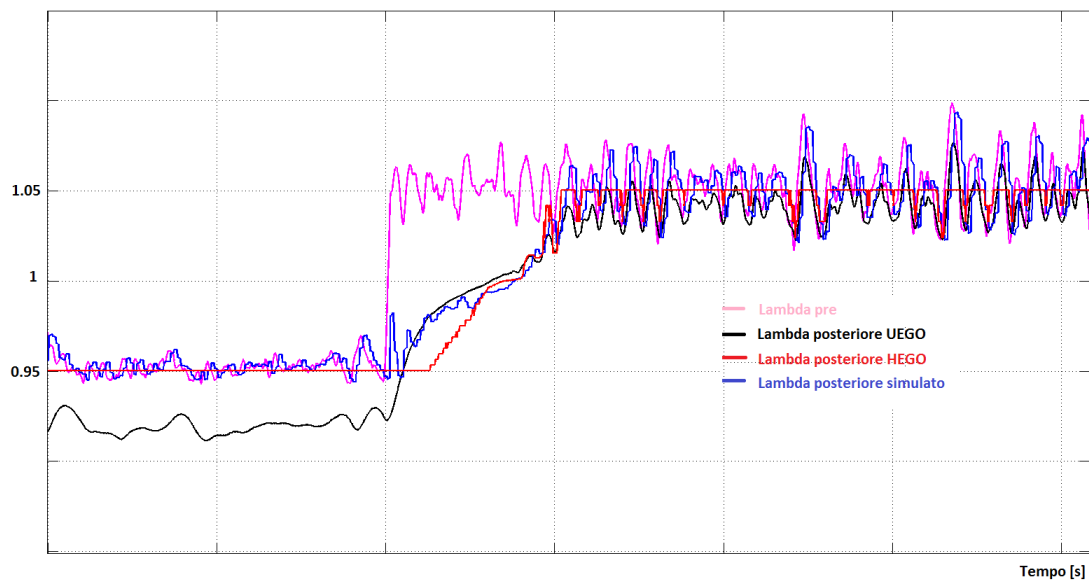


Figura 6.2– Step rich-to-lean confronto segnali UEGO ed HEGO con modello

Durante lo step lean-to-rich i segnali misurati presentano una dinamica sostanzialmente analoga e il modello a valle dell'ottimizzazione riesce ad inseguire bene la dinamica di svuotamento del catalizzatore, *Figura 6.3*.

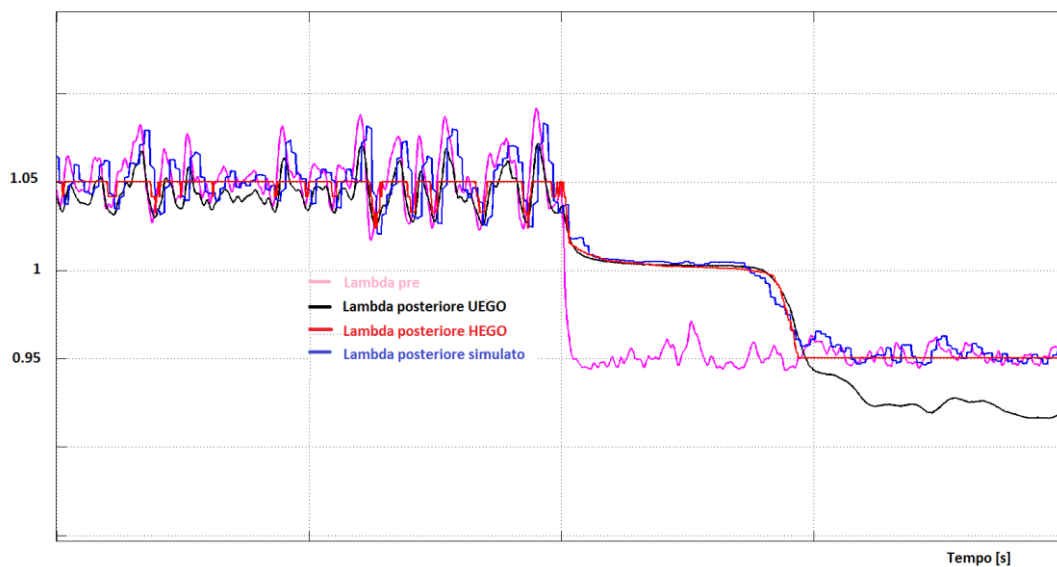


Figura 6.3– Step lean-to-rich confronto segnali UEGO ed HEGO con modello

Il campo di lambda monte e valle catalizzatore esplorato durante un test di OSC differisce rispetto ai valori di lambda normalmente presenti durante una missione della vettura. In *Figura 6.4, 6.5* si riporta a titolo di esempio la statistica delle lambda anteriori e posteriori presenti nel tratto EUDC.

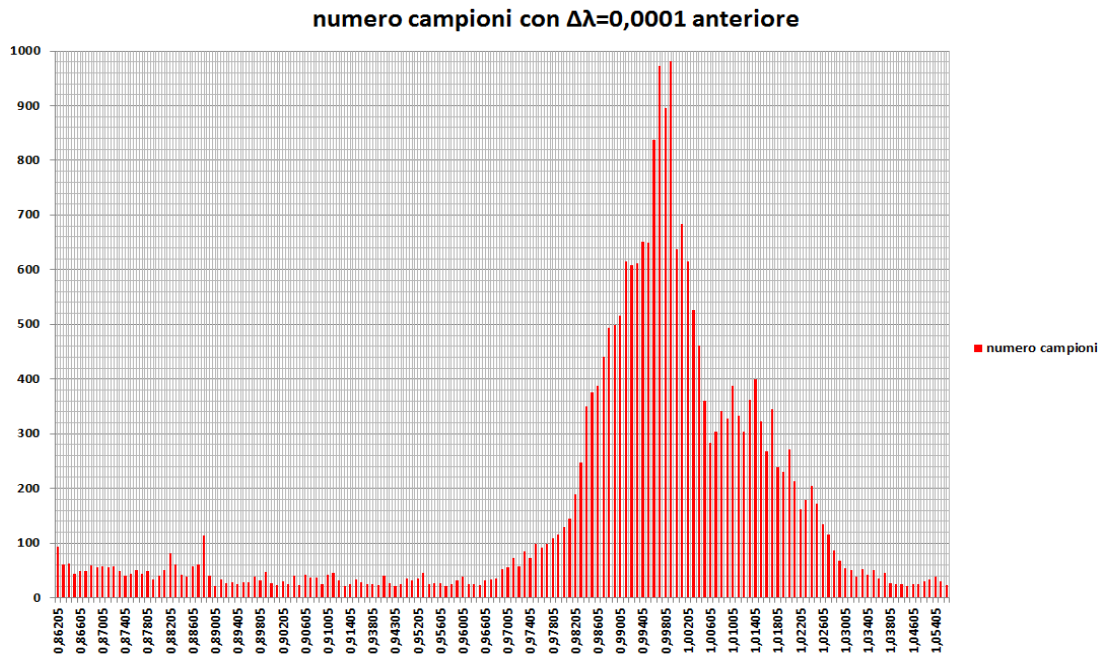


Figura 6.4– Statistica delle lambda monte TWC nel ciclo EUDC

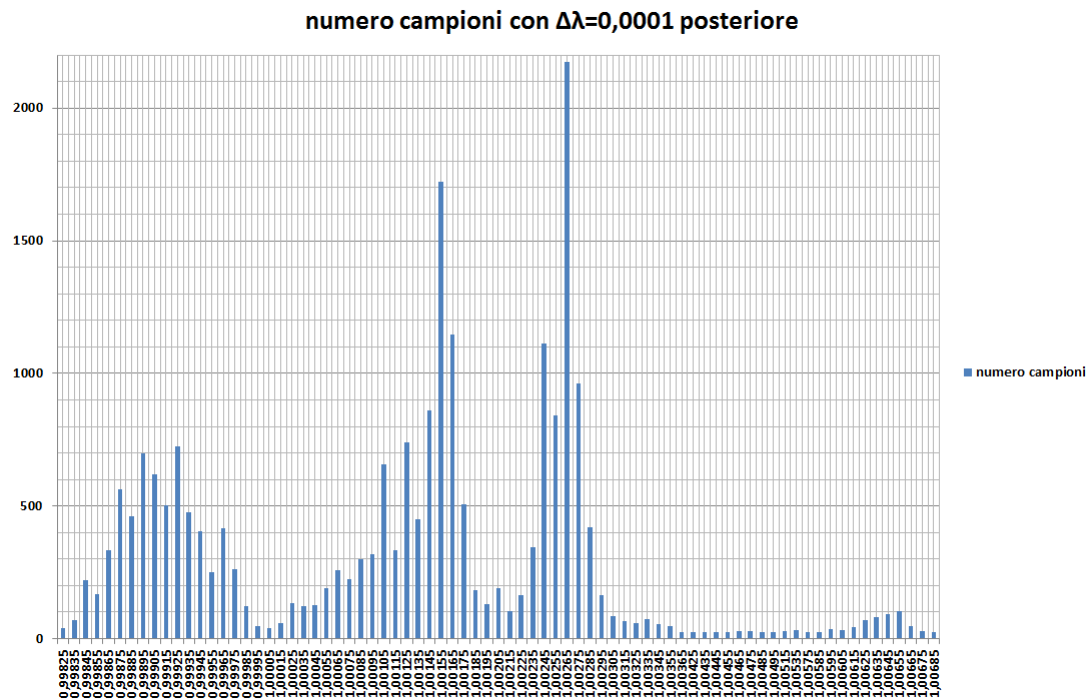


Figura 6.5– Statistica delle lambda valle TWC nel ciclo EUDC

Confrontando questa statistica con quella di un test di OSC, *Figura 6.6 e 6.7*, la differenza è sostanziale.

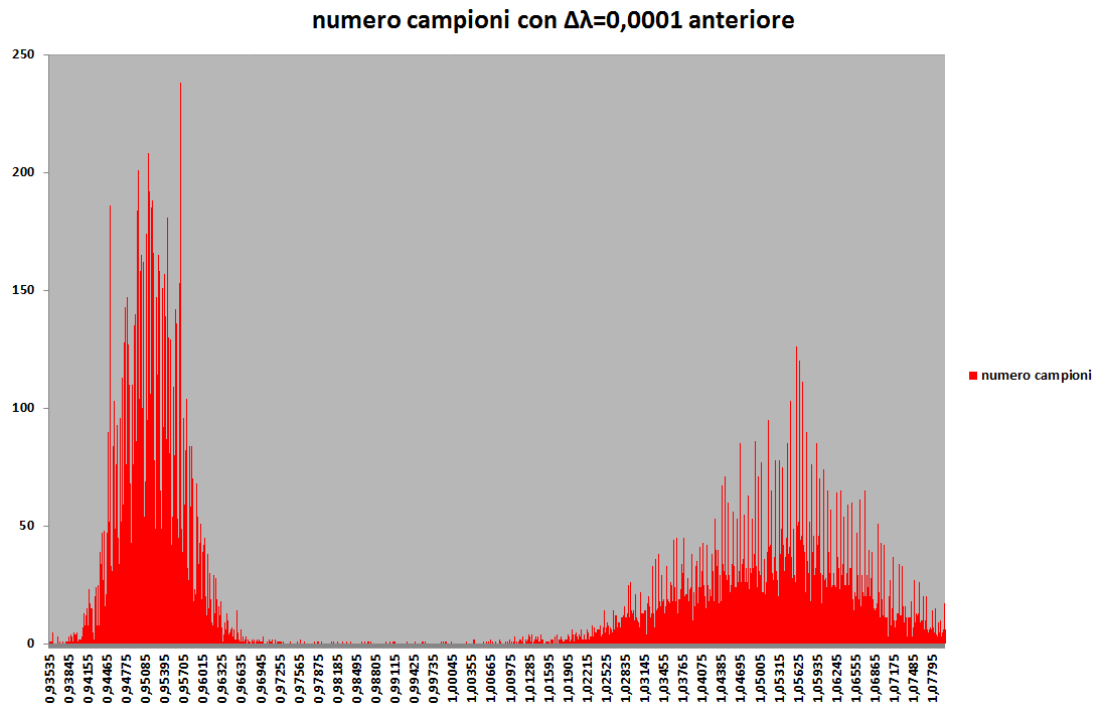


Figura 6.6– Statistica delle lambda monte TWC nel test di OSC

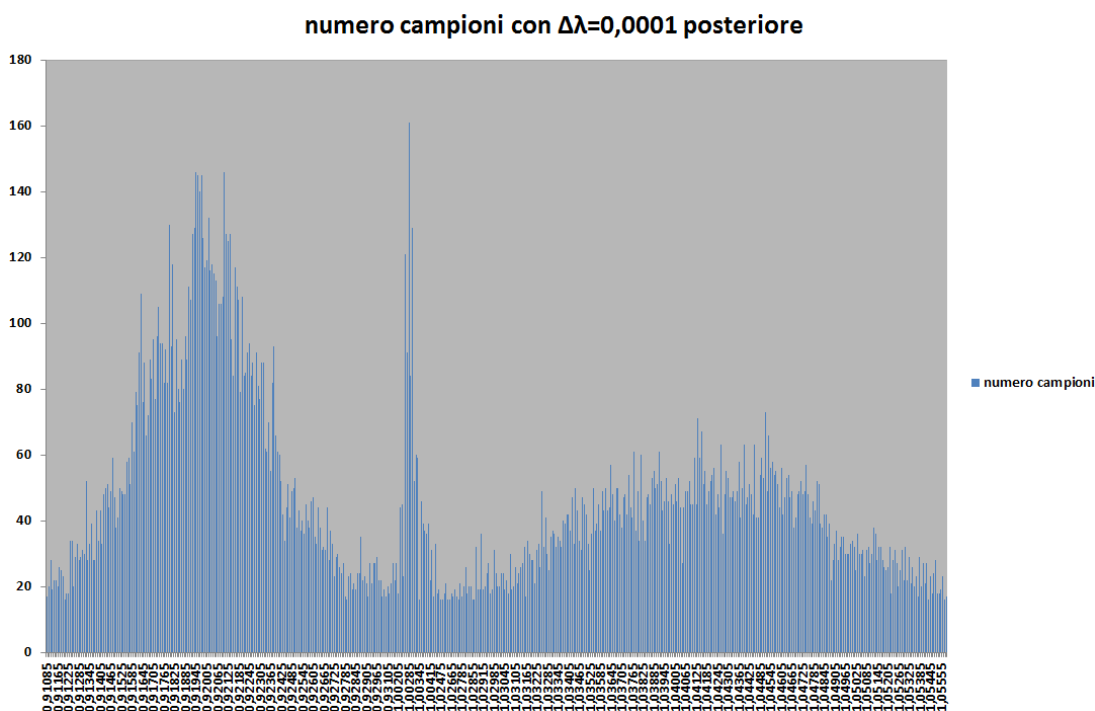


Figura 6.7– Statistica delle lambda valle TWC nel test di OSC

Il motivo per cui si è scelto di avere delle transizioni di lambda da 0.95 a 1.05 è quello di garantire un completo svuotamento e riempimento di ossigeno dal catalizzatore. Ogni cilindro genera uno “sbuffo” di gas di scarico che presenta un lambda medio differente dagli altri cilindri e che alla lettura della sonda provocano un’oscillazione considerevole. Infatti il segnale oscilla attorno al target con un’ampiezza che potrebbe temporaneamente portare la sonda a leggere magro durante il condizionamento ricco, invalidando così il test di OSC. Per evitare questa transizione indesiderata si sono adottati appunto due valori di ricco e magro sufficientemente distanti dal valore unitario di lambda. Questo modo di operare però è in contrapposizione con i lambda effettivamente presenti nella missione della vettura o meglio, nelle zone in cui il controllo posteriore lavora. Una possibile soluzione è quella di cercare di ridurre al minimo la transizione ricco-magro cercando di portarsi a bande di 0.97 e 1.03 o addirittura 0.98 e 1.02. L’accortezza da prendere in questi casi sarà quella di assicurarsi che durante il condizionamento in ricco o in magro non ci sia un’inversione di titolo della miscela a causa dell’ampiezza delle oscillazioni lette dalla sonda UEGO monte catalizzatore, da verificare durante l’acquisizione. Approfondendo questo aspetto, abbiamo invertito il modello partendo dal segnale letto dalla sonda posteriore, fino a calcolare il fattore correttivo che il TWC deve applicare. Nel seguente paragrafo andiamo a esplicitare questo concetto.

6.1 Inversione del modello del catalizzatore

I segnali a disposizione durante i test sono:

- Segnale lambda monte catalizzatore con sonda UEGO
- Segnale lambda valle catalizzatore con sonda UEGO

L’idea è quella di partire dal segnale lambda misurato a valle del TWC e applicare le seguenti correzioni:

- Inversione del modello del primo ordine del filtro che sonda applica al titolo letto, in modo tale da spostarsi dal segnale letto al titolo teoricamente presente nei gas di scarico
- Applicazione del delay temporale negativo, utilizzando sempre la legge dei gas perfetti
- Calcolo del fattore correttivo che il TWC applica al segnale de-filtrato e depurato dal delay temporale funzione del volume che è presente fra le due sonde.

Per de-filtrare il segnale ricordiamo che il filtro del primo ordine che la sonda applica può essere schematizzato nel seguente modo:

$$G(s) = \frac{U}{I} = \frac{A/F_{\text{misurato}}(s)}{A/F_{\text{reale}}(s)} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1}$$

Quindi risulta immediatamente che l'ingresso I, è legato all'uscita U nel seguente modo:

$$I = U + U \cdot \tau s$$

Convertendo l'espressione nel dominio del tempo si ottiene:

$$i = u + \tau \frac{du}{dt}$$

Ragionando in termini di campioni, si ha che con un tempo di campionamento pari al *time step* con cui vengono acquisiti i segnali, l'ingresso al campione k-esimo è pari a:

$$I(k) = U(k) + \tau \frac{U(k) - U(k - 1)}{\text{time_step}}$$

Dopo aver depurato il segnale dal filtro che la sonda applica, riportiamo la miscela a monte del catalizzatore con un delay temporale negativo calcolato sempre dalla legge dei gas perfetti. A questo punto si può calcolare il fattore correttivo che collega il segnale lambda misurato dalla sonda anteriore e il segnale lambda letto dalla sonda posteriore (de-filtrato e con il delay negativo) λ_{post}^* :

$$Fatt_{corr} = \frac{\lambda_{pre} - \lambda_{post}^*}{\lambda_{pre} - 1}$$

Il fattore correttivo può essere riportato in un grafico a quattro quadranti in cui troviamo sull'asse x la lambda anteriore, sull'asse y il fattore correttivo parametrizzato a diverse lambda posteriori*. In *Figura 6.8, 6.9, 6.10, 6.11* riportiamo i risultati dell'inversione del modello applicato al tratto EUDC del NEDC e a due test di OSC, rispettivamente a 100km/h e 120km/h. I quattro quadranti rappresentano i 4 casi possibili di lambda monte e valle catalizzatore, ovvero miscela ricca o magra entrante e miscela ricca o magra uscente.

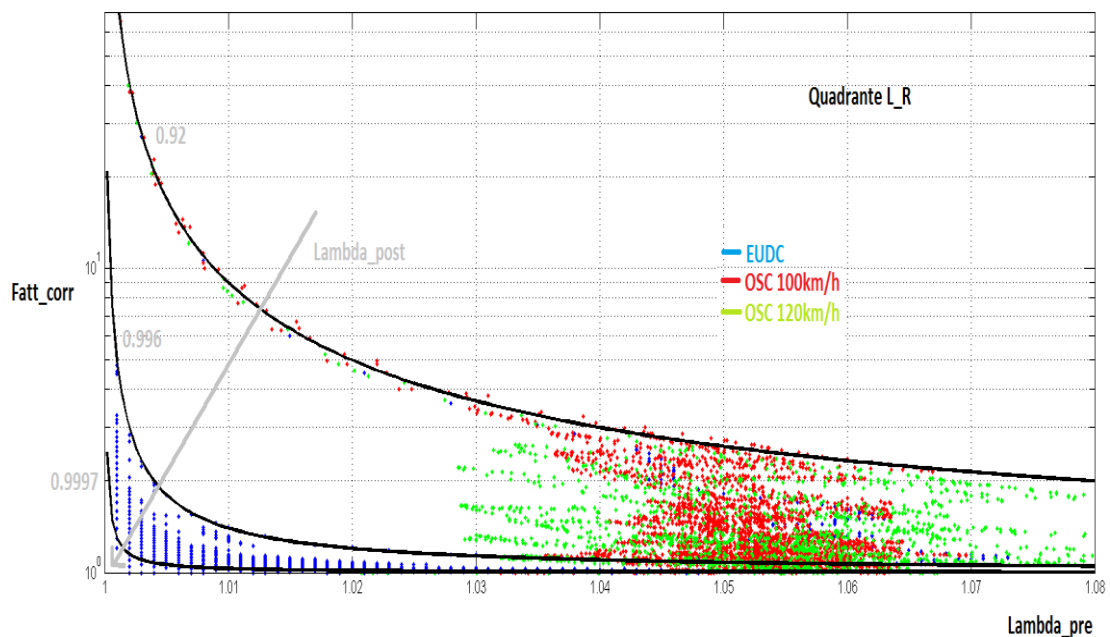


Figura 6.8– Quadrante lambda_pre lean, lambda_post* rich

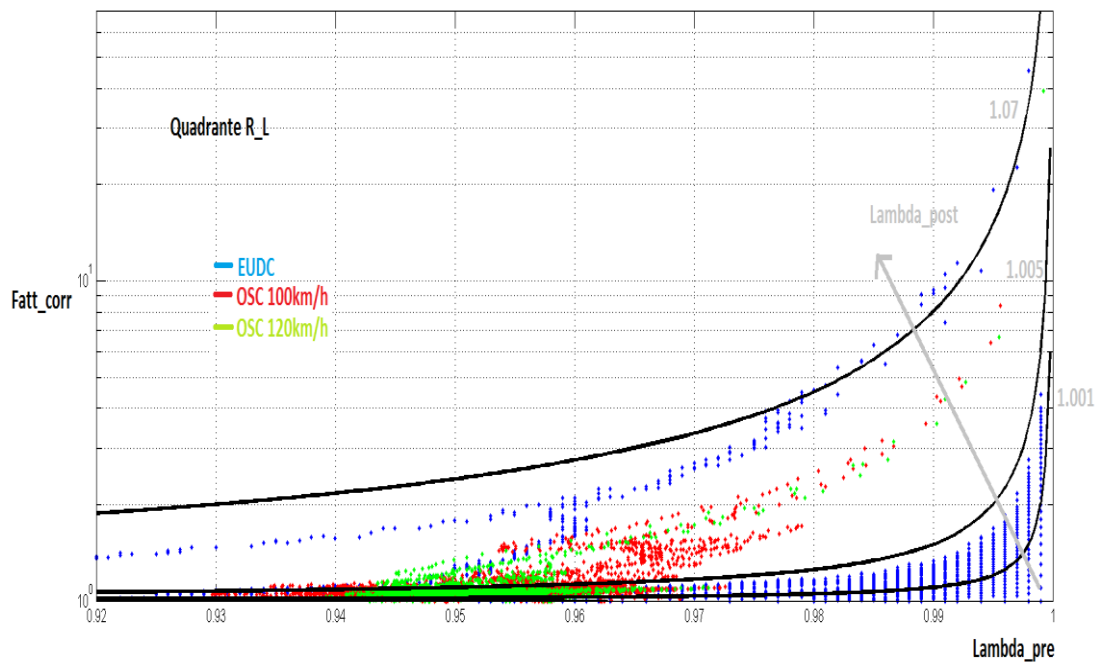


Figura 6.9– Quadrante lambda_pre rich, lambda_post* lean

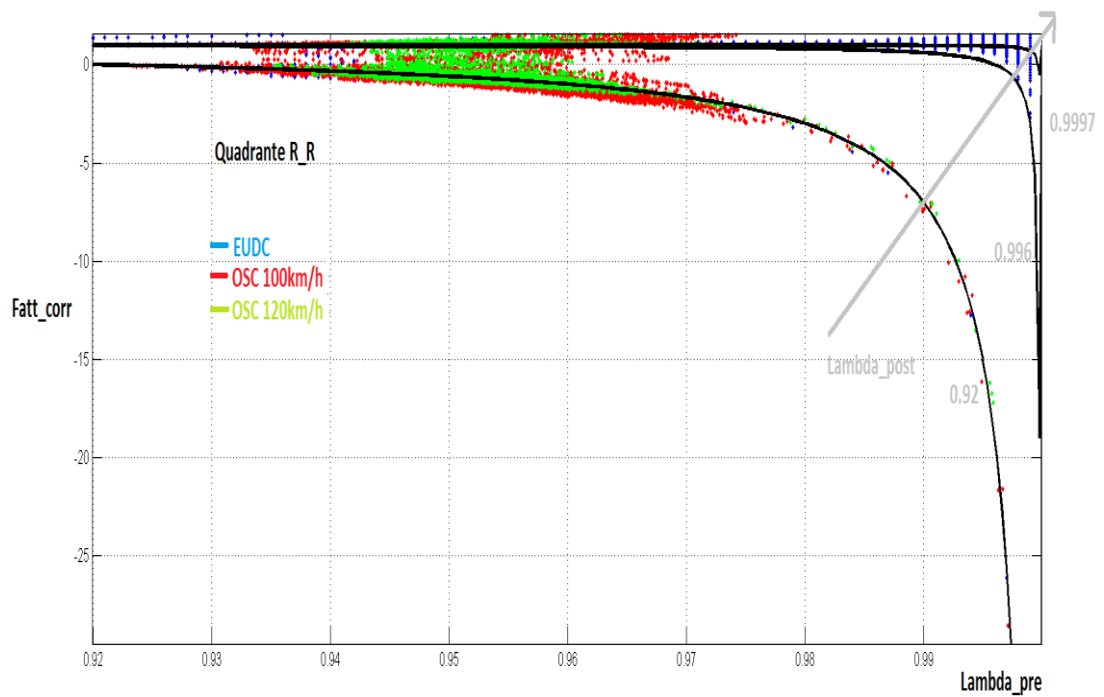


Figura 6.10– Quadrante lambda_pre rich, lambda_post* rich

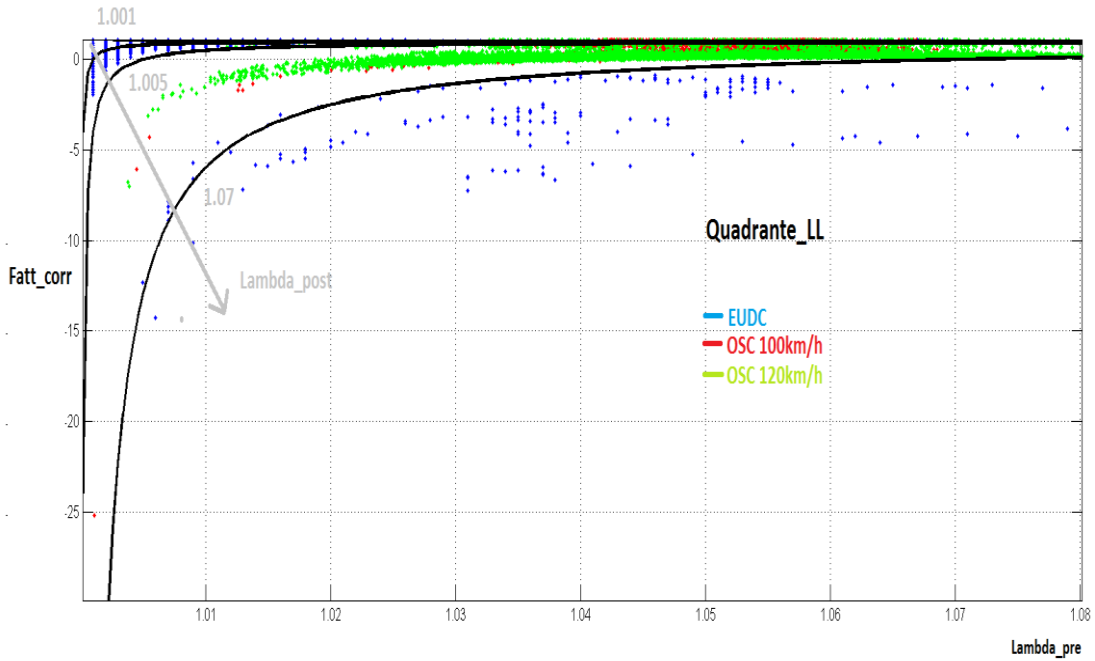


Figura 6.11– Quadrante λ_{pre} lean, λ_{post} * lean

Le informazioni che questi quattro grafici forniscono sono molto simili alla statistica delle λ posteriori e anteriori esplorate nei test di OSC confrontate con quelle effettivamente presenti nel tratto EUDC. In *Figura 6.12* si riporta uno zoom dei dati sperimentali dell'EUDC nei quattro quadranti, parametrizzati in *Figura 6.13* con i valori di λ posteriori maggiormente presenti.

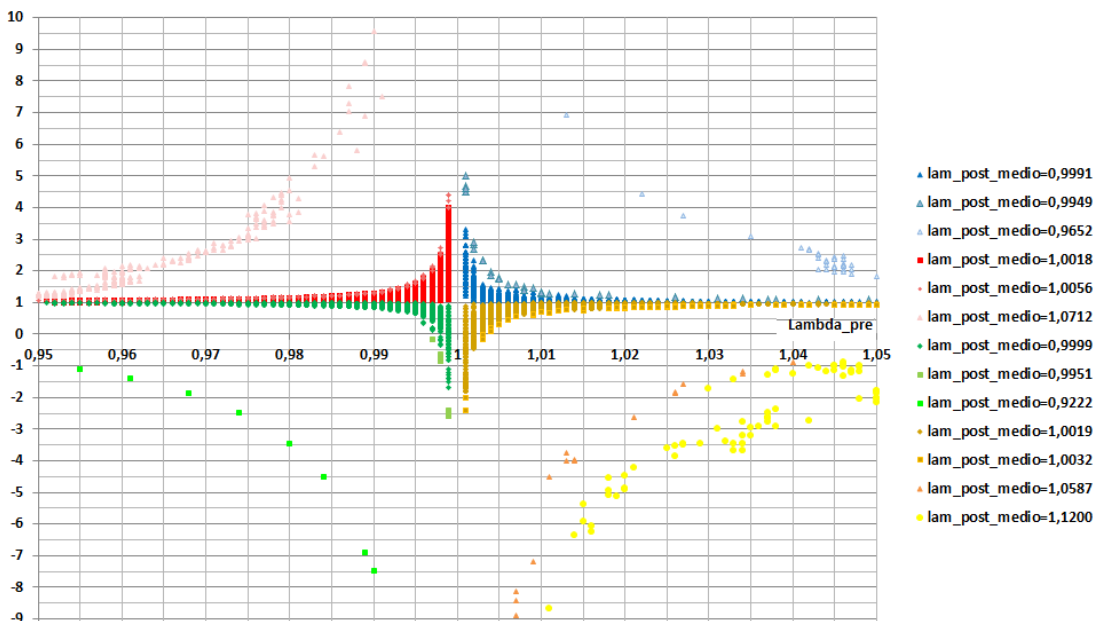


Figura 6.12– Punti sperimentali quattro quadranti nell'EUDC

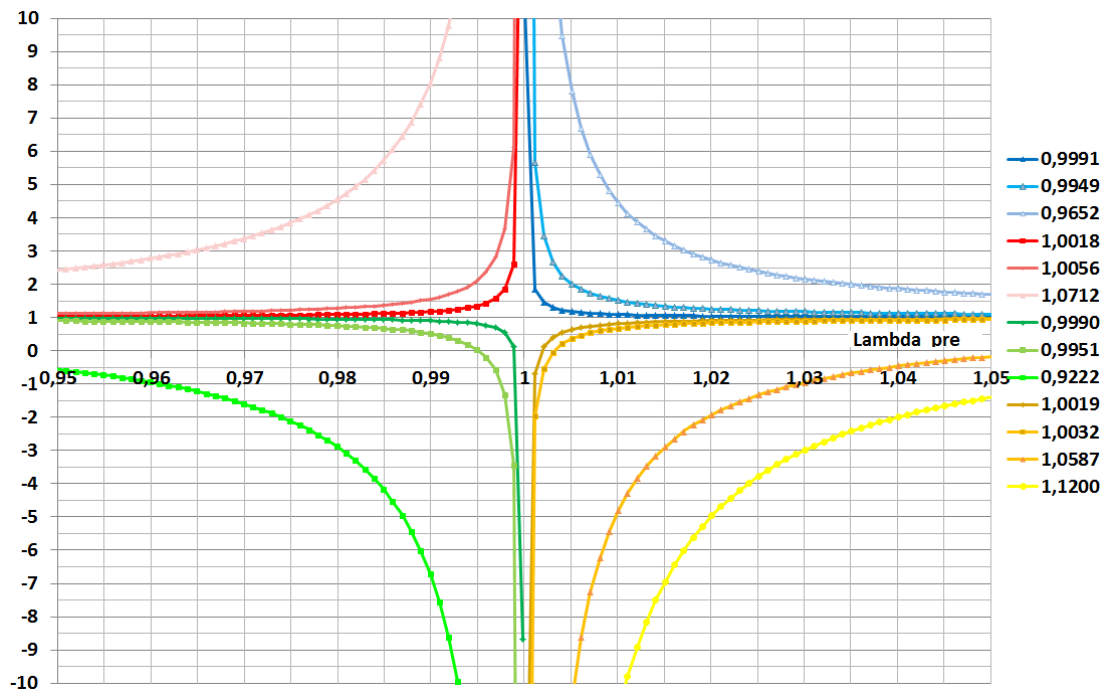


Figura 6.13– Modello quattro quadranti nell'EUDC

Nei test di OSC i fattori correttivi che caratterizzano il catalizzatore si discostano in maniera rilevante rispetto a quello che si evidenzia nel tratto EUDC. Da qui la necessità di migliorare la metodologia attuata a banco motore che deve comunque continuare a generare un riempimento e uno svuotamento di ossigeno dal catalizzatore e rimanere in un range di lambda anteriori e posteriori più vicine all'unità.

6.2 Sviluppo di una strategia di controllo lambda predittiva

L'attuale controllo lambda applica un closed-loop con la sonda posteriore ON-OFF basandosi su un target di tensione ottimo. L'informazione che la sonda posteriore riceve, rispetto a quando è avvenuta la perturbazione (variazione di lambda percepita dalla sonda anteriore), presenta un ritardo temporale di trasporto ed un filtraggio del segnale. Inoltre il target di tensione, viene convertito in un target di lambda attraverso una caratteristica tensione-lambda che subisce variazioni a seguito di variazioni di temperatura e di invecchiamento della sonda stessa che non vengono tenute in considerazione con una singola mappa 1-D costante per tutta la vita della sonda.

Il modello orientato al controllo sviluppato in questo elaborato fornisce due informazioni fondamentali:

- Relative Oxygen Capacity
- Lambda valle catalizzatore

Per cui il modello è in grado di osservare istante per istante la quantità di ossigeno contenuta nel catalizzatore, fondamentale ad esempio nel calibrare il reset dell'arricchimento imposto nella strategia di spurgo a valle di un cut-off. La possibilità inoltre di avere un valore di lambda a valle del catalizzatore ricalcolato dalla lettura della sonda anteriore consente di eliminare i problemi legati alla bassa accuratezza della caratteristica della sonda ON-OFF e di anticipare la correzione con un controllo predittivo. Infatti, a seguito di una variazione di titolo a monte del catalizzatore, si ha una variazione del segnale provocata dalla presenza del TWC stesso ed un delay che sommato al filtro della sonda posteriore introducono un ritardo nel controllore PI stesso. In *Figura 6.14* si riporta il nuovo schema di controllo lambda predittivo.

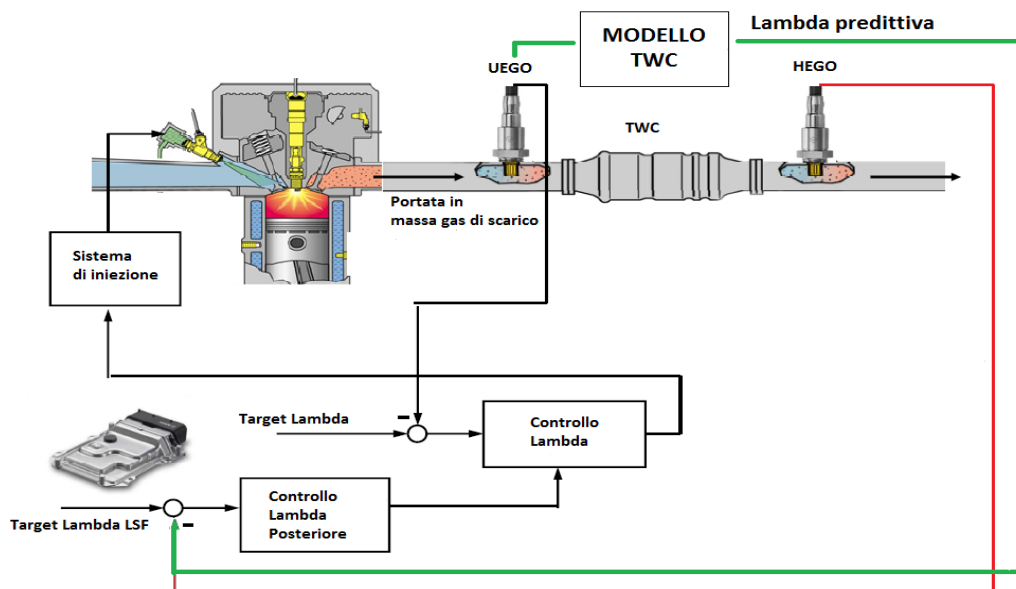


Figura 6.14– Schema del controllo Lambda predittivo

Dal punto di vista delle equazioni utilizzate è importante specificare che per attivare un controllo predittivo, il controllore lambda posteriore riceve in input il valore di lambda così calcolato:

$$\lambda_{post}(i + \tau) = \lambda_{pre}(i) - f_{prob} \cdot [\lambda_{pre}(i) - 1]$$

Concettualmente il controllo predittivo anticipa proprio il τ legato alla velocità dei gas di scarico entranti nel catalizzatore rendendo così il controllo più aggressivo. Inoltre il segnale così modellato non è affetto dal filtro che la sonda applica al segnale, riducendo ulteriormente la risposta del controllore PI.

6.3 Sviluppo di un modello per i layout a cascata

L'introduzione della norma *EURO 6C* porterà per molti costruttori l'introduzione del GPF (Gasoline Particulate Filter) per le applicazioni GDI porterà allo sviluppo di un layout a cascata come mostrato in *Figura 6.15*.

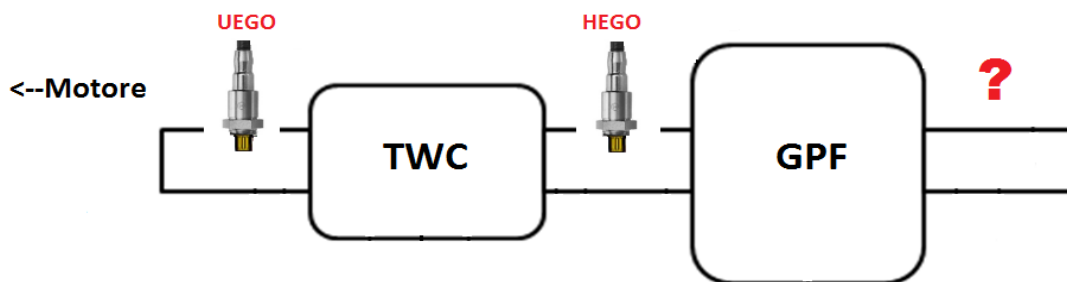


Figura 6.15– Layout linea di scarico EURO 6C

In una configurazione di questo tipo il GPF rappresenta un 4way in grado di abbattere HC, CO, NOx e di immagazzinare particolato. Analizzando la disposizione delle sonde lambda si può direttamente concludere che il titolo della miscela a valle del GPF risulta non monitorato. L'importanza di conoscere la lambda uscente dal GPF si ha ad esempio in fase di calibrazione del tempo in cui si ha spurgo a valle di un cut-off. Infatti durante un cut-off il catalizzatore si riempie di ossigeno, così come il GPF rendendoli poco efficienti nella riduzione dei NOx, per cui risulta necessaria soglia in ricco calibrata della sonda HEGO. Nel layout a cascata, se venisse utilizzata la stessa strategia, il GPF rimarrebbe pieno di ossigeno in quanto il tempo calibrato per lo spurgo risulta essere troppo breve. La prima soluzione potrebbe essere quella

di spostare la sonda HEGO dopo il GPF e considerare l'intero layout come un singolo brick. Gli svantaggi che si introducono sono principalmente due:

- Il TWC essendo il brick più entalpico, svolge gran parte dell'abbattimento delle tre specie chimiche (HC, CO, NO_x), lasciando al GPF sostanzialmente il compito di abbattere il particolato (con l'invecchiamento le condizioni al contorno cambiano). In una configurazione con sonda HEGO a valle del filtro anti-particolato il TWC, ovvero il brick più importante, non verrebbe correttamente monitorato.
- In ottica di un controllo lambda con closed-loop sulla sonda posteriore, l'informazione letta dalla sonda posteriore subirebbe un ulteriore delay legato al tempo necessario per attraversare il secondo brick.

L'idea sarà dunque quella di introdurre il modello già utilizzato per il titolo a valle del TWC, costruendo un modello analogo per il GPF con lo scopo di calcolare un segnale lambda dopo il filtro, partendo dal segnale letto dalla UEGO, *Figura 6.16*.

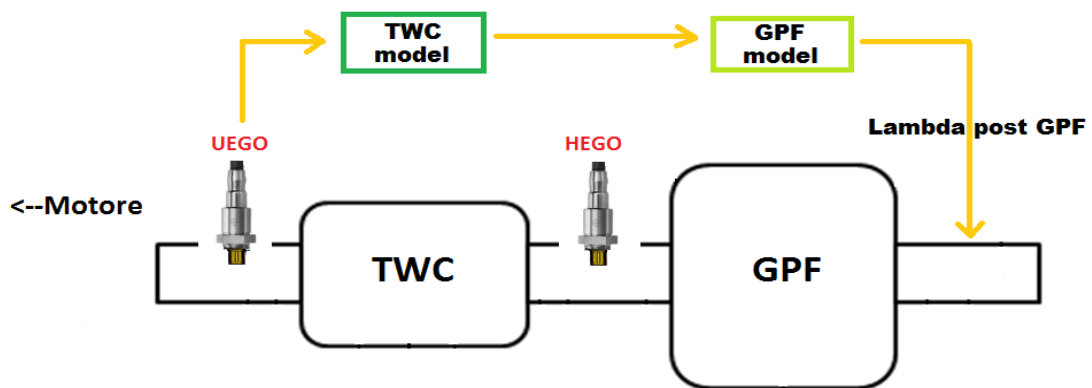


Figura 6.16– Modello sonda lambda valle GPF

Bibliografia

1. *A low-dimensional model for describing the oxygen storage capacity and transient behavior of a three-way catalytic converter*, Pankaj Kumar, ImadMakki, JamesKerns, KarolosGrigoriadis, Matthew Franchek, VemuriBalakotaiah.
2. *Three-Way Catalyst Models For Oxygen Storage Based Control Of The Air Fuel Ratio*, Michael Tomforde,
3. *A Simplified Model for the Dynamics of a Three-Way Catalyst Converter*, James C. Peyton Jones, J. Brian Roberts and Pierre Bernard, Richard A. Jackson.
4. *A Post-Catalyst Control Strategy Based on Oxygen Storage Dynamics*, Michael Tomforde, Wolfgang Drewelow, Peter Duenow, Bernhard Lampe, Matthias Schultalbers.
5. *Modelling and Control of three-way Catalyst Converters*, Theophil Sebastian Auckenthaler
6. *Control Oriented Modeling of the Dynamics in a Catalyst Converter*, Jenny Johansson, Mikaela Waller