

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Ingegneria e Architettura
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Tesi di Laurea Magistrale in
Propulsori termici e ibridi per autoveicoli M C.I.

SVILUPPO DI NUOVE METODOLOGIE DI
CALIBRAZIONE PER MOTORI DA
COMPETIZIONE CON TECNICHE DI
DESIGN OF EXPERIMENTS

Candidato:
Marco Chini

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ing. Nicolò Cavina

Correlatori:
Chiar.mo Prof. Ing. Davide Moro
Chiar.mo Prof. Ing. Enrico Corti
Ing. Davide Bartoccini

ANNO ACCADEMICO 2018-2019

*Alla mia famiglia
e ai miei amici*

Sommario

Lo scopo di questa tesi è quello di creare dei modelli di risposta di alcune grandezze fisiche di un motore Ducati MotoGP, partendo dalla progettazione dell'attività di acquisizione dati al banco prova, per arrivare a dei risultati numerici che descrivano nel modo più fedele possibile il comportamento del motore e, dove possibile, andare a ottimizzarne le prestazioni e l'affidabilità.

L'attività svolta comprende la programmazione della piattaforma di automazione del banco prova (AVL PUMA Open 2TM), la creazione di layout per il post-processing dei dati ottenuti utilizzando AVL CONCERTO 5TM e infine l'importazione dei dati su AVL CAMEO 4TM, per la creazione dei modelli di risposta e per le varie ottimizzazioni.

La creazione di questi modelli consente, facendo opportune ipotesi, di prevedere il comportamento del motore anche in condizioni di funzionamento diverse da quelle effettivamente misurate.

Così è possibile misurare un numero relativamente ristretto (e quindi finito) di punti per ottenere informazioni continue su tutto il campo di funzionamento del motore esaminato, riducendone l'usura e il tempo in sala prova.

Saranno presentate principalmente tre attività: la prima riguarda la caratterizzazione del comportamento del motore applicando correzioni di anticipo di accensione in rampa; la seconda si focalizza su alcuni punti a pieno carico in stazionario, facendo

variare alcuni parametri di controllo motore; la terza riguarda la risposta del motore a veloci transitori di apertura farfalla, per risolvere problemi di carburazione lamentati da uno dei piloti durante un turno di prove libere nella stagione 2018.

Ringraziamenti

Prima di tutto vorrei ringraziare i miei genitori e tutta la mia famiglia; grazie al loro sostegno ho potuto raggiungere questo importante traguardo.

Grazie anche ai miei amici, a Saverio, a Leonardo e a tutti gli altri che mi sono stati accanto e mi hanno aiutato molto negli ultimi giorni difficili dopo l'incidente.

Ringrazio tutti i ragazzi di Ducati Corse, specialmente Davide, che mi hanno accolto e con cui ho trascorso molto volentieri gli ultimi mesi, imparando molto più di quello che avrei immaginato all'inizio di questa bellissima esperienza, resa possibile anche grazie al prof. Nicolò Cavina che ringrazio molto.

Infine, non posso non ringraziare tutti i miei compagni di squadra di UniBo Motorsport, con cui ho passato 5 anni bellissimi e con cui ho condiviso esperienze indimenticabili.

Indice

Sommario	i
Ringraziamenti	iii
1 Introduzione generale	1
1.1 Motore Ducati MotoGP	1
1.2 Layout sala prova	2
1.2.1 Descrizione dispositivi e layout	2
1.2.2 AVL PUMA Open 2 TM	2
1.2.3 AVL CONCERTO 5 TM	3
1.2.4 AVL CAMEO 4 TM	4
2 Prove al banco	5
2.1 CAMEO ETM	5
2.1.1 Descrizione della prova	5
2.1.2 Preparazione della prova	7
2.1.3 Svolgimento della prova	12
2.1.4 Post-processing	13
2.1.5 Teoria della modellazione	17
2.1.6 Applicazione dei modelli	26
2.1.7 Risultati	31

2.2	CAMEO WOT	45
2.2.1	Descrizione della prova	45
2.2.2	Preparazione della prova	47
2.2.3	Svolgimento della prova	49
2.2.4	Modellazione	50
2.2.5	Risultati	52
2.3	Compensazione benzina in transitorio	57
2.3.1	Descrizione dell'attività	57
2.3.2	Esecuzione primo DoE	61
2.3.3	Esecuzione secondo DoE	63
2.3.4	Prove successive	64
2.3.5	Possibili sviluppi	70
3	Conclusioni	71
	Bibliografia	72

Elenco delle tabelle

1.1	Dati motore Ducati Desmosedici GP	1
2.1	Canali registrati	8

Elenco delle figure

1.1	Layout cella	2
1.2	AVL CONCERTO 5 TM	3
1.3	AVL CAMEO 4 TM	4
2.1	Automazione CAMEO ETM	6
2.2	Creazione del DoE	9
2.3	Poligono limite	9
2.4	DoE CAMEO ETM	10
2.5	File di parametri	11
2.6	Sequenza ETM	12
2.7	Pagina principale layout ETM CAMEO	13
2.8	Visualizzazione dati elaborati	16
2.9	Data editor	17
2.10	Esempio overfitting	22
2.11	100 Local Models vs Cross Validation	26
2.12	Indici statistici dei modelli del cilindro 1	27
2.13	Valori misurati e predetti	28
2.14	Modello Excel con variation e response in colonna	29
2.15	Modello Excel con variation e response in tabella	30
2.16	Export dati	31
2.17	Correzione anticipo in funzione di λ a basso carico	32

2.18	Correzione anticipo in funzione di λ a medio carico	33
2.19	Correzione anticipo in funzione di λ a pieno carico	33
2.20	Correzione anticipo in funzione di λ su tutto il piano quotato	34
2.21	Confronto rampa giri - modello	35
2.22	Modello Pmax 1 con dati base ciclo	36
2.23	Modello Pmax 1 con dati dopo downsampling	37
2.24	Delta tra i modelli	37
2.25	Interfaccia ottimizzatore	38
2.26	Mappa di massima PMI cilindro 1	40
2.27	λ per massima PMI cilindro 1	40
2.28	Anticipo per massima PMI cilindro 1	41
2.29	Farfalla per minimo BSFC	42
2.30	λ per minimo BSFC	43
2.31	Correzione anticipo per minimo BSFC	43
2.32	Automazione CAMEO WOT	46
2.33	DoE CAMEO WOT con variazioni di λ e CADV	47
2.34	DoE CAMEO WOT con variazioni di λ , CADV e INJPH	48
2.35	DoE CAMEO WOT con variazioni di λ , CADV e INJPH	48
2.36	DoE CAMEO WOT con variazioni di λ , CADV e INJPH	49
2.37	Run Test CAMEO WOT	50
2.38	Modello coppia senza fase iniezione	52
2.39	Modello coppia e Pmax media con fase iniezione	52
2.40	Modello MFB50, T GAS e durata combustione	53
2.41	Ottimizzazione minima Pmax: coppia	54
2.42	Ottimizzazione minima Pmax: Pmax	54
2.43	Trade-off: coppia vs Pmax media	55
2.44	Esempio sbandamento λ	57

2.45	Forma del compensatore	58
2.46	Latin hypercube design	59
2.47	Sobol design	59
2.48	S-Optimal design	60
2.49	Modello primo DoE fuel transient	62
2.50	Secondo DoE fuel transient	63
2.51	Modello secondo DoE fuel transient	64
2.52	Terzo DoE fuel transient	65
2.53	Modello 1 terzo DoE fuel transient	67
2.54	Modello 2 terzo DoE fuel transient	68
2.55	Risposta λ curva 1	69
2.56	Risposta λ curva 3	69

Capitolo 1

Introduzione generale

1.1 Motore Ducati MotoGP

Le caratteristiche principali del motore utilizzato da Ducati nel campionato 2019 di MotoGP sono quelle descritte in tabella 1.1 [1]:

Motore	4 tempi, V4 a 90°
Cilindrata	1.000 cc
Raffreddamento	A liquido
Distribuzione	Desmodromica evoluta con doppio albero a camme in testa
Valvole	4 per cilindro
Alimentazione	Iniezione elettronica indiretta, 4 corpi farfallati con iniettori sopra e sotto farfalla.
Potenza massima	Oltre 250 cv
Carburante	Shell Racing V-Power
Lubrificante	Shell Advance Ultra 4
Scarico	Akrapovic
Elettronica	Centralina Magneti Marelli programmata con Software Unico Dorna

Tabella 1.1. Dati motore Ducati Desmosedici GP

1.2 Layout sala prova

1.2.1 Descrizione dispositivi e layout

La sala prova dove sono state condotte tutte le attività descritte in questa tesi è allestita con un insieme di dispositivi, ognuno dei quali ricopre un ruolo chiave nel corretto svolgimento delle prove; in figura 1.1 ne è riportato uno schema semplificato.

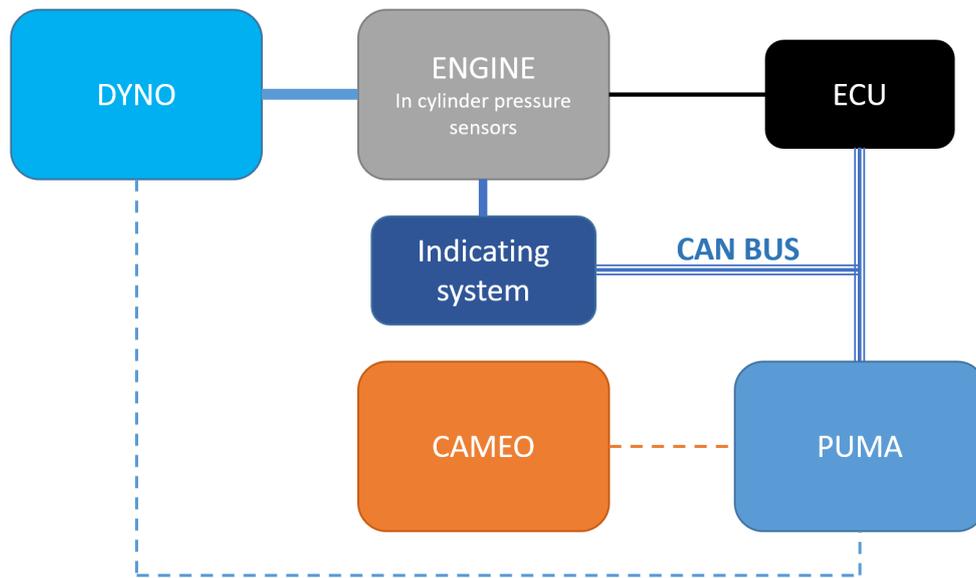


Figura 1.1. Layout cella

1.2.2 AVL PUMA Open 2™

L'ambiente AVL PUMA Open 2™ permette di monitorare tutta la sala prova, in particolare consente la visualizzazione di tutte le grandezze fisiche misurate e permette all'operatore di intervenire sia sui vari dispositivi presenti in cella, sia sul motore, potendo variarne il carico e il numero di giri (rispettivamente agendo sull'apertura delle farfalle e sul target di giri del freno).

In alternativa, AVL PUMA Open 2™ offre la possibilità di effettuare tutte le azioni

appena descritte in modalità automatica, tramite il caricamento di opportuni file di parametri.

In questo modo è possibile progettare tutte le sequenze di operazioni necessarie per il corretto svolgimento di una prova, che in certi casi potrebbero risultare eccessivamente complesse o impossibili da eseguire per l'operatore (che non viene sostituito dal software ma rimane in veste di osservatore, pronto ad intervenire in caso di necessità).

1.2.3 AVL CONCERTO 5TM

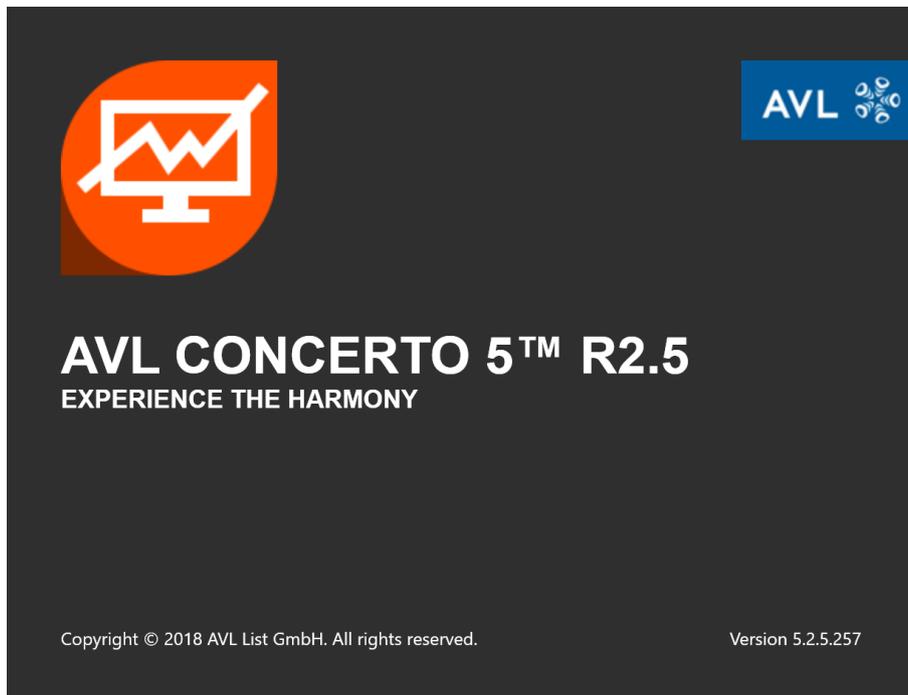


Figura 1.2. AVL CONCERTO 5TM

AVL CONCERTO 5TM è un software che permette la visualizzazione e l'elaborazione di dati acquisiti in sala prova mediante l'uso di grafici, script, macro e formule definibili dall'utente.

Questo software offre una grande possibilità di creazione e personalizzazione di layout che risultano molto utili per velocizzare l'elaborazione di un nuovo set di dati e generare degli export.

1.2.4 AVL CAMEO 4TM



Figura 1.3. AVL CAMEO 4TM

AVL CAMEO 4TM è un software che svolge molteplici funzioni; può essere utilizzato per la definizione del test da eseguire mediante la generazione di un DoE (Design of Experiments), può agire come operatore virtuale, comunicando con la sala prova nella sua modalità online e fornendo continuamente i parametri di controllo da utilizzare durante la prova; infine permette la modellazione del comportamento del motore, a partire dai dati misurati, per poi procedere con un'eventuale ottimizzazione e la creazione di mappe.

Capitolo 2

Prove al banco

2.1 CAMEO ETM

2.1.1 Descrizione della prova

La prova denominata *CAMEO ETM* ha lo scopo di andare a descrivere le risposte del motore nel suo campo di funzionamento, variando i principali parametri di controllo:

- *RPM*: giri al minuto
- *THROTTLE*: angolo di apertura farfalla
- λ : carburazione
- *CADV*: correzione anticipo di accensione rispetto alla mappa base

Ogni punto è misurato eseguendo una serie di operazioni predefinite e uguali per ogni punto, come in figura 2.1

I parametri di controllo da attuare in ogni punto vengono inviati al banco tramite la rete aziendale da AVL CAMEO 4TM che in questa fase viene utilizzato come operatore virtuale.

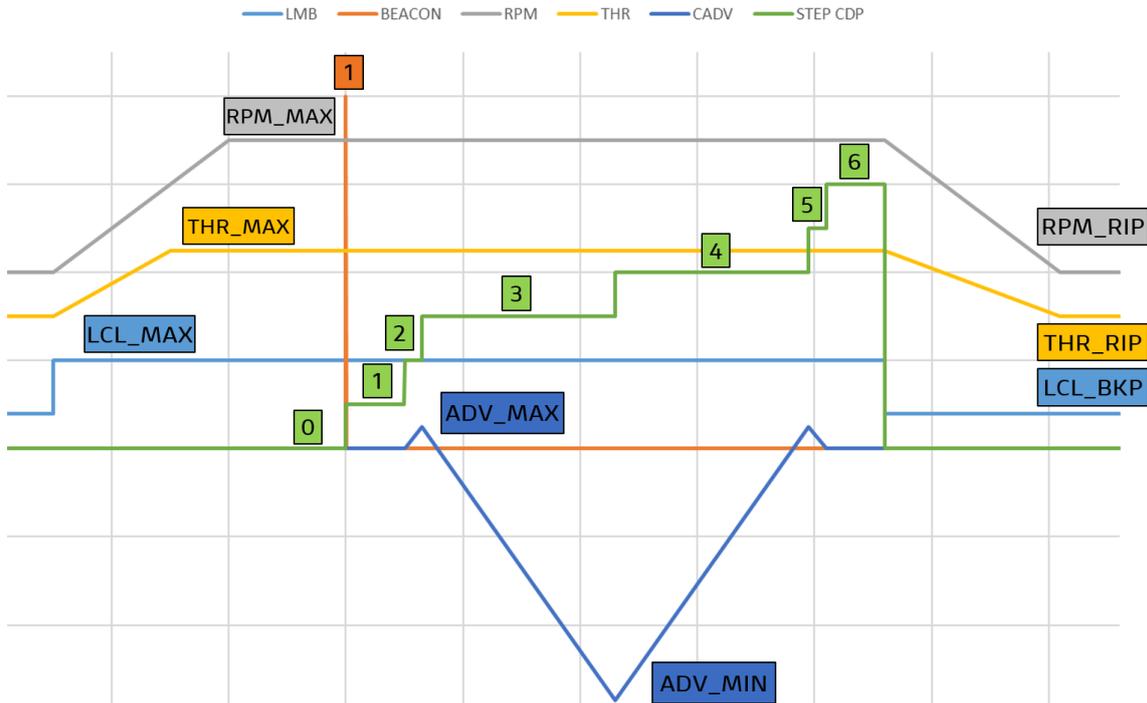


Figura 2.1. Automazione CAMEO ETM

Partendo da un punto di riposo, cioè un punto motore considerato sicuro e in cui il motore può restare anche per tempi lunghi, il target di giri del freno viene modificato secondo una rampa ad accelerazione angolare costante; lo stesso si applica anche al target di apertura farfalla.

All'inizio di queste rampe viene anche inviato il nuovo λ target.

Una volta raggiunti i target, c'è un breve periodo di stabilizzato e in seguito, dopo l'impulso del *BEACON*, inizia la fase di misura vera e propria.

I dati vengono registrati nel periodo in cui lo *STEP CDP* è diverso da 0; i valori che assume (tra 1 e 6) indicano diverse manovre per quanto riguarda la modifica dell'anticipo di accensione.

L'utilità di avere una grandezza che varia a gradino in base al tipo di manovra verrà evidenziata in seguito.

- *STEP CDP* = 1: nessuna correzione anticipo
- *STEP CDP* = 2: correzione positiva in rampa
- *STEP CDP* = 3: correzione negativa in rampa
- *STEP CDP* = 4: correzione positiva in rampa
- *STEP CDP* = 5: correzione negativa in rampa
- *STEP CDP* = 6: nessuna correzione anticipo

Quando lo *STEP CDP* passa da 6 a 0, si ha l'inizio delle rampe di discesa di giri e farfalla e la modifica del λ target, per tornare al punto di riposo.

I tempi e i valori massimo e minimo delle rampe di correzione anticipo sono mantenuti a valori prefissati e uguali per tutti i punti, a differenza del tempo di rampa di giri e farfalla che dipende dalla differenza tra *RPM MAX* e *RPM RIP* (rispettivamente il target di giri del punto da misurare e il target del punto di riposo).

Vengono registrati dati sia in base tempo che in base ciclo, i principali sono quelli in tabella 2.1.

2.1.2 Preparazione della prova

Generazione del DoE

Una corretta definizione dei punti da misurare è di fondamentale importanza per riuscire ad ottenere i risultati desiderati.

Per questo motivo è stata prestata particolare attenzione alla scelta dei parametri usati come vincoli per la creazione del DoE in AVL CAMEO 4TM; tali vincoli sono stati definiti per *RPM*, *THROTTLE* e λ , cioè la terna di numeri che compone ogni punto del DoE. In questo caso è stato scelto un design *S-Optimal*, per coprire al meglio tutto il design space.

NOME CANALE	TIPO CANALE	DESCRIZIONE
PMI	Base ciclo	Pressione media indicata
MFB50	Base ciclo	Baricentro combustione
KNOCK	Base ciclo	Indice di detonazione
Pmax	Base ciclo	Pressione massima cilindro
APmax	Base ciclo	Angolo di pressione massima
PMI H	Base ciclo	Contributo positivo PMI
RPM	Base ciclo e base tempo	Giri al minuto
ADV	Base ciclo e base tempo	Anticipo attuato
LMB	Base ciclo e base tempo	λ misurato
TH TGT	Base ciclo	Target di farfalla
LCL TGT	Base ciclo	λ target
T GAS	Base ciclo	Temperatura gas di scarico
THROTT O	Base ciclo	Feedback apertura farfalla
COPP DYN	Base tempo	Coppia al freno
KMA DYN	Base tempo	Consumo orario
BLOW BY	Base tempo	Portata di blow by
REND V M	Base tempo	Rendimento volumetrico motore
P OIL	Base tempo	Pressione olio
T H2O	Base tempo	Temperatura acqua
T OIL	Base tempo	Temperatura olio
F CORR	Base tempo	Fattore di correzione ambientale
T COMB	Base tempo	Temperatura aria

Tabella 2.1. Canali registrati

Dopo la definizione del tipo di design (figura 2.2), è stato definito un poligono sul piano RPM , $THROTTLE$, entro il cui perimetro dovranno essere tutti i punti del DoE; tale poligono rappresenta la finestra di maggiore utilizzo del motore ed è basato su una statistica della precedente stagione di gare (figura 2.3).

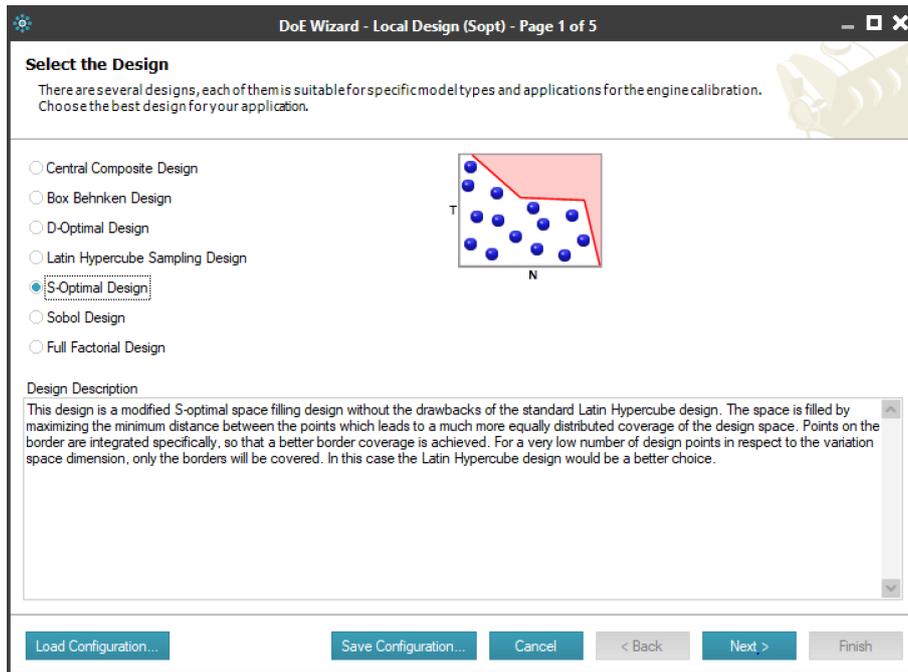


Figura 2.2. Creazione del DoE

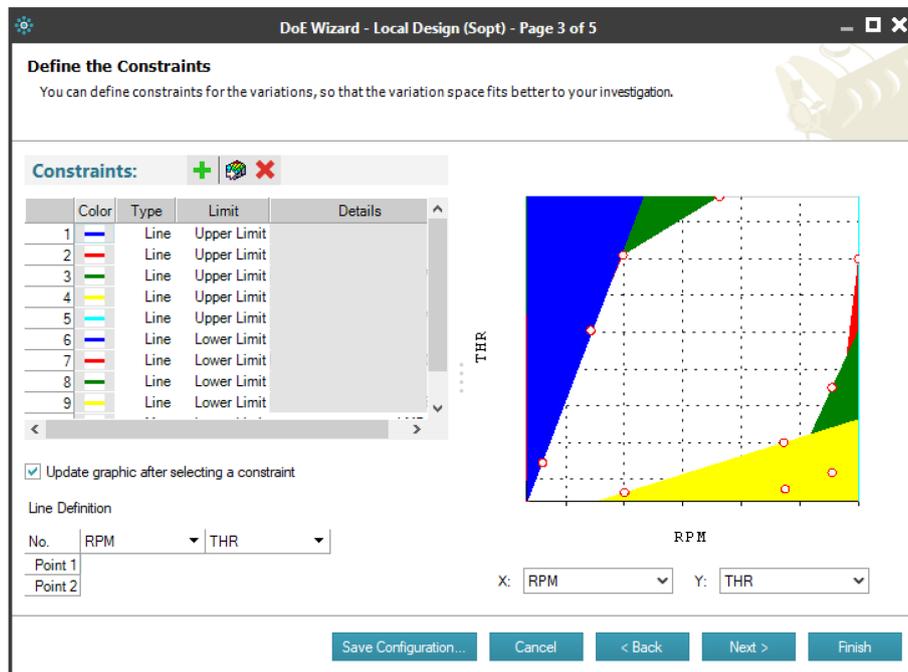


Figura 2.3. Poligono limite

Oltre a quanto appena detto, si è tenuto conto anche del rischio di detonazione; per questo motivo sono state escluse le zone ad alto carico e bassi giri.

Sono stati imposti dei limiti anche al λ , facendo un offset sia in positivo che in negativo della mappa base e usando queste appena ottenute come limiti superiore e inferiore.

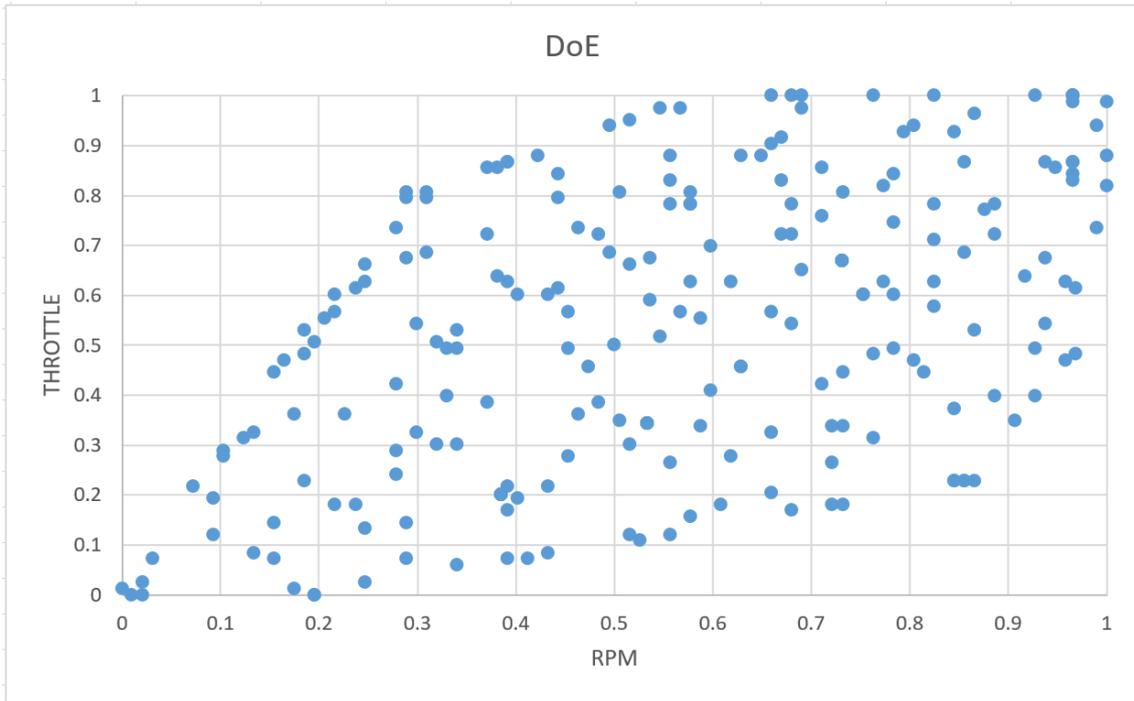


Figura 2.4. DoE CAMEO ETM

I punti di figura 2.4 non si trovano tutti a pari λ , infatti quella che si vede è una proiezione sul piano RPM , $THROTTLE$ di punti che hanno coordinate RPM , $THROTTLE$, λ .

Definizione dell'automazione del banco

L'automazione del banco viene comandata grazie ad alcuni file di parametri che vengono caricati nell'ambiente AVL PUMA Open 2TM nel momento in cui si inizia la prova.

Ognuno di questi file svolge molteplici funzioni, uno in particolare è responsabile della sequenza di operazioni che vengono eseguite da tutti i dispositivi presenti in sala prova.

Esso è organizzato come un diagramma di flusso che ha un punto di inizio e uno di fine, tra i quali possono essere inseriti diversi oggetti come *formule*, *assignments*, *subsequences*, cicli *for*, *if*, ecc (figura 2.5).

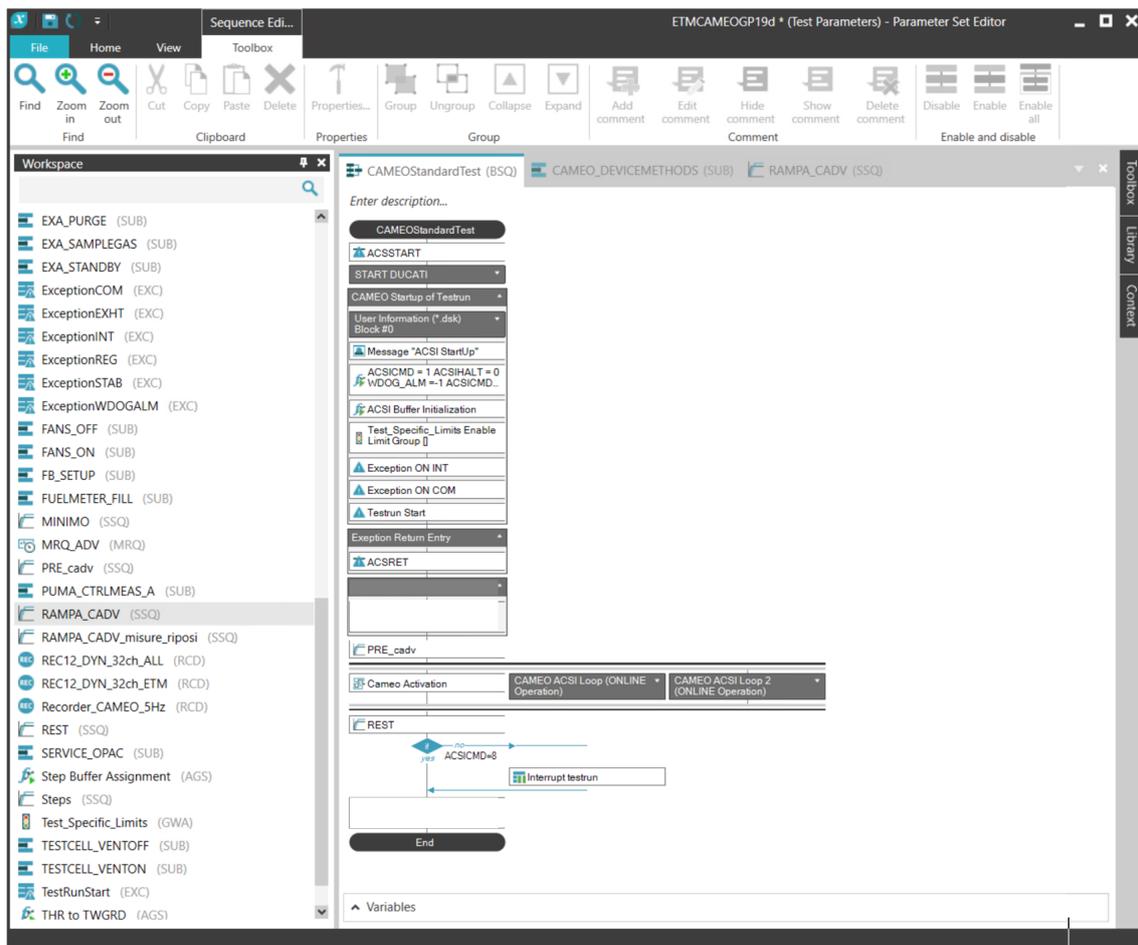


Figura 2.5. File di parametri

La sequenza inizia nel momento in cui l'operatore attiva la modalità automatica dell'AVL PUMA Open 2TM e termina quando sono state eseguite tutte le operazioni che conducono al blocco di chiusura della prova; a quel punto la cella torna in

modalità manuale.

Per questa prova è stato utilizzato come base di partenza un file di parametri preparato da AVL e già predisposto alla comunicazione con AVL CAMEO 4TM. La modifica che è stata fatta ha riguardato principalmente ciò che accade nel momento in cui viene dato il via alla prova dal PC CAMEO. L'automazione prevede un passo in cui AVL PUMA Open 2TM resta in attesa dell'attivazione di AVL CAMEO 4TM; una volta attivato, si entra in un ciclo che ad ogni iterazione carica i parametri del punto da eseguire e attua la procedura descritta in figure 2.1 e 2.6).

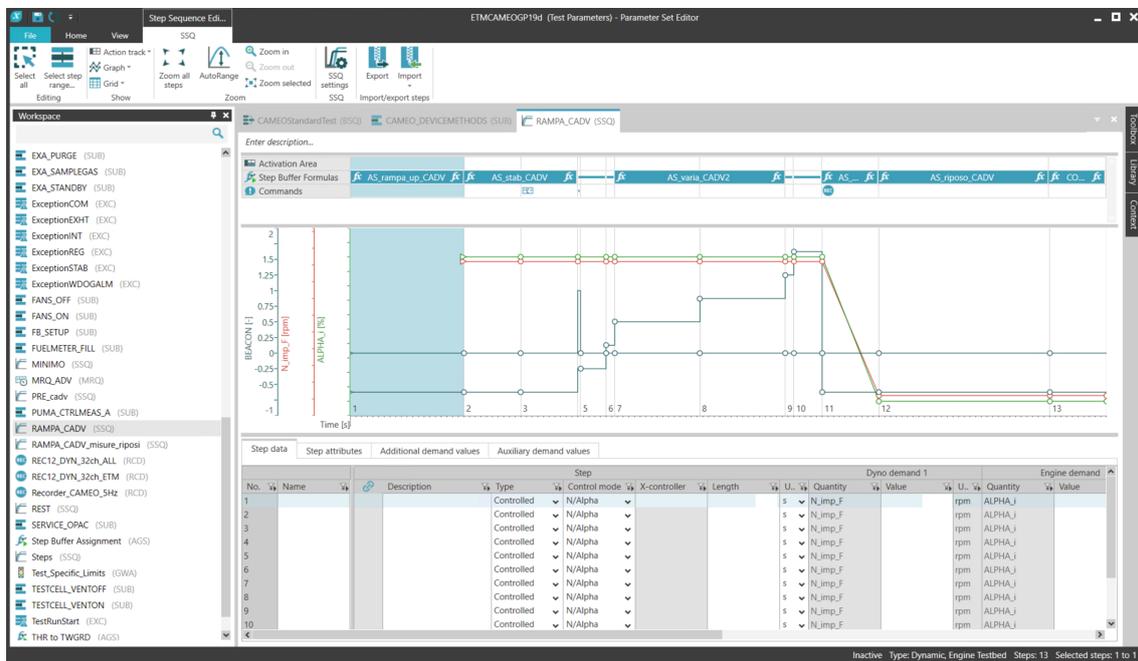


Figura 2.6. Sequenza ETM

2.1.3 Svolgimento della prova

Il DoE che è stato utilizzato conta circa 210 punti, ognuno dei quali ha un tempo di completamento che varia perchè variano i tempi di rampa a salire e a scendere di giri. Complessivamente, a parte alcune soste, il tempo totale richiesto per tutta la

prova è stato di poco inferiore alle 2 ore.

La prova è stata eseguita prima su un motore con specifica 2018; a valle dell'analisi dei dati ottenuti da questa, è stato ritenuto opportuno ripetere la prova su un motore con specifica 2019.

2.1.4 Post-processing

Per il post-processing dei dati è stato creato appositamente un layout su AVL CONCERTO 5TM, la cui schermata principale è quella in figura 2.7.

RIMOZIONE OUTLIERS

CYCLE BASED

T_OIL: MAX °C, MIN °C

T_H2O: MAX °C, MIN °C

ERR THR: SUP °, INF °

DOWNSAMPLED

ERR LAMBDA: SUP , INF

% MISFIRE: MAX , MIN

NOTA
ERR THR e ERR LAMBDA rappresentano gli scostamenti dai valori TARGET, quindi tipicamente i valori INF si dovranno inserire con segno -, mentre quelli SUP avranno segno +.

Scegli file da analizzare

NOTA
Attendere che il file sia visibile nel Channel Browser prima di cliccare su "Filtra dati". Premere il tasto Invio dopo aver modificato le prove da analizzare.

PROVE DA ANALIZZARE
PRIMA:
ULTIMA:

PARAMETRI MEDIA MOBILE

% CAMPIONI FINESTRA
COPP_DYN: % (Consigliato 3%)
Altri canali: % (Consigliato 2.5%)

N° ITERAZIONI
COPP_DYN: (Consigliato 15)
Altri canali: (Consigliato 40)

OFFSET COUNTER

TEMPO DI CALCOLO STIMATO: s

DATI SCARTATI PER OUTLIERS: %

SELEZIONA PROVA
RPM:
THROTTLE:
COUNTER:

Filtra dati **Apri file di risultati**

DUCATI CORSE

Figura 2.7. Pagina principale layout ETM CAMEO

Lo scopo di questo layout è quello di ricevere come input i dati grezzi ottenuti durante la prova e fornire come output un set di dati da poter importare direttamente su AVL CAMEO 4TM per procedere con la creazione dei modelli.

La pagina di interfaccia di figura 2.7 consente all'utente di definire i limiti per riconoscere eventuali "outliers", cioè misure avvenute in condizioni lontane dai target previsti (ad esempio deviazioni dal target di temperatura acqua e olio, errori di attuazione delle farfalle, sbandamenti di λ e % di misfire).

Cliccando su "Filtra dati" viene lanciato lo script principale che è responsabile dell'elaborazione dei dati e all'interno del quale vengono attuate strategie per correggere diversi tipi di eventuali errori, come il riconoscimento di file duplicati all'interno del database, errori di comunicazione CAN con conseguenti valori di alcune grandezze che tendono a 0 o all'infinito.

Per questa analisi sono stati considerati solamente i dati relativi alla rampa di decurtazione anticipo, passando da *CADV MAX* a *CADV MIN*, quindi dove si ha *STEP CDP = 3* (figura 2.1).

Avendo a disposizione sia dati base ciclo che base tempo, è stato necessario trovare un modo per combinare i due tipi di dati; ciò non è immediato poiché il numero di campioni presenti nei dati base tempo resta costante per ogni punto misurato (avendo tutti la stessa durata), mentre il numero di campioni dei dati base ciclo dipende dalla velocità di rotazione del motore.

Lo *STEP CDP* è presente sia nei dati base ciclo che in quelli base tempo, quindi, facendo una ragionevole approssimazione e cioè considerando costanti gli *RPM* durante la rampa di decurtazione anticipo, è possibile sincronizzare i due diversi set di dati.

Il file di export principale che viene generato è quello che contiene un downsampling dei dati; per fare questo, dopo aver isolato le rampe di decurtazione anticipo, viene creato un canale virtuale che contiene la correzione anticipo media dei 4 cilindri; di questo canale viene fatta un'interpolazione lineare, così si ha la certezza di avere monotonia.

Il fatto che questo canale sia sempre decrescente è fondamentale perchè il downsampling viene fatto andando a prendere i dati relativi ad alcune decurtazioni predefinite contenute in un vettore all'interno dello script.

Così ogni riga di dati viene scritta facendo un valor medio di ogni grandezza nell'intorno della decurtazione anticipo richiesta.

Ripetendo questa operazione sia sui dati base ciclo che base tempo, per ogni livello di decurtazione anticipo e per tutti i punti del DoE e infine rimuovendo le righe affette da outliers, si ottiene il risultato finale.

Di seguito sono riportati tutti i file di export che vengono generati ogni volta che viene lanciato lo script:

- *dati_cy.txt*: contiene i dati filtrati base ciclo
- *dati_tm.txt*: contiene i dati filtrati base tempo
- *dati_ds.txt*: contiene sia dati base tempo che base ciclo, dopo averne fatto il downsampling ed è quello che verrà importato in AVL CAMEO 4TM
- *dati_ds_outliers.txt*: contiene i dati del punto precedente, prima che essi siano epurati da eventuali outliers
- *file_scartati.txt*: contiene l'elenco dei file analizzati e indica il motivo di eventuali scarti dovuti ad outliers
- *nomi_file.txt*: contiene i nomi dei file CY e TM all'interno del file principale, viene utilizzato dallo script per aprire il file corretto ad ogni iterazione

I file appena descritti possono essere aperti e visualizzati comodamente all'interno del layout, cliccando sull'apposito pulsante.

Una volta caricati i dati, l'utente ha la possibilità di scegliere la singola prova da visualizzare, scegliendo i corrispondenti *RPM* e *THROTTLE* target usati per quel

punto del DoE.

Avendo fatto anche dei *repetition points*, ovvero dei punti ripetuti, una coppia di *RPM* e *THROTTLE* potrebbe appartenere a diversi punti, per cui, a valle di questi deve essere selezionato il *COUNTER*, cioè il numero progressivo che individua ogni punto del DoE in modo univoco.

Tutte le grandezze principali della prova selezionata vengono mostrate nelle pagine del layout create appositamente.

In figura 2.8 è riportato un esempio di una di esse, dove si possono vedere i dati grezzi (linea sottile), i punti di downsampling accettabili (triangoli verdi), i punti di downsampling non accettabili a causa di outliers (x rosse) e la deviazione standard riferita a ciascun punto di downsampling.

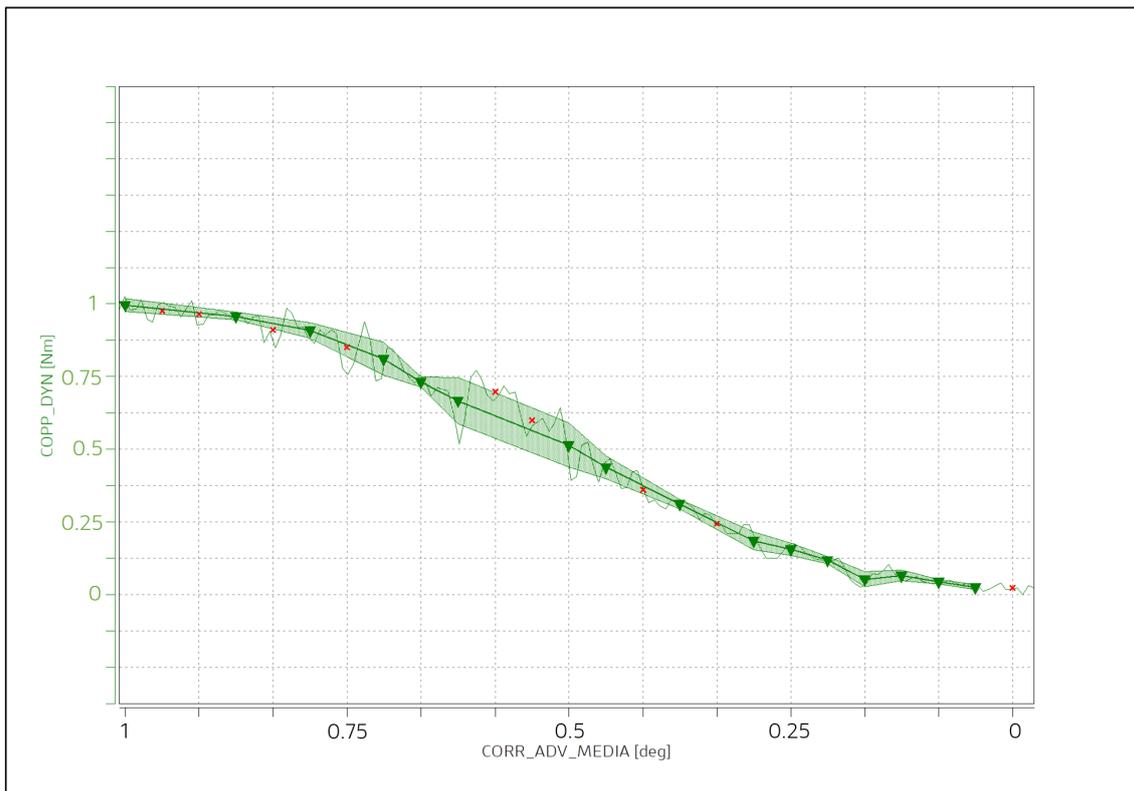
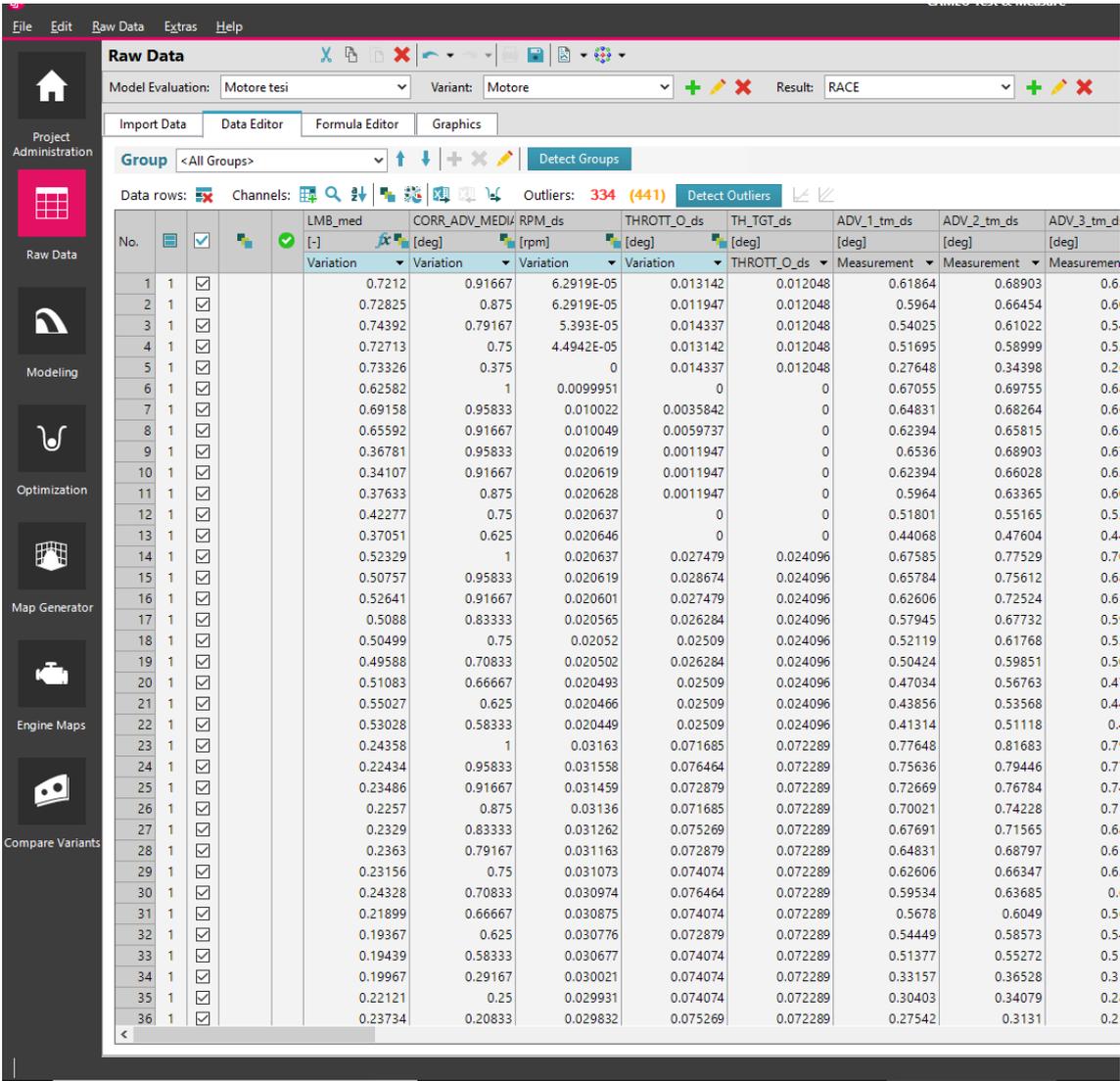


Figura 2.8. Visualizzazione dati elaborati

2.1.5 Teoria della modellazione

Per modellare le risposte del motore, si procede importando i dati su AVL CAMEO 4TM come riportato in figura 2.9.



The screenshot shows the 'Raw Data' editor in AVL CAMEO 4. The interface includes a menu bar (File, Edit, Raw Data, Extras, Help), a toolbar, and a sidebar with navigation icons. The main window displays a table of data rows. The table has columns for 'No.', 'LMB_med', 'CORR_ADV_MEDIA', 'RPM_ds', 'THROTT_O_ds', 'TH_TGT_ds', 'ADV_1_tm_ds', 'ADV_2_tm_ds', and 'ADV_3_tm_d'. Each column has a 'Variation' or 'Measurement' dropdown menu. The data rows are numbered 1 to 36, and the table shows numerical values for each parameter.

No.	LMB_med	CORR_ADV_MEDIA	RPM_ds	THROTT_O_ds	TH_TGT_ds	ADV_1_tm_ds	ADV_2_tm_ds	ADV_3_tm_d
1	0.7212	0.91667	6.2919E-05	0.013142	0.012048	0.61864	0.68903	0.6
2	0.72825	0.875	6.2919E-05	0.011947	0.012048	0.5964	0.66454	0.6
3	0.74392	0.79167	5.393E-05	0.014337	0.012048	0.54025	0.61022	0.5
4	0.72713	0.75	4.4942E-05	0.013142	0.012048	0.51695	0.58999	0.5
5	0.73326	0.375	0	0.014337	0.012048	0.27648	0.34398	0.2
6	0.62582	1	0.0099951	0	0	0.67055	0.69755	0.6
7	0.69158	0.95833	0.010022	0.0035842	0	0.64831	0.68264	0.6
8	0.65592	0.91667	0.010049	0.0059737	0	0.62394	0.65815	0.6
9	0.36781	0.95833	0.020619	0.0011947	0	0.6536	0.68903	0.6
10	0.34107	0.91667	0.020619	0.0011947	0	0.62394	0.66028	0.6
11	0.37633	0.875	0.020628	0.0011947	0	0.5964	0.63365	0.6
12	0.42277	0.75	0.020637	0	0	0.51801	0.55165	0.5
13	0.37051	0.625	0.020646	0	0	0.44068	0.47604	0.4
14	0.52329	1	0.020637	0.027479	0.024096	0.67585	0.77529	0.7
15	0.50757	0.95833	0.020619	0.028674	0.024096	0.65784	0.75612	0.6
16	0.52641	0.91667	0.020601	0.027479	0.024096	0.62606	0.72524	0.6
17	0.5088	0.83333	0.020565	0.026284	0.024096	0.57945	0.67732	0.5
18	0.50499	0.75	0.02052	0.02509	0.024096	0.52119	0.61768	0.5
19	0.49588	0.70833	0.020502	0.026284	0.024096	0.50424	0.59851	0.5
20	0.51083	0.66667	0.020493	0.02509	0.024096	0.47034	0.56763	0.4
21	0.55027	0.625	0.020466	0.02509	0.024096	0.43856	0.53568	0.4
22	0.53028	0.58333	0.020449	0.02509	0.024096	0.41314	0.51118	0.
23	0.24358	1	0.03163	0.071685	0.072289	0.77648	0.81683	0.7
24	0.22434	0.95833	0.031558	0.076464	0.072289	0.75636	0.79446	0.7
25	0.23486	0.91667	0.031459	0.072879	0.072289	0.72669	0.76784	0.7
26	0.2257	0.875	0.03136	0.071685	0.072289	0.70021	0.74228	0.7
27	0.2329	0.83333	0.031262	0.075269	0.072289	0.67691	0.71565	0.6
28	0.2363	0.79167	0.031163	0.072879	0.072289	0.64831	0.68797	0.6
29	0.23156	0.75	0.031073	0.074074	0.072289	0.62606	0.66347	0.6
30	0.24328	0.70833	0.030974	0.076464	0.072289	0.59534	0.63685	0.
31	0.21899	0.66667	0.030875	0.074074	0.072289	0.5678	0.6049	0.5
32	0.19367	0.625	0.030776	0.072879	0.072289	0.54449	0.58573	0.5
33	0.19439	0.58333	0.030677	0.074074	0.072289	0.51377	0.55272	0.5
34	0.19967	0.29167	0.030021	0.074074	0.072289	0.33157	0.36528	0.3
35	0.22121	0.25	0.029931	0.074074	0.072289	0.30403	0.34079	0.2
36	0.23734	0.20833	0.029832	0.075269	0.072289	0.27542	0.3131	0.2

Figura 2.9. Data editor

Il software riconosce l'intestazione dei dati, individuando il nome del canale e la sua unità di misura; ogni canale può essere impostato come:

- *Variation*: viene utilizzato come variabile per i modelli.
- *Measurement*: viene considerato come misura che non influenza i modelli.
- *Response*: viene considerato come risposta del motore su cui costruire il modello.
- *Demand*: viene considerato come demand di una *variation*, non influenza i modelli ma permette di controllare che i valori richiesti corrispondano a quelli effettivamente attuati.

Ogni canale viene considerato di default come *measurement*; nel momento in cui un canale viene impostato come *response*, esso compare nella sezione dedicata ai modelli, dove si possono definire tutti i parametri per la sua creazione.

AVL CAMEO 4TM propone tre diversi criteri per la creazione dei modelli [6]:

- *RNN (Robust Neural Network)*: utilizza una rete neurale che suddivide lo spazio in parti più piccole e modella ciascuna di esse con un polinomio. Questi polinomi sono poi moltiplicati per una "funzione peso" e sommati tra loro.
- *FreePolyModel*: esegue una regressione polinomiale che permette interazioni delle variabili fino al 5° ordine.
- *Automatic*: vengono creati entrambi i tipi di modelli e viene scelto il migliore in base alla qualità del modello e all' R_{pred}^2 .

In tutte le applicazioni qui descritte sono sempre stati usati modelli creati usando la rete neurale.

Il vantaggio di usare una rete neurale risiede nel fatto che essa è in grado di apprendere il comportamento di un sistema basandosi solamente su un set di dati di training, in modo analogo ad un cervello umano, senza la necessità di dover scrivere

tutte le equazioni che descrivono la fisica del sistema in oggetto.

Questo tipo di modello viene creato facendo la seguente sommatoria:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^M \phi_i(k) \hat{y}_i(k) \quad (2.1)$$

Dove M è il numero di local models in cui viene suddiviso lo spazio, \hat{y}_i è l' i -esimo local model, cioè una funzione polinomiale che ha come variabili tutte le *variations* e il cui valore è la risposta prevista del sistema, mentre ϕ_i è la cosiddetta "validity function", cioè la i -esima funzione che è responsabile di azzerare il contributo dell' i -esimo local model al di fuori del suo spazio di validità:

$$\hat{y}_i(k) = x^T(k) \theta_i \quad (2.2)$$

$$\phi_i(k) = \phi_i(\tilde{x}(k)) = \frac{1}{1 + e^{-(\Psi_0 + \tilde{x}(k)\Psi)}} \quad (2.3)$$

dove $[\Psi_0, \Psi]$ rappresenta l'iperpiano che divide i local models.

L'algoritmo di apprendimento determina i coefficienti che compaiono nelle precedenti equazioni, in modo da trovare il miglior modello di regressione in ogni zona in cui viene diviso lo spazio e la sua funzione di validità.

In seguito alla creazione di un modello, AVL CAMEO 4TM fornisce all'utente alcuni indici utili a stabilire la bontà del modello stesso: R^2 , R_{adj}^2 , R_{pred}^2 , $RMSE$, $NRMSE$. L' R^2 indica quanto il modello si avvicina ai dati misurati; esso può assumere valori nell'intervallo $[0; 1]$ ed è definito nel seguente modo:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.4)$$

Il numeratore rappresenta la somma dei quadrati degli scostamenti dei valori predetti dal modello (\hat{y}_i) rispetto al valor medio (\bar{y}), mentre il denominatore rappresenta la somma dei quadrati degli scostamenti dei valori misurati (y_i) rispetto al valor medio (\bar{y}).

Se questo rapporto si avvicina ad 1, significa che il modello insegue molto bene i dati misurati; al limite, quando questo valore risulta uguale a 1, vuol dire che tutti i valori misurati sono esattamente uguali a quelli predetti dal modello.

Nel caso si verifichi questo ultimo caso, si deve prestare attenzione perchè potrebbe indicare un *overfitting*, che sarà illustrato in seguito.

La 2.4 può essere così riscritta:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.5)$$

In questo caso il numeratore è la sommatoria dei quadrati degli scostamenti tra l'i-esimo valore modellato e quello misurato.

L' R_{adj}^2 (adjusted, cioè aggiustato o corretto) è una variante dell' R^2 e tiene conto anche del numero di gradi di libertà del modello; infatti, a parità di numero di misure n , l'utilizzo di un maggior numero di gradi di libertà porta ad avere un R^2 più alto che potrebbe trarre in inganno.

L' R_{adj}^2 è così definito:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \cdot \frac{n - 1}{n - p - 1} \quad (2.6)$$

dove p è il numero di coefficienti indipendenti del modello.

Per come è definito, l' R_{adj}^2 risulta sempre minore dell' R^2 .

L' R_{pred}^2 (predicted) è calcolato nel seguente modo:

$$R_{pred}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.7)$$

dove il valore dell' i -esima misura non viene considerato nella creazione del modello. Risulta utile per vedere se la mancanza di una delle misure abbia un grande o piccolo impatto sul modello.

L' $RMSE$ (root mean square error), cioè lo scarto quadratico medio, è così definito:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2.8)$$

Più questo valore è basso, migliore è la fedeltà del modello ai dati misurati.

L' $RMSE$ viene anche normalizzato tra 0 e 1 per ottenere una percentuale:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}}{y_{max} - y_{min}} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

Inoltre, vengono calcolate due diverse deviazioni standard: una che considera tutti i punti del modello e una che viene calcolata solamente sui cosiddetti *repetition points*.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (2.10)$$

I *repetition points* sono punti ripetuti durante la prova, cioè punti individuati automaticamente, le cui *variations* non differiscano di più dell'1%.

Oltre ad essere utili ad individuare un'eventuale deriva delle prestazioni del motore, sono di grande importanza nella verifica di qualità del modello.

Andando a confrontare le due deviazioni standard sopra citate è possibile determinare se siamo in presenza di *overfitting* o meno.

L'*overfitting* è una condizione in cui il modello insegue le misure in maniera eccessiva, portando ad avere un altissimo R^2 ma andando a perdere il senso fisico dell'andamento di una certa grandezza; in altri termini non viene filtrato il rumore di misura che, in modo più o meno marcato, sarà sempre presente (figura 2.10).

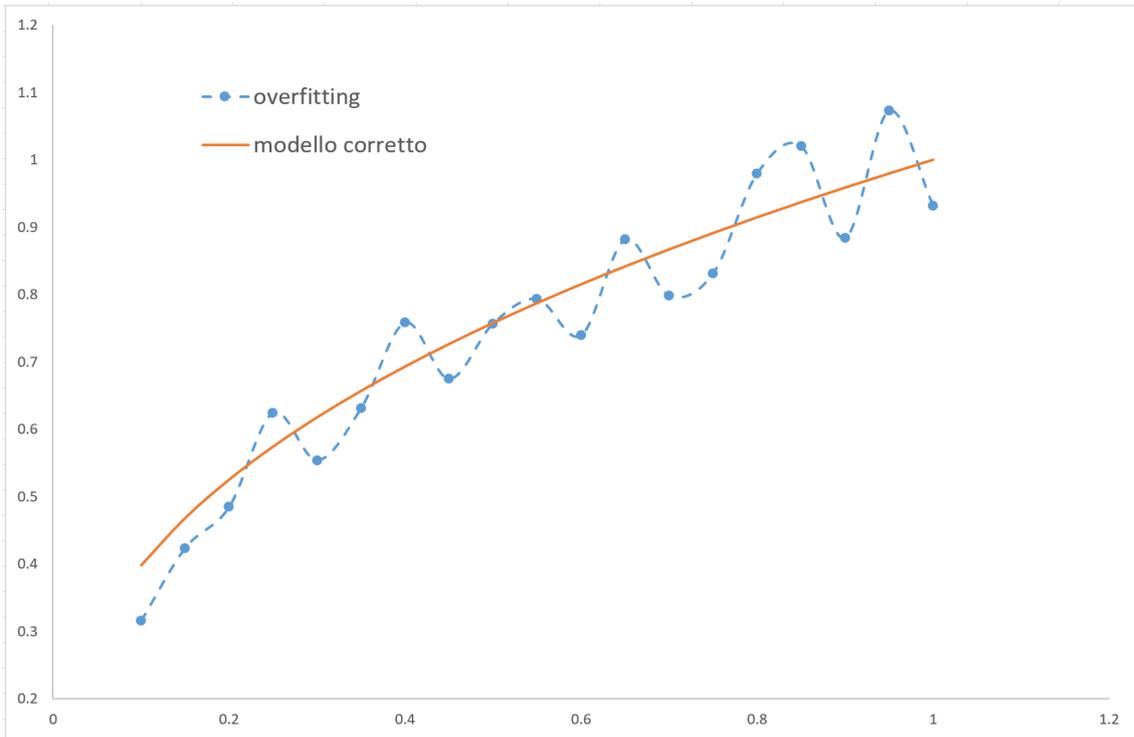


Figura 2.10. Esempio overfitting

Ipotizzando di non avere una deriva di prestazioni del motore, la deviazione standard dei *repetition points* mostra la dispersione che si ha nelle misure quando il motore viene portato nelle stesse condizioni di funzionamento.

Se la deviazione standard dei punti del modello risulta sensibilmente minore di quella dei *repetition points*, significa che stiamo utilizzando dei local models o di ordine troppo elevato o in numero eccessivo e che vanno ad inseguire ogni minima oscillazione delle varie misure; al contrario, se la deviazione standard dei punti del modello risulta molto maggiore, significa che il modello non è sufficientemente accurato.

Il caso ideale è quello in cui la deviazione standard del modello risulta di poco maggiore o uguale a quella dei *repetition points*.

Proprietà dei modelli RNN

Quando si usa un modello di tipo RNN, si possono impostare alcune proprietà fondamentali che contribuiscono alla buona riuscita della modellazione [6]:

- **Local model order:** è l'ordine dei polinomi utilizzati in ogni local model, può assumere valori da 1 a 5, di default viene impostato a 2.
- **Local model selection criteria:** è il criterio che stabilisce il numero di local models da utilizzare; ne esistono 4 tipi:
 1. BIC: Bayesian Information Criterion, viene scelto il numero di local models che minimizza il BIC.
 2. Probability error: viene scelto il numero di modelli che minimizza il probabile errore di modello
 3. Number local models: il numero di local models viene imposto dall'utente. Il numero massimo cala all'aumentare del grado dei polinomi.
 4. Cross validation: è il criterio di default; è un metodo iterativo che utilizza i dati sia per allenare che per validare il modello. Una volta terminato il processo iterativo, cioè quando è stato stabilito il corretto numero di local models, tutti i dati sono usati per allenare il modello.
- **Offset mode:** può essere manuale o automatica e rappresenta l'offset da applicare dopo un'eventuale trasformazione del modello di risposta.
- **Overlap:** può essere Small, Medium o Large (default Medium) e rappresenta il grado di sovrapposizione di due local models adiacenti; se è piccolo la qualità del modello aumenta, se è grande il modello è più liscio.

- **Transformation:** la funzione di risposta può essere trasformata per ottenere una miglior modellazione, possono essere applicate trasformazioni di tipo esponenziale, logaritmico, quadratico, ecc. La trasformazione da applicare può essere imposta dall'utente o decisa dal software in maniera automatica.
- **Use model output limitation:** se attivata, questa condizione applica una saturazione ai valori massimo e minimo assunti dal modello; in questo modo il massimo valore del modello non può superare il valore massimo misurato + 20% e il valore minimo del modello non può essere inferiore al valore minimo misurato - 20%.
- **Use Ridge Regression:** se attivata migliora la robustezza del modello, ne aumenta la stabilità e riduce il rischio di overfitting, ha lo svantaggio di ridurre la qualità del modello (R^2 più basso).
- **Focus on Low/High values:** se attivato, in base al valore fornito dall'utente, focalizza il modello principalmente su valori misurati alti o bassi.

La corretta definizione delle proprietà dei modelli è stata oggetto di studio e di confronto anche con i tecnici di AVL; inizialmente la scelta era ricaduta sul massimo numero possibile di local models.

Sono stati messi a confronto i modelli creati utilizzando:

- 100 local models, 3° grado
- 150 local models, 2° grado
- Cross Validation, 2° grado

Dal confronto si è visto che gli R^2 , R_{pred}^2 , R_{adj}^2 risultavano più alti nel caso con 100 local models di 3° grado.

La logica del software non rilevava overfitting, per cui quella sembrava la strada

giusta da percorrere.

In quella fase, però, si era tenuto conto solamente degli R^2 e non della deviazione standard del modello confrontata con quella dei repetition points.

Dopo alcuni tentativi di ottimizzazione è diventato evidente che i modelli divergevano molto rapidamente vicino al limite del design space, portando a dei risultati chiaramente errati; inoltre, gli andamenti di alcune grandezze erano eccessivamente nervosi anche molto prima di arrivare al limite del design space.

Così è stato deciso di passare a modelli calcolati con il criterio *Cross Validation* di 2° grado, che porta ad avere un numero di local models di poco inferiore a 20 per tutte le grandezze modellate.

In questo modo si sono ottenuti degli R^2 significativamente più bassi ma si è guadagnato molto in termini di robustezza del modello su tutto il design space.

Un chiaro esempio di questo sono i grafici di figura 2.11: essi mostrano due diversi modi di modellare la coppia e cioè con 100 local models di 3° grado (linea rossa) e con il *Cross Validation* di 2° grado (linea verde).

Questo tipo di grafico è chiamato "intersections" poichè taglia il modello in direzione di ogni *variation*, permettendo di visualizzare come ognuna di esse influenza la risposta, mantenendo le altre ai valori impostati dai cursori.

Considerando il secondo grafico dei 4 e cioè quello che mostra l'influenza del λ sulla coppia, si nota come il grafico verde abbia un andamento in linea con le attese e cioè abbia un massimo assoluto per valori leggermente grassi mentre, allontanandosi da tale valore, sia ingrassando ulteriormente che andando a smagrire, la coppia vada diminuendo.

Al contrario, il grafico rosso mostra che la coppia torna ad aumentare considerevolmente per valori di λ molto grassi o molto magri; ciò è sicuramente sbagliato e porterebbe in errore l'ottimizzatore nel momento in cui gli venga richiesto di trovare il λ di massima prestazione.

Un discorso simile vale per il quarto grafico, che mostra come la farfalla aperta oltre la sua massima apertura porti ad avere una coppia maggiore. Si noti anche il grosso delta tra il grafico rosso e quello verde.

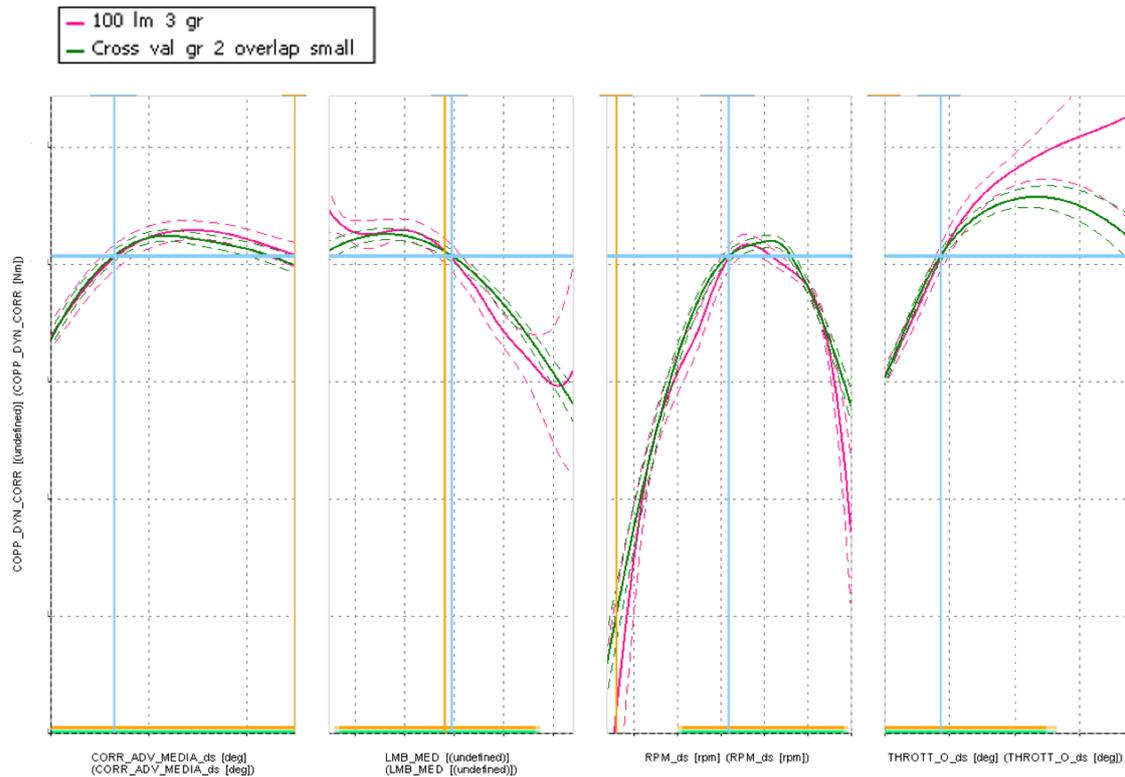


Figura 2.11. 100 Local Models vs Cross Validation

2.1.6 Applicazione dei modelli

Sono state create 5 diverse "Model evaluation", una per ogni cilindro e una per il motore intero, ognuna delle quali ha diverse *variation* e *response*.

Le *variation* cambiano da un cilindro all'altro perchè viene considerato il λ specifico di quel cilindro, mentre per quanto riguarda il motore intero, viene considerato un λ medio.

In figura 2.12 sono riportati gli indici statistici relativi alla modellazione delle grandezze indicanti del cilindro 1.

Come specificato in precedenza, per evitare *overfitting*, la *Std. Model Deviation* di ogni modello di risposta deve essere maggiore della corrispondente *Std. Repetition Deviation*; la figura 2.12 mostra il verificarsi di questa condizione per tutti i modelli.

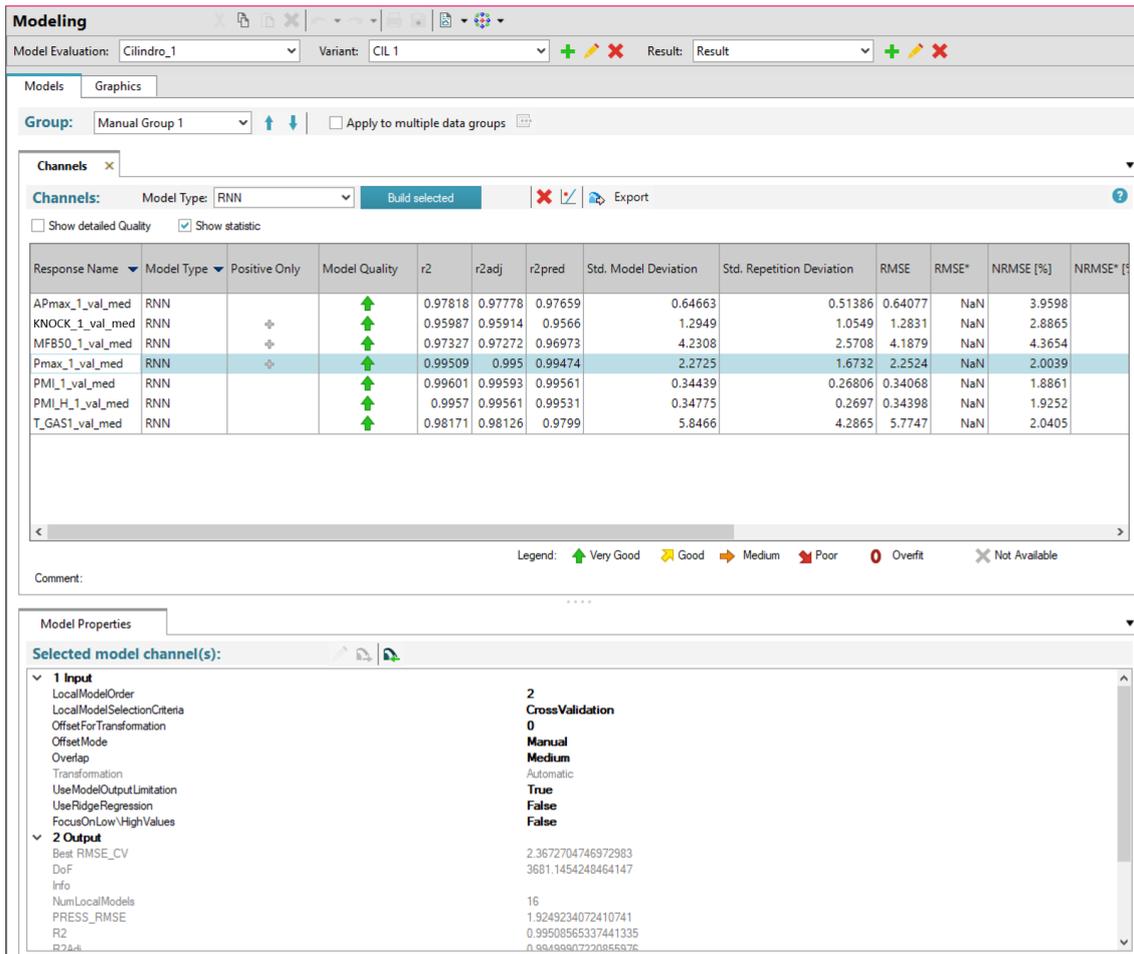


Figura 2.12. Indici statistici dei modelli del cilindro 1

Si può anche vedere come tutti gli R^2 , R^2_{pred} e R^2_{adj} siano maggiori di 0.95, quindi la qualità dei modelli è molto alta.

Come ulteriore indicazione, la figura 2.13 mostra il confronto tra i valori di Pmax

predetti dal modello e quelli misurati; più un punto si avvicina alla bisettrice del piano, maggiore è la fedeltà del modello ai dati misurati.

Tali modelli sono stati usati per effettuare delle ottimizzazioni e sono stati interrogati per conoscere le risposte del motore a diversi livelli di decurtazione anticipo.

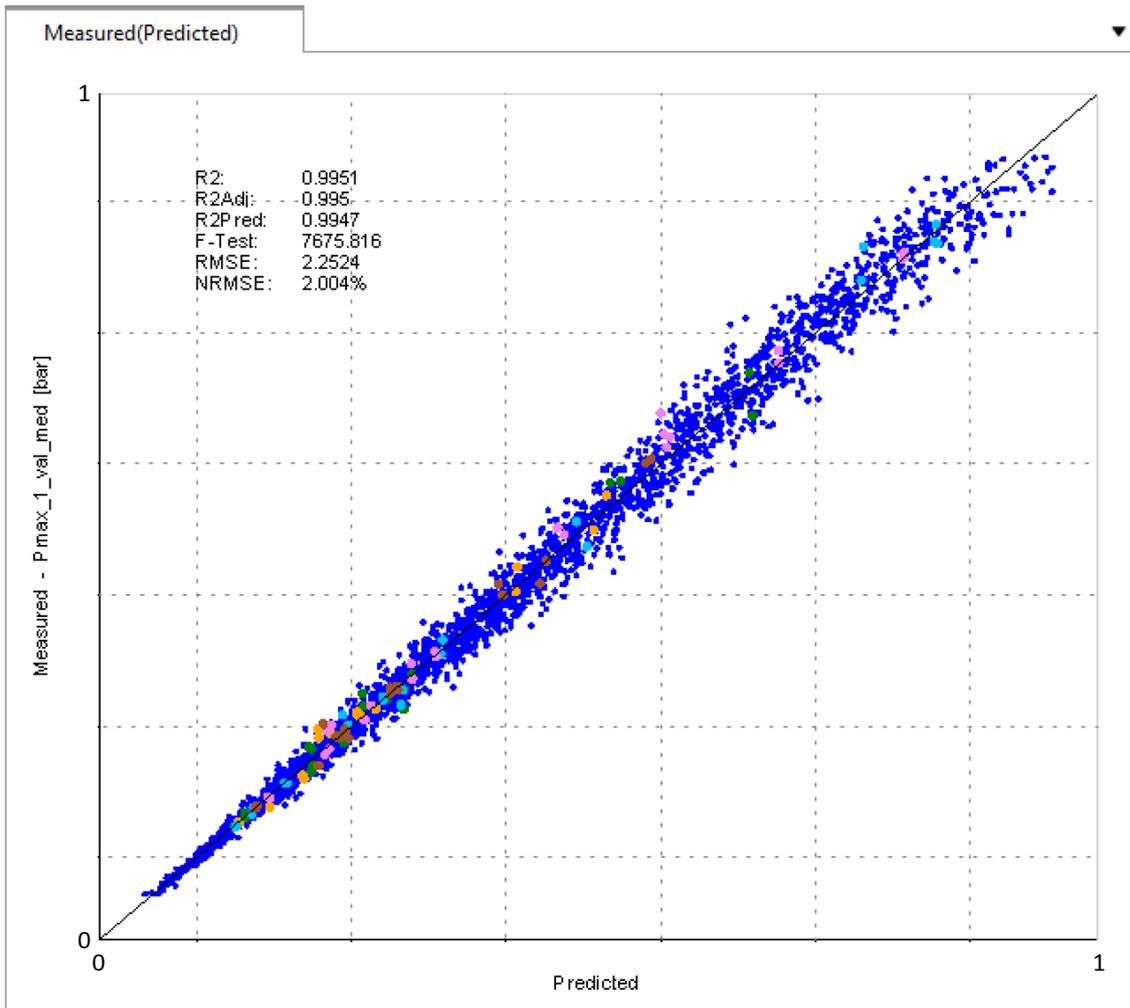


Figura 2.13. Valori misurati e predetti

Per questa ultima applicazione, i modelli sono stati esportati su Excel tramite l'apposito comando che crea un nuovo documento in cui sono presenti le formule che permettono di calcolare le risposte dei modelli, fornendo le *variations* come input.

La release di AVL CAMEO 4TM precedente alla R2 permetteva l'utilizzo dei modelli Excel solamente selezionando le *variation* una adiacente all'altra, con una singola selezione.

Ciò imponeva di dover scrivere ogni *variation* nell'apposita colonna, trovandosi ad avere ogni punto da valutare in una diversa riga (figura 2.14).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	CAMEL MODEL EXPORT		Group: Manual Group 1												
2	Version:	4.2.537.2	Hull_1	APmax_1_1	KNOCK_1_1	MFBSO_1_1	Pmax_1_1	PMI_1_1	PML_H_1_1	T_GAS1_1	RPM	ADV_OS	LMB_OS	THROTT_D	
3	Date:	20/05/2019 09:44	3.33896766	-1.94034096	0.13477655	-10.2114159	9.89249802	-4.24635	-2.72611451	1087.8	1	1	2	1	
4	User:	chinim	3.353081623	-2.02328085	0.12865406	-11.5380275	10.9542514	-4.24635	-2.8599	1087.8	2	2	2	2	
5	Guld:	{9f9889e2-7490-4036-96a8-4ef9e47184fd}	3.367195585	-2.13928936	0.12284182	-12.6852406	12.1072287	-4.24635	-2.8599	=T_GAS1_1(\$	3	3	2	3	
6															
7															

Figura 2.14. Modello Excel con variation e response in colonna

Questo approccio può risultare comodo in certe circostanze ma ha il grosso limite di non funzionare per andare ad interrogare delle mappe.

Durante una riunione con i tecnici di AVL, è stato fatto presente questo possibile miglioramento e l'ultima release del software comprende questa possibilità.

L'obiettivo era quello di poter fornire in input una mappa di correzione anticipo e una di λ , per avere in output le mappe di tutte le grandezze indicanti di ogni cilindro e complessive del motore.

Adesso, infatti, è possibile selezionare liberamente le *variation*, bloccando opportunamente le celle di intestazione delle mappe, ovvero quelle che contengono *RPM* (in verde) e *THROTTLE* (in blu) come in figura 2.15.

Il valore assunto dalla funzione *HULL* indica la posizione del punto analizzato nel design space. Un valore inferiore a 1 indica che siamo all'interno, quindi dove il modello è sicuramente affidabile; un valore maggiore di 1 indica che il modello sta estrapolando, quindi l'accuratezza dei dati ottenuti potrebbe non essere più accettabile, anche se l'utilizzo di un basso numero di local models rende il modello abbastanza robusto da poter predire correttamente le risposte del motore anche in punti leggermente fuori dal design space.

Per questo motivo, le funzioni di risposta vengono visualizzate nelle tabelle di destra (figura 2.15), solamente se si è all'interno o al massimo al limite del design space; in caso contrario la casella viene lasciata vuota.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		ADV_OS	0	0.5	1		APmax_1	0	0.5	1
3		0	1.0	1.0	1.0		0	=SE(C13>1		
4		0.5	1.0	1.0	1.0		0.5			
5		1	1.0	1.0	1.0		1			
6										
7		LMB_OS	0	0.5	1		KNOCK_1	0	0.5	1
8		0	1.0	1.0	1.0		0			
9		0.5	1.0	1.0	1.0		0.5			
10		1	1.0	1.0	1.0		1			
11										
12		HULL	0	0.5	1		MFB50_1	0	0.5	1
13		0	1.0	1.0	1.0		0			
14		0.5	1.0	1.0	1.0		0.5			
15		1	1.0	1.0	1.0		1			
16										
17							Pmax_1	0	0.5	1
18							0			
19							0.5			
20							1			

Figura 2.15. Modello Excel con variation e response in tabella

Questa nuova funzionalità dei modelli ha permesso di costruire un insieme di 6 file Excel che comunicano tra loro e permettono di esportare rapidamente i risultati relativi ad ogni cilindro ed al motore intero.

4 di questi file, ovviamente, contengono i modelli dei 4 cilindri, un altro quelli del motore intero e l'ultimo è un file di scambio dati che fornisce le stesse mappe di correzione anticipo e λ agli altri 5 e ne raccoglie i risultati per rendere più semplice e veloce ogni export.

2.1.7 Risultati

Grazie agli export Excel, sono stati creati dei file di risposta che contengono informazioni sul comportamento del motore a vari livelli di decurtazione anticipo; in figura 2.16 è riportato un esempio di struttura di uno di essi.

	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3	CILINDRO 4
Apmx KNOCK MFB50	RPM Apmx 1	RPM Apmx 2	RPM Apmx 3	RPM Apmx 4
	RPM KNOCK 1	RPM KNOCK 2	RPM KNOCK 3	RPM KNOCK 4
	RPM MFB50 1	RPM MFB50 2	RPM MFB50 3	RPM MFB50 4

Figura 2.16. Export dati

I dati così ottenuti sono utili a conoscere il comportamento del motore quando si trova in condizioni di attuazione di anticipo diversa da quella di mappa, ad esempio durante l'intervento del controllo di trazione, il cui algoritmo ha bisogno di conoscere quanta coppia in meno viene erogata a diversi livelli di decurtazione.

Oltre a questi, sono stati estratti i risultati relativi alle risposte del motore a diversi livelli di λ target, fornendo per ogni livello un unico λ come input e, in un caso, una correzione di anticipo nulla, in un altro caso, le relative correzioni di anticipo che massimizzano la coppia in ogni breakpoint (valori ottenuti dall'ottimizzatore).

La situazione con anticipo di mappa e λ diverso da quello base si verifica ogni volta in cui si hanno dei problemi di carburazione dovuti, ad esempio, a veloci transitori di farfalla (si veda il paragrafo 2.3), per cui non si riesce a compensare in modo esatto la dinamica del film fluido.

La conoscenza del comportamento del motore in questo genere di situazioni è molto utile a definire correttamente uno degli indici di errore analizzato più in dettaglio

nel paragrafo 2.3, ovvero quello che considera l'errore di coppia erogata rispetto a quella richiesta dal pilota.

Facendo questo genere di export, a diversi livelli di correzione anticipo o λ , si possono ricavare i coefficienti di una parabola o di una cubica che interpola al meglio la grandezza analizzata per ogni breakpoint; così è possibile creare delle mappe di coefficienti che possono essere interrogate dalla centralina per ricostruire i vari andamenti, ad esempio come deve essere modificato l'anticipo se si modifica il λ target. In realtà questa operazione non è stata fatta per ogni breakpoint ma è stato deciso di dividere il piano quotato in tre zone: basso carico, medio carico e pieno carico; per ognuna di queste bande è stata calcolata la correzione anticipo media e su queste basi sono stati ricavati i coefficienti delle parabole. Nelle figure 2.17, 2.18, 2.19 e 2.20 si possono vedere questi tre andamenti e quello che considera la media su tutto il piano quotato.

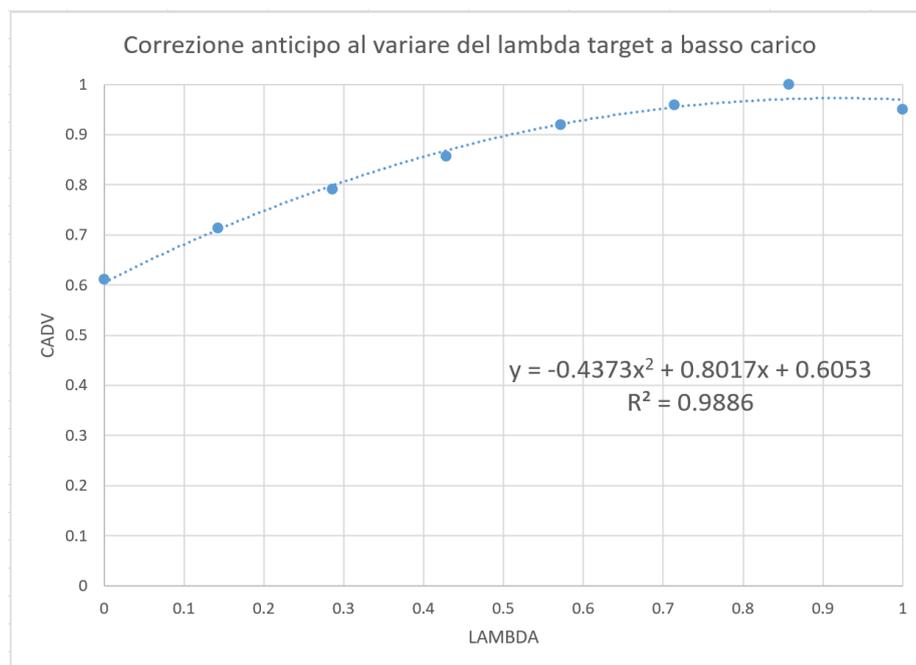


Figura 2.17. Correzione anticipo in funzione di λ a basso carico

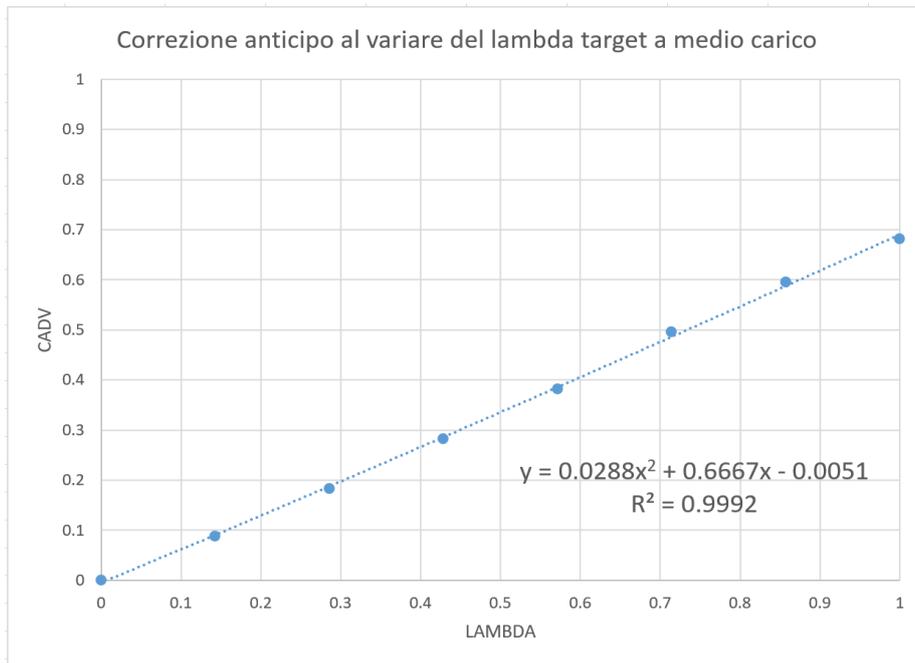


Figura 2.18. Correzione anticipo in funzione di λ a medio carico

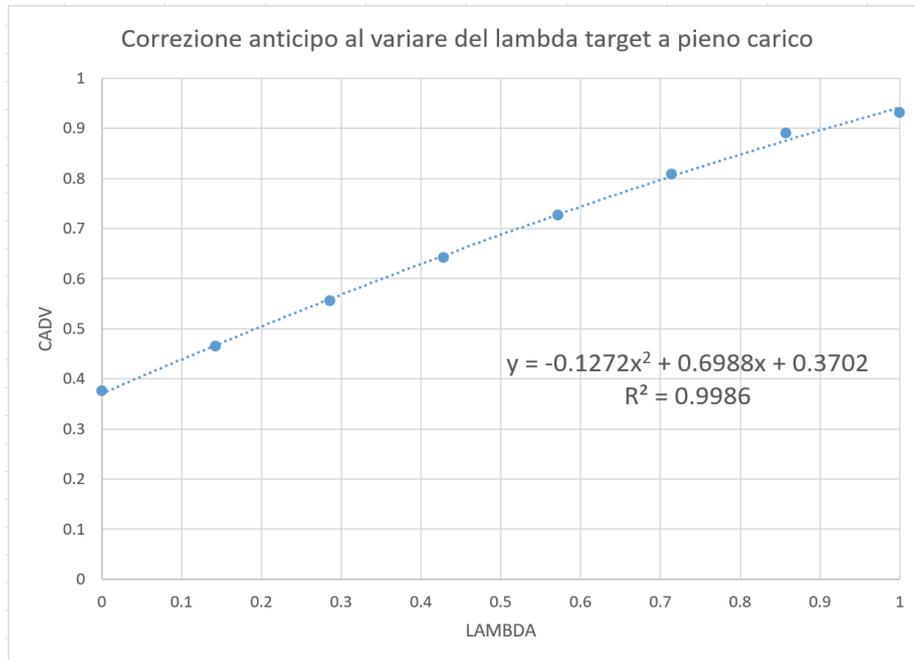


Figura 2.19. Correzione anticipo in funzione di λ a pieno carico

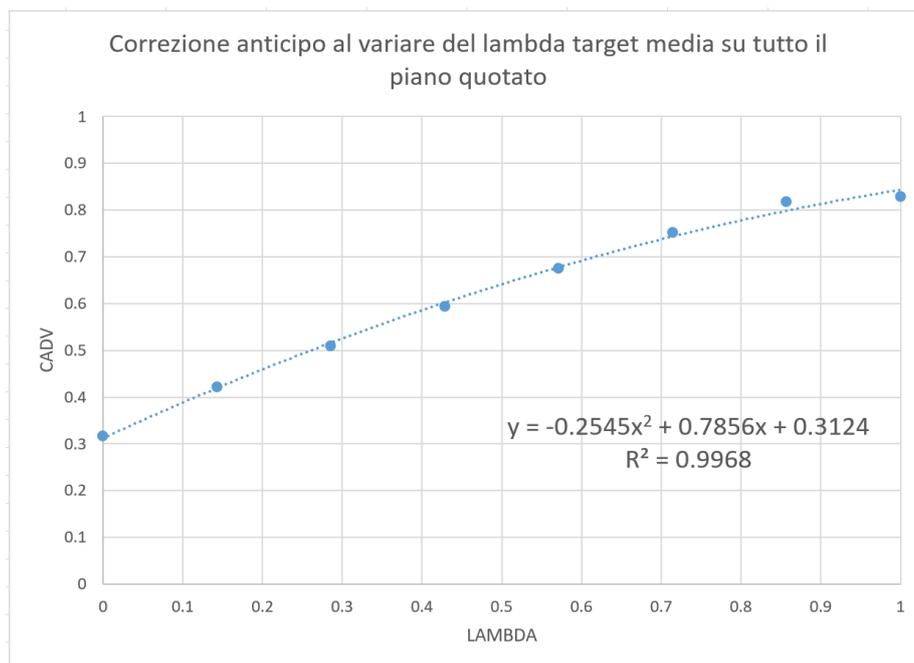


Figura 2.20. Correzione anticipo in funzione di λ su tutto il piano quotato

Una parte fondamentale di questa analisi è stata la verifica che le principali grandezze indicanti fossero in linea con le attese.

Dalla prima prova sul motore 2018, è stato riscontrato un andamento anomalo delle Pmax che risultavano superiori a quelle attese in una particolare zona del piano quotato; questo ha influito molto sulla decisione di ripetere la prova su un motore 2019, per verificare se lo stesso comportamento delle Pmax fosse presente anche sulla nuova specifica.

Modellando il comportamento del motore di questa stagione, si sono viste anche qui delle Pmax superiori alle attese, anche se di minore entità rispetto alla specifica precedente.

Per comprendere meglio il motivo di questo comportamento e soprattutto per verificare l'esattezza del modello, è stata intrapresa un'altra campagna di prove andando a indagare nella zona incriminata del piano quotato con un diverso metodo.

Questa ulteriore prova, è stata condotta imponendo un target di farfalla ed eseguendo una rampa di giri che andasse a coprire tutta la zona interessata dal problema. Il procedimento è stato ripetuto a varie farfalle e varie decurtazioni anticipo, mantenute costanti durante la rampa in giri.

Facendo una media nell'intorno dei giri di ogni breakpoint, sono stati ricavati i valori delle Pmax e sono stati confrontati con quelli ottenuti dal modello.

Il confronto, però, non è stato del tutto soddisfacente poichè non si è trovata un'esatta corrispondenza numerica tra le due diverse metodologie, anche se mediamente l'andamento è lo stesso; in figura 2.21 sono mostrati i delta tra le due diverse prove.

Delta rampa giri - modello																	
Pmax1	0	0.0625	0.125	0.1875	0.25	0.3125	0.375	0.4375	0.5	0.5625	0.625	0.6875	0.75	0.8125	0.875	0.9375	1
0.0	0.4	0.1	0.0	0.1	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	
0.3		0.3	0.4	0.6	0.7	0.7	0.9	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	0.7	0.7	0.9	0.9	
0.8					0.5	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4
1.0							0.5	0.8	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	0.3	0.2	0.4	0.3

Figura 2.21. Confronto rampa giri - modello

I delta di figura 2.21 si mantengono quasi esattamente costanti al variare della decurtazione anticipo, a dimostrazione del fatto che la variazione di Pmax con la modifica dell'anticipo viene riconosciuta correttamente sia dal modello che dall'analisi delle rampe in giri; la differenza sta solamente nel valore assoluto della Pmax.

Per spiegare questa discrepanza e per capire quale tra i due metodi fornisca i risultati corretti, ammesso che uno di essi lo faccia, sono stati modellati i dati contenuti nel file di risultati *dati_cy.txt*, ovvero quello che contiene i dati di ogni ciclo.

Questo file contiene una mole di dati molto maggiore (circa 10 volte) di quello contenente i dati estratti con il metodo del downsampling, essendo quest'ultimo formato da un insieme di valori medi calcolati a partire dai dati base ciclo.

Essendo la Pmax fortemente dipendente da λ e anticipo ed essendoci una grande dispersione di questo tipo di dati, la modellazione basata su ogni ciclo, evitando di mediare i dati prima di fornirli al software per la creazione del modello, è sembrata

la soluzione più accurata possibile.

Diversamente da prima, la modellazione per il sigolo cilindro è stata fatta fornendo come *variation* l’anticipo assoluto, invece della correzione media sui 4 cilindri.

Lo svantaggio di questo approccio alla modellazione risiede nel fatto che non si riesca a modellare bene il comportamento complessivo del motore poichè sarebbe necessario fornire al modello tutti i λ e tutti gli anticipi assoluti di ogni cilindro, oltre a farfalla e numero di giri.

L’utilizzo di 10 *variation* per la costruzione dei modelli, considerato il numero di misure a disposizione, risulta in una modellazione che perde senso fisico, poichè il numero di *variation* e quindi di dimensioni del modello è eccessivo.

Per questo motivo, le considerazioni sul motore intero devono essere comunque fatte sui modelli creati a partire dai dati a valle dell’operazione di downsampling. In questi casi si commette un errore minimo, dato che tali modelli non hanno una dipendenza così forte da λ e anticipo come la Pmax. La figura 2.22 mostra la Pmax del cilindro 1 modellata con i dati base ciclo, la 2.23 mostra quella modellata con i dati dopo il downsampling, la 2.24 mostra il delta tra le precedenti.

Modello dati base ciclo																										
Pmax1	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1					
0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00																					
0.02	0.07	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03																				
0.05	0.12	0.11	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07																		
0.08	0.19	0.17	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11																
0.12	0.25	0.24	0.23	0.21	0.19	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16														
0.16	0.32	0.31	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20													
0.20	0.32	0.33	0.34	0.31	0.32	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24									
0.24		0.38	0.39	0.35	0.37	0.36	0.36	0.38	0.38	0.38	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33	0.32								
0.30			0.43	0.41	0.37	0.36	0.33	0.41	0.46	0.48	0.49	0.50	0.50	0.49	0.48	0.47	0.45	0.44	0.42	0.41						
0.35				0.43	0.41	0.39	0.38	0.43	0.53	0.59	0.61	0.63	0.64	0.63	0.61	0.59	0.58	0.56	0.55	0.53						
0.42					0.50	0.46	0.42	0.40	0.42	0.57	0.68	0.72	0.75	0.76	0.75	0.74	0.72	0.72	0.71	0.69	0.68	0.66				
0.49						0.54	0.50	0.48	0.49	0.61	0.74	0.79	0.82	0.85	0.85	0.84	0.85	0.84	0.83	0.83	0.81	0.79	0.78			
0.59							0.67	0.64	0.58	0.57	0.61	0.78	0.85	0.87	0.88	0.91	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.91	0.91	0.89		
0.65								0.69	0.64	0.64	0.71	0.82	0.89	0.90	0.92	0.95	0.98	0.98	0.96	0.97	0.96	0.97	0.95	0.95		
0.71									0.73	0.66	0.66	0.76	0.84	0.88	0.86	0.92	0.94	0.97	0.95	0.92	0.92	0.96	0.98	0.98	0.96	
0.76										0.69	0.70	0.78	0.83	0.88	0.85	0.92	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.98	0.97	1.00	0.98	
0.80											0.73	0.72	0.80	0.83	0.88	0.85	0.90	0.91	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.99
0.86												0.76	0.79	0.82	0.88	0.84	0.86	0.88	0.92	0.93	0.93	0.93	0.92	0.94	0.95	0.96
0.90													0.80	0.83	0.85	0.82	0.87	0.88	0.89	0.90	0.92	0.92	0.90	0.92	0.93	0.94
0.93														0.83	0.86	0.82	0.84	0.85	0.90	0.87	0.90	0.91	0.88	0.90	0.91	0.93
0.97															0.83	0.79	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.90	0.84	0.87	0.88	0.91
1.00																0.83	0.88	0.90	0.91	0.89	0.92	0.96	0.89	0.91	0.96	0.97

Figura 2.22. Modello Pmax 1 con dati base ciclo

Modello dati dopo downsampling																					
Pmax1	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
0.00	0.03	0.02	0.02	0.01																	
0.02	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03															
0.05	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07													
0.08	0.17	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11											
0.12	0.22	0.21	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16									
0.16	0.29	0.27	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.21							
0.20	0.34	0.34	0.34	0.32	0.30	0.29	0.30	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25				
0.24		0.39	0.39	0.37	0.36	0.35	0.35	0.37	0.39	0.40	0.41	0.41	0.40	0.38	0.36	0.35	0.34	0.32			
0.30		0.42	0.41	0.40	0.39	0.39	0.41	0.44	0.47	0.50	0.53	0.54	0.52	0.49	0.47	0.45	0.44	0.43	0.42		
0.35			0.45	0.44	0.44	0.45	0.46	0.51	0.54	0.60	0.65	0.66	0.64	0.62	0.60	0.59	0.57	0.56	0.55		
0.42			0.52	0.50	0.49	0.51	0.52	0.58	0.63	0.70	0.75	0.76	0.74	0.73	0.72	0.72	0.70	0.69	0.68	0.65	
0.49				0.59	0.58	0.60	0.64	0.69	0.76	0.81	0.85	0.86	0.86	0.84	0.84	0.83	0.82	0.82	0.80	0.79	0.78
0.59				0.62	0.63	0.67	0.72	0.78	0.82	0.86	0.88	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.91	0.89	0.89	0.88
0.65					0.67	0.71	0.77	0.80	0.84	0.88	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.95	0.96	0.95	0.94	0.94	0.93
0.71					0.70	0.72	0.78	0.81	0.84	0.90	0.90	0.93	0.94	0.96	0.96	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96
0.76						0.72	0.77	0.80	0.83	0.89	0.89	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.96	0.96	0.97	0.96
0.80						0.74	0.79	0.80	0.84	0.89	0.89	0.92	0.92	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97
0.86							0.79	0.81	0.83	0.88	0.87	0.88	0.90	0.92	0.92	0.94	0.94	0.95	0.96	0.96	0.96
0.90								0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.89	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97
0.93									0.82	0.84	0.84	0.84	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97
0.97										0.83	0.84	0.85	0.85	0.87	0.88	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96
1.00											0.85	0.86	0.87	0.87	0.88	0.90	0.91	0.92	0.94	0.95	0.96

Figura 2.23. Modello Pmax 1 con dati dopo downsampling

Delta																						
Pmax1	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	
0.00	-0.009	-0.013	-0.010	-0.008																		
0.02	-0.002	-0.010	-0.010	-0.014	-0.010	-0.001																
0.05	0.007	0.000	-0.006	-0.011	-0.013	-0.004	0.000	-0.003														
0.08	0.020	0.016	0.009	-0.001	-0.007	-0.004	-0.004	-0.007	-0.008	-0.002												
0.12	0.031	0.032	0.026	0.016	0.005	0.001	-0.005	-0.008	-0.013	-0.010	-0.003	0.003										
0.16	0.036	0.035	0.027	0.022	0.015	0.007	-0.003	-0.011	-0.017	-0.016	-0.013	-0.011	-0.008	-0.007								
0.20	-0.023	-0.012	0.007	-0.006	0.014	0.008	0.003	-0.005	-0.016	-0.021	-0.022	-0.023	-0.017	-0.013	-0.010	-0.007	-0.007					
0.24		-0.007	0.002	-0.022	0.011	0.011	0.008	0.006	-0.008	-0.019	-0.026	-0.032	-0.028	-0.018	-0.010	-0.008	-0.007	-0.007				
0.30		0.010	-0.002	-0.035	-0.036	-0.063	-0.002	0.018	0.010	-0.009	-0.028	-0.034	-0.028	-0.013	-0.005	-0.002	-0.002	-0.006	-0.014			
0.35			-0.020	-0.030	-0.050	-0.071	-0.027	0.024	0.047	0.012	-0.018	-0.021	-0.015	-0.007	-0.003	-0.009	-0.009	-0.006	-0.019			
0.42				-0.015	-0.040	-0.066	-0.107	-0.095	-0.010	0.054	0.021	-0.006	0.005	0.008	0.010	0.004	0.005	0.008	0.000	0.002	0.014	
0.49					-0.049	-0.088	-0.125	-0.143	-0.089	-0.023	-0.020	-0.022	-0.008	-0.009	0.000	0.010	0.008	0.008	0.013	0.009	0.002	0.003
0.59					0.049	0.009	-0.095	-0.147	-0.167	-0.039	-0.002	-0.015	-0.024	-0.008	0.022	0.021	0.015	0.033	0.035	0.021	0.016	0.001
0.65						0.018	-0.074	-0.134	-0.099	-0.017	0.002	-0.007	-0.015	0.010	0.026	0.022	0.003	0.008	0.014	0.030	0.015	0.019
0.71						0.028	-0.065	-0.118	-0.044	-0.004	-0.012	-0.047	-0.011	0.000	0.014	-0.011	-0.052	-0.045	-0.004	0.013	0.018	0.002
0.76							-0.036	-0.076	-0.029	0.001	-0.012	-0.037	0.003	0.002	0.006	0.002	-0.004	-0.013	0.019	0.002	0.034	0.020
0.80							-0.006	-0.069	-0.004	-0.013	-0.005	-0.035	-0.020	-0.010	0.009	0.007	0.005	0.006	-0.003	0.003	0.010	0.019
0.86								-0.023	-0.020	-0.009	-0.006	-0.021	-0.019	-0.017	0.002	0.007	-0.010	-0.012	-0.025	-0.015	-0.008	-0.004
0.90									-0.011	0.005	0.015	-0.031	0.006	0.010	0.008	0.000	0.000	-0.010	-0.042	-0.034	-0.031	-0.023
0.93										0.013	0.015	-0.016	-0.006	-0.001	0.029	-0.012	-0.002	-0.007	-0.059	-0.052	-0.054	-0.041
0.97											-0.007	-0.054	-0.010	-0.003	-0.003	-0.008	-0.017	-0.014	-0.082	-0.074	-0.078	-0.058
1.00												-0.019	0.026	0.035	0.039	0.004	0.028	0.046	-0.037	-0.026	0.009	0.010

Figura 2.24. Delta tra i modelli

Il modello di figura 2.22 mostra un andamento meno smussato rispetto alla 2.23; ciò è dovuto al fatto che la modellazione con i dati base ciclo e gli anticipi assoluti segue più fedelmente piccole variazioni di anticipo tra breakpoint adiacenti, mentre

il modello dei dati dopo downsampling appare come un "filtraggio" dell'altro modello, andando di fatto ad appiattire le piccole irregolarità di Pmax corrispondenti a quelle della mappa di anticipo.

Alla luce di questo, risulta evidente che il miglior modo di modellare le grandezze indicanti di un cilindro è quello che utilizza i dati di tutti i cicli, al costo di un maggior impatto dal punto di vista computazionale, per via del maggior numero di misure, e dell'impossibilità di modellare il comportamento del motore intero se si vuole tenere conto di ogni λ e anticipo assoluto invece che dei valori medi.

Le considerazioni fatte sulla Pmax hanno portato a dover rivedere la calibrazione di base, modificando la zona del piano quotato dove, anche con i modelli basati sui dati di ogni ciclo, sono stati riscontrati i valori anomali di Pmax.

Grazie a questi modelli, è possibile definire altre calibrazioni, diverse da quella standard, in base ad esigenze specifiche.

Per definire i valori di λ e anticipo di queste eventuali nuove calibrazioni è stato utilizzato l'ottimizzatore presente in AVL CAMEO 4™ (figura 2.25).

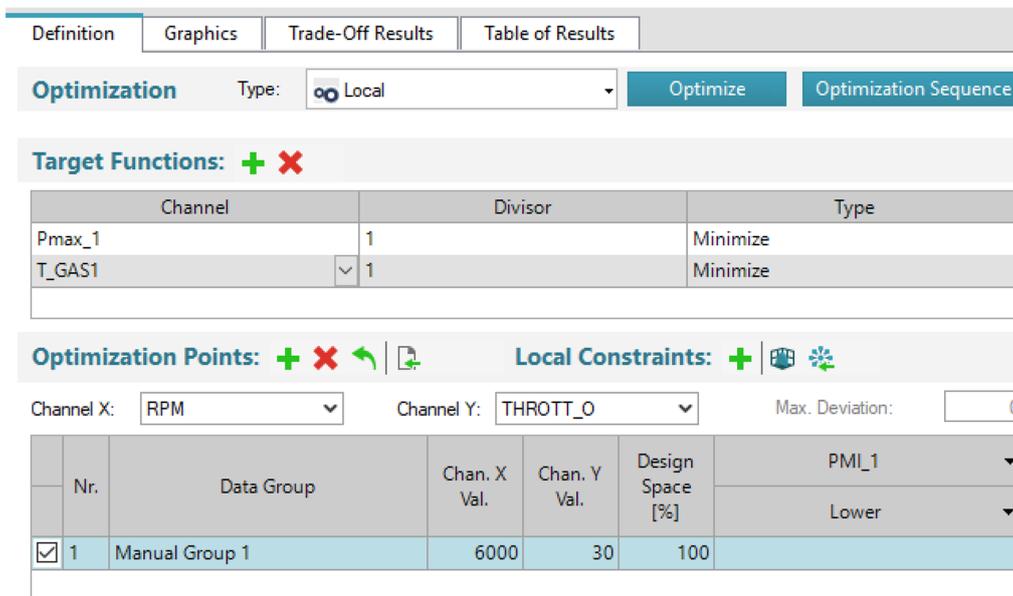


Figura 2.25. Interfaccia ottimizzatore

Nella definizione dell'ottimizzazione è presente una sezione dove specificare la o le funzioni obiettivo da massimizzare o minimizzare; nell'esempio in figura 2.25 viene richiesto di minimizzare la Pmax e la TGAS del cilindro 1.

In questo modo si può definire una calibrazione "conservativa" che riduca le sollecitazioni sul motore, a vantaggio di una maggiore affidabilità.

Chiaramente questi risultati possono essere ottenuti solamente accettando dei compromessi, come la PMI leggermente ridotta e il maggior consumo di carburante.

Nella sezione inferiore, è presente lo spazio per inserire i punti motore da ottimizzare: viene quindi determinato ogni breakpoint, inserendo *RPM* e *THROTTLE* corrispondenti, e i vincoli a cui è sottoposto l'ottimizzatore.

Ogni breakpoint può avere dei vincoli locali, espressi sia come valore assoluto massimo o minimo di una grandezza, sia come mappa limite superiore o inferiore.

Il vincolo che è sempre stato utilizzato per ogni ottimizzazione è quello di 100% di design space, che obbliga l'ottimizzatore a trovare combinazioni di parametri che si trovino all'interno dello spazio modellato, evitando di dover estrapolare, con il conseguente rischio di ottenere valori senza senso.

L'utilizzo di una singola funzione obiettivo restituisce un unico punto di ottimo, cioè esattamente quello dove tale funzione viene massimizzata o minimizzata; invece, se vengono specificate 2 o più funzioni e, come normalmente avviene, almeno due sono in contrasto tra loro, viene fornito come output un insieme di combinazioni di parametri che costituisce una superficie di Pareto.

Per considerare utilizzabile e corretta la calibrazione "conservativa" ottenuta con le impostazioni di figura 2.25, le mappe espresse in *RPM*, *THROTTLE* devono essere convertite in *RPM*, *PMI*.

Facendo un confronto tra le mappe invertite della calibrazione standard e quelle della nuova, dovrà risultare ancora soddisfatta la condizione di riduzione delle Pmax e delle TGAS poichè il controllo motore agisce in base ad una richiesta di coppia,

quindi non è detto che con una diversa calibrazione si vadano a toccare con la stessa frequenza gli stessi breakpoint *RPM*, *THROTTLE* della calibrazione standard, a causa della minor coppia erogata nel caso della calibrazione più conservativa. Naturalmente è possibile richiedere all'ottimizzatore l'erogazione della massima PMI per ottenere una calibrazione di massima prestazione (figure 2.26, 2.27 e 2.28).

		Max PMI 1																					
PMI_1	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1		
0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00																		
0.02	0.12	0.10	0.09	0.07	0.06	0.06																	
0.05	0.20	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11															
0.08	0.27	0.25	0.23	0.21	0.20	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17													
0.12	0.34	0.31	0.29	0.27	0.26	0.24	0.23	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23											
0.16	0.40	0.37	0.35	0.33	0.31	0.30	0.29	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29									
0.20	0.46	0.43	0.41	0.39	0.37	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34						
0.24		0.49	0.47	0.45	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.43	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41	0.41	0.40					
0.30			0.55	0.53	0.51	0.49	0.49	0.49	0.49	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49	0.49	0.48	0.47	0.46				
0.35				0.57	0.55	0.55	0.55	0.56	0.57	0.57	0.58	0.58	0.58	0.58	0.57	0.57	0.56	0.55	0.54				
0.42					0.60	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.64	0.65	0.65	0.65	0.66	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	
0.49						0.65	0.66	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.72	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69		
0.59							0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.79	0.81	0.82	0.82	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	0.81	0.79
0.65								0.71	0.75	0.77	0.80	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.86	0.85
0.71									0.73	0.76	0.80	0.82	0.85	0.87	0.89	0.90	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.90
0.76										0.78	0.81	0.84	0.87	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.93
0.80											0.79	0.82	0.85	0.88	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.96	0.95
0.86												0.83	0.86	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99	0.98	0.97
0.90													0.87	0.89	0.92	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	0.99	0.97
0.93														0.89	0.92	0.94	0.96	0.97	0.99	0.99	1.00	1.00	0.98
0.97															0.92	0.94	0.96	0.97	0.99	0.99	1.00	1.00	0.97
1.00																0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	0.97

Figura 2.26. Mappa di massima PMI cilindro 1

		LMB per max PMI 1																								
LMB_1	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1					
0.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20																					
0.02	0.15	0.13	0.11	0.07	0.03	0.00																				
0.05	0.26	0.26	0.25	0.22	0.19	0.15	0.12	0.09																		
0.08	0.45	0.42	0.39	0.35	0.31	0.28	0.25	0.23	0.22	0.22																
0.12	0.59	0.56	0.52	0.48	0.45	0.42	0.40	0.38	0.37	0.36	0.33	0.30														
0.16	0.71	0.68	0.64	0.61	0.58	0.56	0.53	0.51	0.49	0.45	0.42	0.38	0.33	0.28												
0.20	0.81	0.78	0.75	0.72	0.69	0.67	0.64	0.60	0.56	0.52	0.48	0.43	0.39	0.34	0.28	0.23	0.18									
0.24		0.87	0.85	0.82	0.79	0.74	0.68	0.63	0.59	0.56	0.52	0.48	0.43	0.39	0.35	0.31	0.27	0.23								
0.30			0.97	0.94	0.89	0.80	0.70	0.64	0.61	0.58	0.55	0.53	0.50	0.48	0.45	0.42	0.40	0.37	0.34	0.32						
0.35				1.00	0.85	0.72	0.66	0.63	0.61	0.59	0.58	0.56	0.55	0.53	0.52	0.50	0.49	0.47	0.46	0.44						
0.42					0.89	0.77	0.72	0.70	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58	0.57	0.55	0.54				
0.49						0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70	0.68	0.67	0.65	0.64	0.62	0.60			
0.59							0.88	0.86	0.84	0.82	0.80	0.79	0.77	0.75	0.74	0.72	0.70	0.68	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59	0.58		
0.65								0.90	0.86	0.81	0.77	0.74	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.64	0.63	0.61	0.60	0.58		
0.71									0.83	0.81	0.79	0.77	0.74	0.71	0.68	0.66	0.65	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	0.61	0.59		
0.76										0.79	0.77	0.76	0.74	0.71	0.69	0.66	0.64	0.62	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.60	
0.80											0.80	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	
0.86												0.79	0.77	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66	0.64	0.63	0.62	0.61	0.62	0.63	0.65
0.90													0.79	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67	0.66	0.64	0.62	0.61	0.60	0.61	0.63
0.93														0.78	0.76	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.62	0.60	0.59	0.59
0.97															0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.67	0.65	0.63	0.61	0.60	0.58
1.00																0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67	0.66	0.64	0.62	0.60	0.59

Figura 2.27. λ per massima PMI cilindro 1

ADV per max PMI 1																					
ADV_1	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
0.00	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51																
0.02	0.67	0.70	0.70	0.70	0.70																
0.05	0.67	0.75	0.81	0.84	0.85	0.86	0.87	0.90													
0.08	0.67	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.81	0.84	0.89	0.96											
0.12	0.58	0.61	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75	0.80	0.88	0.96	0.99	1.00									
0.16	0.53	0.56	0.59	0.62	0.66	0.69	0.74	0.82	0.90	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98							
0.20	0.53	0.56	0.59	0.61	0.64	0.69	0.76	0.85	0.90	0.92	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98				
0.24		0.55	0.56	0.58	0.62	0.70	0.79	0.84	0.86	0.87	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.92	0.93			
0.30		0.48	0.49	0.51	0.59	0.69	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87		
0.35			0.35	0.44	0.56	0.62	0.64	0.66	0.67	0.68	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79		
0.42			0.32	0.46	0.52	0.54	0.56	0.57	0.58	0.59	0.61	0.62	0.63	0.65	0.66	0.67	0.68	0.70	0.71	0.73	
0.49				0.44	0.45	0.47	0.48	0.49	0.50	0.50	0.51	0.52	0.52	0.53	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.59	0.61
0.59				0.41	0.37	0.33	0.30	0.28	0.27	0.27	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.37
0.65					0.19	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.18	0.19	0.20	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29
0.71					0.08	0.09	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21	0.22
0.76					0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.11	0.13	0.14	0.16
0.80					0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11
0.86						0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09
0.90							0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08
0.93								0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06
0.97									0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05
1.00											0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05

Figura 2.28. Anticipo per massima PMI cilindro 1

In maniera analoga, ma utilizzando i dati dopo il downsampling, si può definire una calibrazione ancora diversa, che vada a premiare maggiormente il consumo specifico (calcolato a partire dal consumo orario acquisito in base tempo), andando a imporre all’ottimizzatore dei livelli di coppia target da erogare per ogni livello di *RPM*, lasciando l’ottimizzatore libero di modificare anche l’apertura farfalla e andando a minimizzare il consumo specifico.

Per calcolare il *BSFC* (brake specific fuel consumption) espresso in [g/CV h] è stata utilizzata la seguente formula:

$$BSFC = \frac{KMA \ DYN}{COPP \ DYN \cdot RPM} \cdot \frac{30000000}{\pi \cdot 1.35962} \quad (2.11)$$

Prima di poter utilizzare il *BSFC* come funzione obiettivo dell’ottimizzatore è necessario modellarlo e per farlo in modo corretto si devono rimuovere tutti i valori dove esso risulta minore di 0, cioè quando il motore eroga una coppia negativa e quando assume valori molto alti, dovuti ad una coppia erogata molto vicina a 0, essendo a denominatore nella formula 2.11.

Sono stati imposti vincoli all’ottimizzatore in termini di λ massimo e minimo e correzione anticipo massima e minima, oltre ai vari livelli di coppia da erogare. In questo caso, per ogni punto da ottimizzare, è stato imposto un livello di coppia minimo uguale a quello massimo e tali livelli si mantengono uguali al variare degli *RPM*; così facendo si otterranno delle mappe espresse in *RPM*, *COPPIA*, che avranno necessariamente delle caselle vuote dove il motore non riesce ad erogare i livelli di coppia più alti. L’ottimizzatore fornisce l’apertura farfalla, il λ e la correzione anticipo da applicare per ogni breakpoint del piano *RPM*, *COPPIA*. Le mappe risultanti sono quelle in figure 2.29, 2.30 e 2.31.

THR minimo BSFC																						
THR	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	
0.00																						
0.05																						
0.11	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02																	
0.15	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04															
0.18	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08													
0.21	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11											
0.25	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.15								
0.28	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.21				
0.31	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.22	0.25			
0.34	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.24	0.27			
0.37	0.11	0.11	0.12	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.25	0.27	0.29			
0.40	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.21	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.26	0.28	0.29	0.31	0.33			
0.44	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25	0.25	0.27	0.29	0.30	0.32	0.33			
0.47	0.16	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.25	0.25	0.26	0.27	0.28	0.30	0.31	0.32	0.34	0.35			
0.50	0.18	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.28	0.29	0.31	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.38			
0.53	0.19	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28	0.29	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.38	0.39	0.40		
0.56		0.24	0.26	0.27	0.29	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40	0.42	0.44		
0.60		0.29	0.29	0.31	0.33	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40	0.41	0.43	0.44	0.46			
0.63		0.31	0.37	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44	0.45	0.47	0.49	0.49		
0.66		0.32	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.48	0.50	0.52	0.52		
0.69			0.45	0.44	0.43	0.43	0.43	0.42	0.43	0.43	0.44	0.44	0.45	0.46	0.48	0.49	0.51	0.53	0.55	0.55		
0.72			0.52	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47	0.48	0.49	0.51	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60		
0.75			0.56	0.58	0.56	0.54	0.52	0.51	0.50	0.50	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.56	0.57	0.59	0.61	0.64		
0.79				0.65	0.64	0.61	0.58	0.56	0.54	0.53	0.54	0.54	0.55	0.56	0.57	0.59	0.61	0.63	0.65	0.68		
0.82				0.70	0.71	0.70	0.65	0.61	0.58	0.57	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.63	0.65	0.67	0.70	0.73		
0.85				0.75	0.76	0.73	0.73	0.64	0.62	0.62	0.62	0.63	0.64	0.66	0.67	0.69	0.72	0.75	0.79			
0.88					0.81	0.81	0.77	0.71	0.68	0.67	0.67	0.68	0.69	0.71	0.72	0.75	0.78	0.83	0.93			
0.91						0.87	0.87	0.84	0.77	0.74	0.74	0.74	0.75	0.77	0.79	0.83	0.91	0.96				
0.94							0.92	0.90	0.88				0.87	0.86	0.87	0.90	0.92	0.95	1.00			
0.98													0.95	0.95	0.96	0.98						
1.00																						

Figura 2.29. Farfalla per minimo BSFC

In questo caso l’ottimizzatore tende a far aprire maggiormente la farfalla, con un λ target molto magro e il suo anticipo ottimo, in modo da migliorare il rendimento del motore; ovviamente questo è possibile solamente in parzializzato perchè a pieno carico si ricade nella stessa configurazione della calibrazione di massima prestazione, a meno che non si accetti una leggera riduzione della coppia massima erogabile.

LMB minimo BSFC																						
LMB	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	
0.00																						
0.05																						
0.11	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64																	
0.15	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	1.00																
0.18	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.64	0.91	1.00	1.00													
0.21	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.64	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00											
0.25	0.55	0.55	0.55	0.64	0.64	0.73	0.91	1.00	1.00	0.91	0.91	0.82	0.73	1.00								
0.28	0.64	0.64	0.64	0.64	0.73	0.82	0.91	0.91	0.91	0.82	0.73	0.64	0.64	0.64	0.64	0.82	0.82	0.91				
0.31	0.64	0.64	0.64	0.64	0.73	0.82	0.82	0.82	0.82	0.73	0.64	0.64	0.55	0.64	0.64	0.64	0.73	0.73	1.00			
0.34	0.64	0.64	0.64	0.64	0.73	0.82	0.91	0.82	0.82	0.73	0.64	0.55	0.55	0.64	0.64	0.73	0.73	0.82	1.00			
0.37	0.64	0.64	0.64	0.73	0.82	1.00	1.00	1.00	0.91	0.82	0.73	0.64	0.73	0.73	0.73	0.73	0.82	1.00	1.00			
0.40	0.64	0.73	0.73	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	1.00	1.00	1.00		
0.44	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
0.47	0.91	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	0.82	0.82	0.82	0.82	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
0.50	0.73	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	0.91	0.91	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73	
0.53	0.27	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.82	
0.56		0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
0.60		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
0.63		0.73	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.36	
0.66		0.09	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.55	
0.69			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64	
0.72			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	
0.75			0.73	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
0.79				0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
0.82					0.00	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
0.85						0.36	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
0.88							0.45	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	
0.91								0.27	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73	
0.94										0.45	0.82	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	0.73	0.27			
0.98													0.36	0.45	0.45	0.18						
1.00																						

Figura 2.30. λ per minimo BSFC

CADV minimo BSFC																						
CADV	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	
0.00																						
0.05																						
0.11	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0																	
0.15	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0															
0.18	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0													
0.21	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0											
0.25	1.0	1.0	1.0	0.8	0.7	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9								
0.28	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8				
0.31	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.2			
0.34	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5			
0.37	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5			
0.40	0.2	0.3	0.4	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4			
0.44	0.6	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4			
0.47	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
0.50	0.8	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1		
0.53	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2		
0.56		1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3		
0.60		0.9	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
0.63		0.9	0.5	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.0		
0.66		1.0	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.1	
0.69			0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.2	
0.72				1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	
0.75				0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	
0.79					0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	
0.82					0.2	0.7	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	
0.85						0.4	0.7	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	
0.88							0.5	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	
0.91								0.5	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7		
0.94										0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6			
0.98													0.6	0.6	0.6	0.6						
1.00																						

Figura 2.31. Correzione anticipo per minimo BSFC

Una calibrazione di questo tipo potrebbe essere utile nel caso di piste dove il limite di capienza del serbatoio diventi critico per il completamento della distanza di gara.

2.2 CAMEO WOT

2.2.1 Descrizione della prova

La prova denominata *CAMEO WOT* (*wide open throttle*) ha lo scopo di andare a descrivere le risposte del motore in alcuni punti di funzionamento a pieno carico.

I regimi analizzati sono:

- massima potenza
- massima coppia
- regime inferiore a quello di coppia massima

Inizialmente, sono stati analizzati i primi due regimi andando a variare:

- λ : carburazione
- *CADV*: correzione anticipo di accensione rispetto alla mappa base

Successivamente sono state fatte altre prove a tutti e tre i regimi variando:

- λ : carburazione
- *CADV*: correzione anticipo di accensione rispetto alla mappa base
- *INJPH*: fase di iniezione

Come nel caso del *CAMEO ETM*, tra un punto e l'altro è stato inserito un punto di riposo e la sequenza di automazione è quella descritta in figura 2.32.

Diversamente da quanto accadeva durante il *CAMEO ETM*, dove la misura veniva fatta durante un veloce transitorio, in questo caso essa avviene in stazionario e i dati ottenuti vengono mediati su tutta la durata della misura (i dati grezzi vengono comunque salvati).

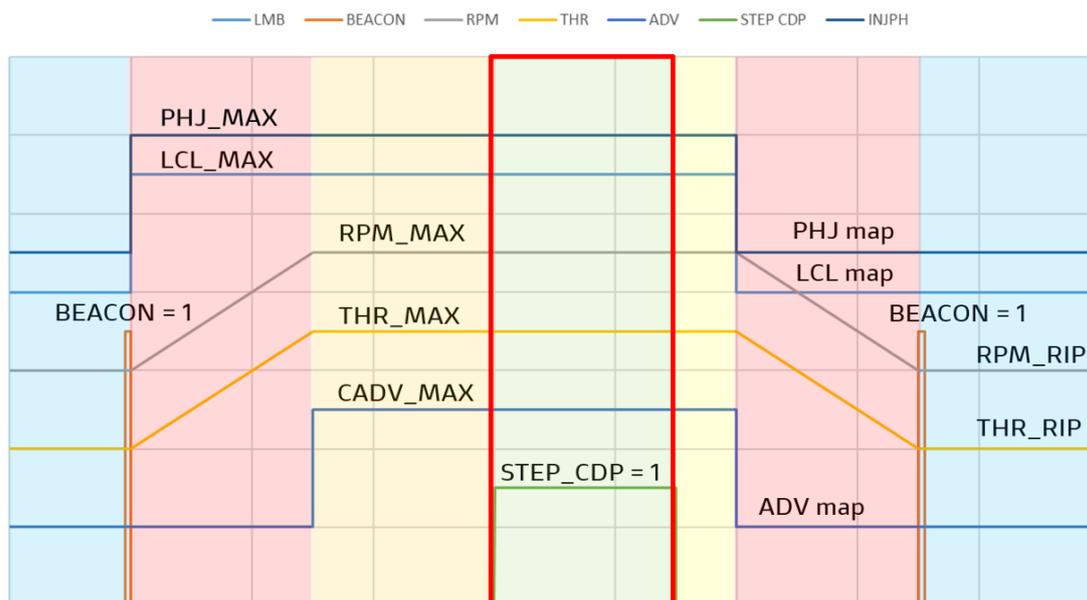


Figura 2.32. Automazione CAMEO WOT

Anche qui viene utilizzato il *BEACON* per scandire l'inizio e la fine del periodo in cui il motore si trova in una condizione diversa dal punto di riposo, ovvero da quando iniziano le rampe di giri e farfalla per portarsi nel punto stabilito, a quando terminano le rampe per tornare al punto di riposo.

In corrispondenza dell'impulso del *BEACON* vengono aggiornati il λ target e la nuova fase di iniezione, che anche qui vengono inviate da AVL CAMEO 4™.

La correzione anticipo, invece, viene aggiornata solamente quando il motore si è già portato nel punto di funzionamento previsto; questo viene fatto per non stare troppo tempo con anticipi maggiori di quelli di mappa, dato che le correzioni vengono fatte sia in positivo che in negativo.

Dopo un breve tempo di stabilizzato, lo *STEP CDP* si porta ad 1 e qui inizia la *memo*, che termina nel momento in cui lo *STEP CDP* torna a 0.

A questo punto si ha un breve tempo di attesa per essere certi che nella *memo* non vengano considerati dei dati di quando iniziano le rampe di discesa per tornare

al punto di riposo. Questo potrebbe verificarsi a causa di piccole imprecisioni di sincronizzazione delle varie fasi dell'automazione.

2.2.2 Preparazione della prova

Generazione dei DoE

Sono stati preparati due diversi DoE S-optimal, uno per le prove con variazioni di λ e CADV e uno per le prove dove è stata aggiunta la variazione della fase di iniezione; i DoE sono stati eseguiti allo stesso modo e con le stesse variazioni per i diversi regimi. Il DoE con solamente due parametri variabili è facilmente visualizzabile in figura 2.33.

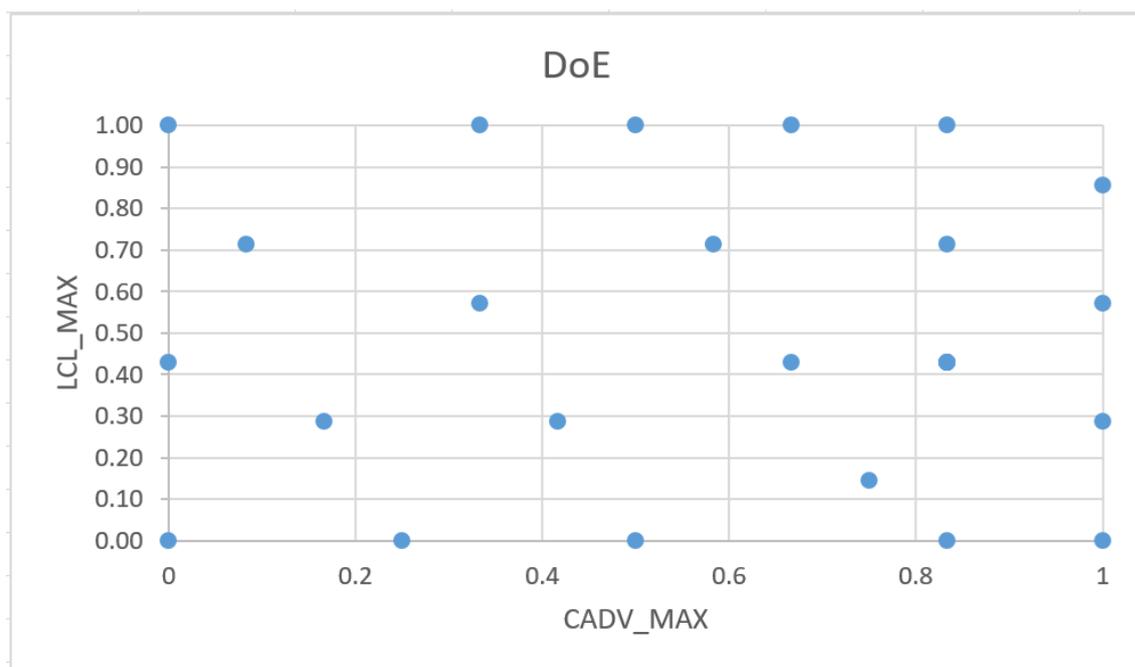


Figura 2.33. DoE CAMEO WOT con variazioni di λ e CADV

Quello che comprende anche la fase di iniezione, sviluppandosi in tre dimensioni risulta più complicato da visualizzare, di seguito sono riportate le tre viste in due dimensioni, facendo collassare una variabile sul piano delle altre due.

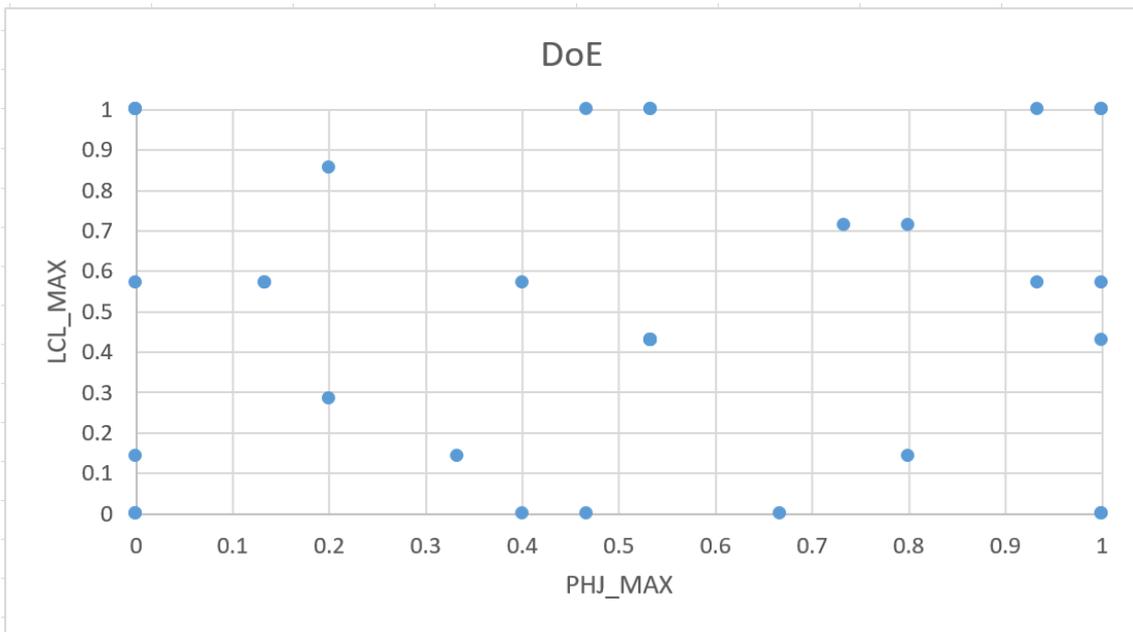


Figura 2.34. DoE CAMEO WOT con variazioni di λ , CADV e INJPH

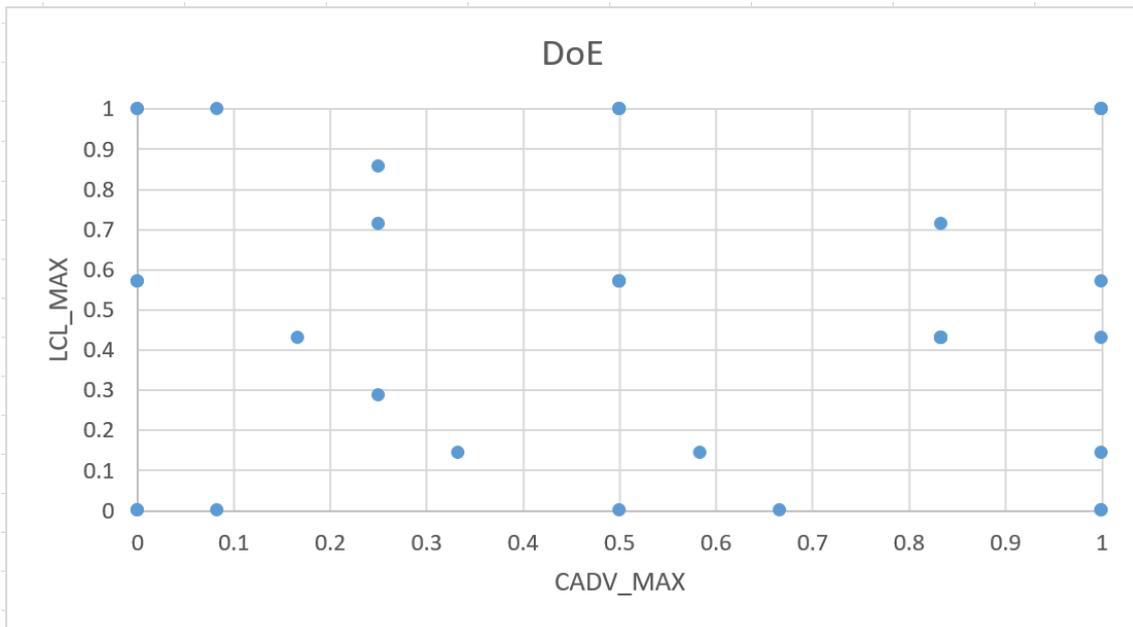


Figura 2.35. DoE CAMEO WOT con variazioni di λ , CADV e INJPH

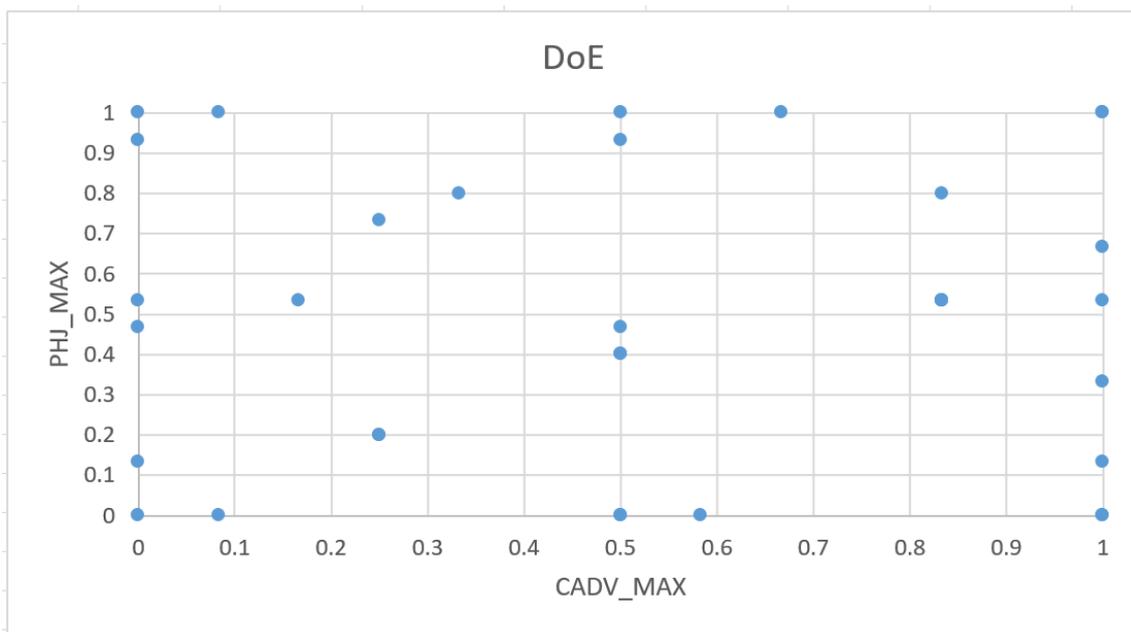


Figura 2.36. DoE CAMEO WOT con variazioni di λ , CADV e INJPH

Definizione dell'automazione del banco

Per quanto riguarda la programmazione dell'automazione, è stato utilizzato un file di parametri molto simile a quello del *CAMEO ETM*, andando a modificare solamente la parte dove viene definita la sequenza di operazioni da eseguire per effettuare le misure.

2.2.3 Svolgimento della prova

Sono state fatte le 5 diverse prove (3 con fase iniezione e 2 senza), separate tra loro. In questo modo la farfalla e il regime a cui deve portarsi il motore per eseguire i punti del DoE (come anche la farfalla e il regime di riposo) sono stati imposti dall'operatore all'inizio di ogni prova, dato che restano uguali per tutta la durata della stessa.

Questo è stato fatto tramite una delle tante finestre che possono essere create all'interno di AVL PUMA Open 2TM e che consentono di interagire con il banco. Successivamente, passando alla modalità automatica e lanciando AVL CAMEO 4TM, inizia l'esecuzione vera e propria del test.

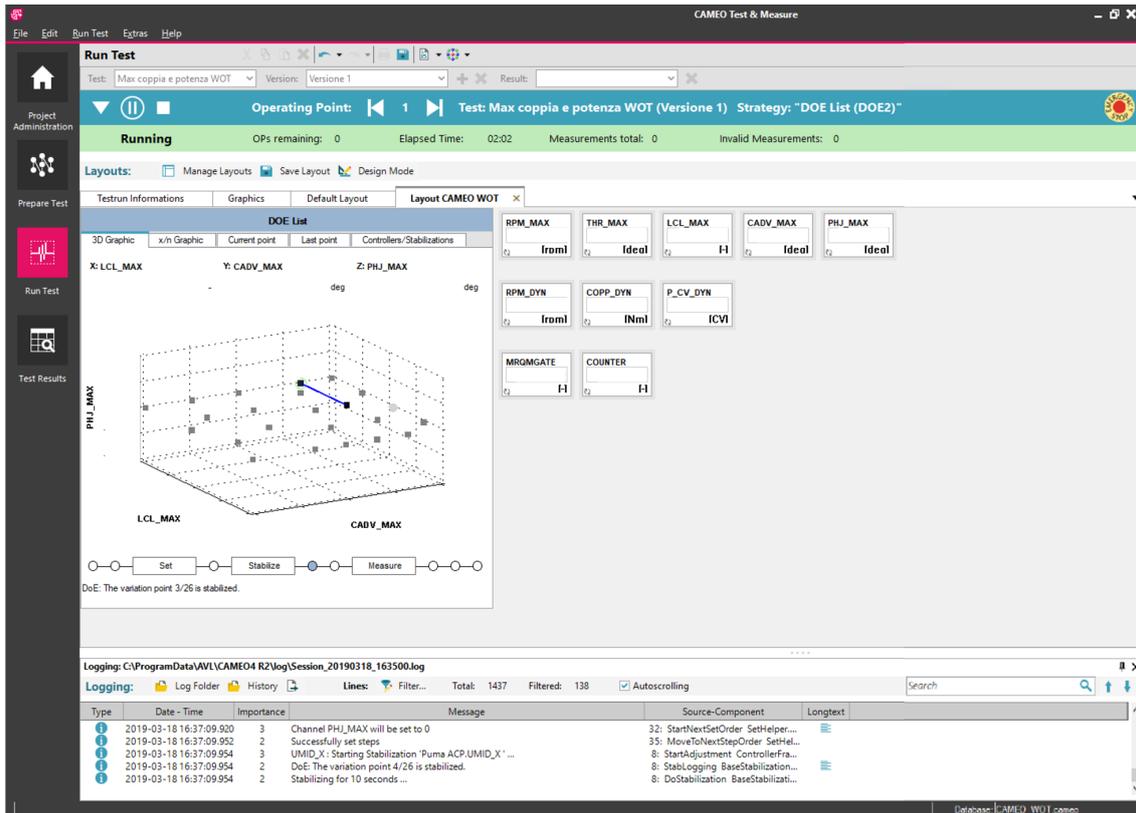


Figura 2.37. Run Test CAMEO WOT

Dalla schermata di figura 2.37 è possibile tenere sotto controllo tutti i parametri di interesse, mettere in pausa o fermare la prova o, in caso di emergenza, premere un kill switch virtuale che arresta immediatamente il motore.

2.2.4 Modellazione

Le grandezze principali che sono state modellate sono:

- Coppia
- Consumo orario
- KNOCK 1, 2, 3, 4
- APmax 1, 2, 3, 4
- MFB50 1, 2, 3, 4
- Durata combustione media (MFB90 - MFB10 medio)
- Pmax 1, 2, 3, 4 e media
- PMI 1, 2, 3, 4
- Deviazione standard PMI 1, 2, 3, 4 e media
- TGAS 1, 2, 3, 4 e media

Per quanto riguarda i due test senza la variazione della fase di iniezione, i modelli sono stati creati con una RNN, utilizzando un solo local model di terzo grado e con la Ridge Regression attiva.

Questa scelta è stata fatta poichè, rimanendo nell'intorno della combinazione di λ e anticipo di massima prestazione, l'andamento atteso di tutte le grandezze esaminate può essere approssimato molto bene da un polinomio di terzo grado.

L'utilizzo di un maggior numero di local models o un ordine maggiore del terzo porterebbero al rischio di *overfitting* (anche se tale rischio viene ridotto grazie all'utilizzo della Ridge Regression).

Per la creazione dei modelli dove è stata modificata anche la fase di iniezione, a differenza del caso precedente, sono stati usati 3 local models di terzo grado, sempre con Ridge Regression attiva.

2.2.5 Risultati

Sono stati messi a confronto i modelli relativi allo stesso breakpoint, con e senza variazione della fase di iniezione.

In figura 2.38 e 2.39 sono riportati esempi della coppia con e senza fase di iniezione.

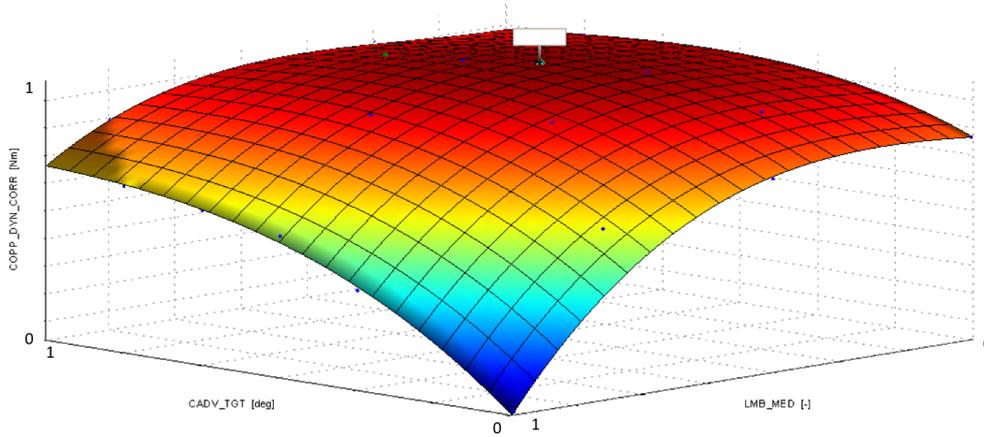


Figura 2.38. Modello coppia senza fase iniezione

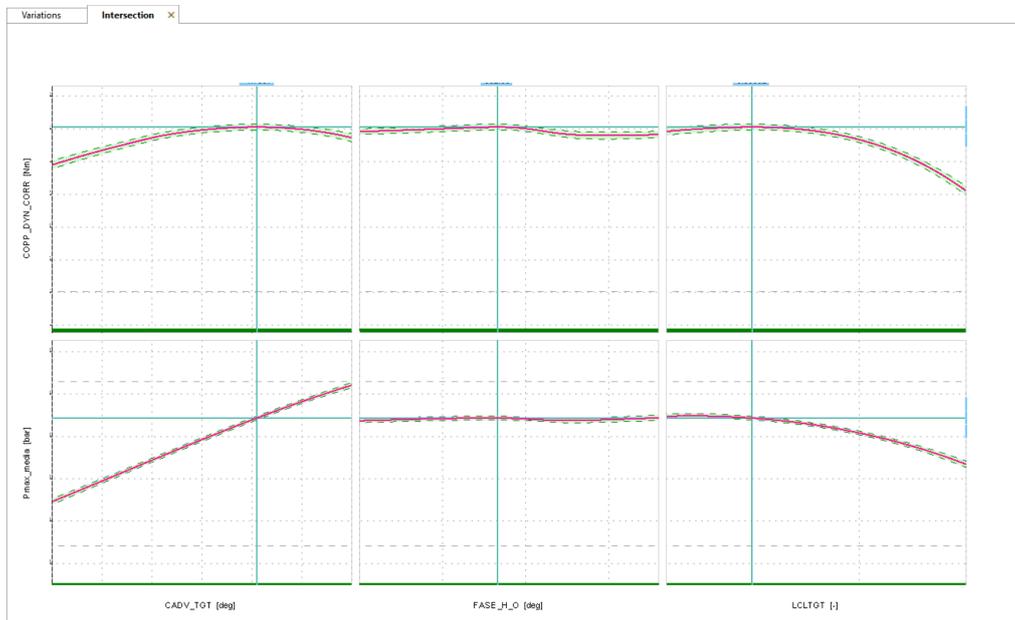


Figura 2.39. Modello coppia e Pmax media con fase iniezione

Imponendo la fase di mappa ai modelli con variazione, si è visto che ci sono alcune piccole differenze rispetto agli altri. Questo è sicuramente dovuto al basso numero di punti utilizzato, considerando che è stata aggiunta una dimensione. In ogni caso, è stato riscontrato un impatto molto piccolo della fase di iniezione sui modelli, rispetto a quello che hanno il λ e l'anticipo, per cui sono stati analizzati principalmente i modelli senza fase. Oltre alla coppia e alla Pmax, che saranno oggetto di ottimizzazione, sono state analizzate altre grandezze come indici di detonazione, baricentro e durata della combustione (MFB50 e MFB90 - MFB10) e temperature dei gas di scarico, in figura 2.40 sono riportati alcuni esempi.

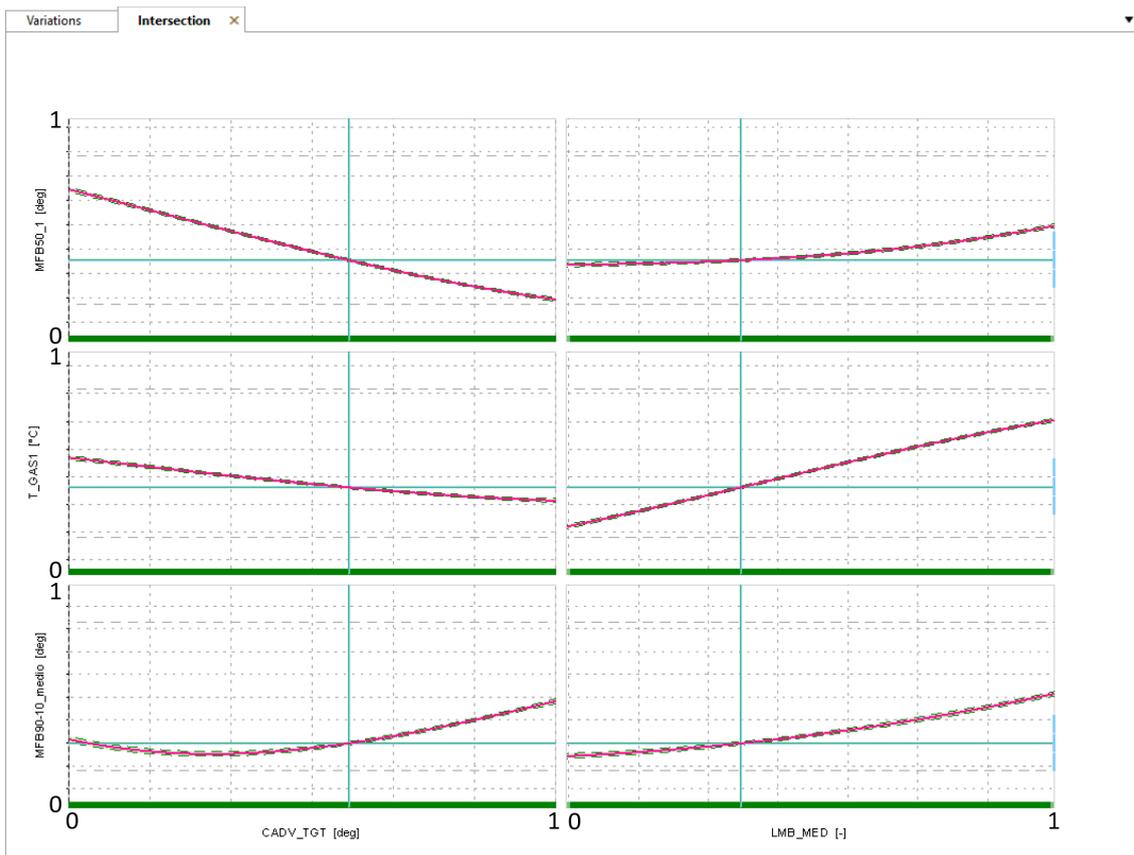


Figura 2.40. Modello MFB50, T GAS e durata combustione

Come detto in precedenza, è stata intrapresa una prima fase di ottimizzazione per trovare la combinazione di parametri che restituisce la massima coppia.

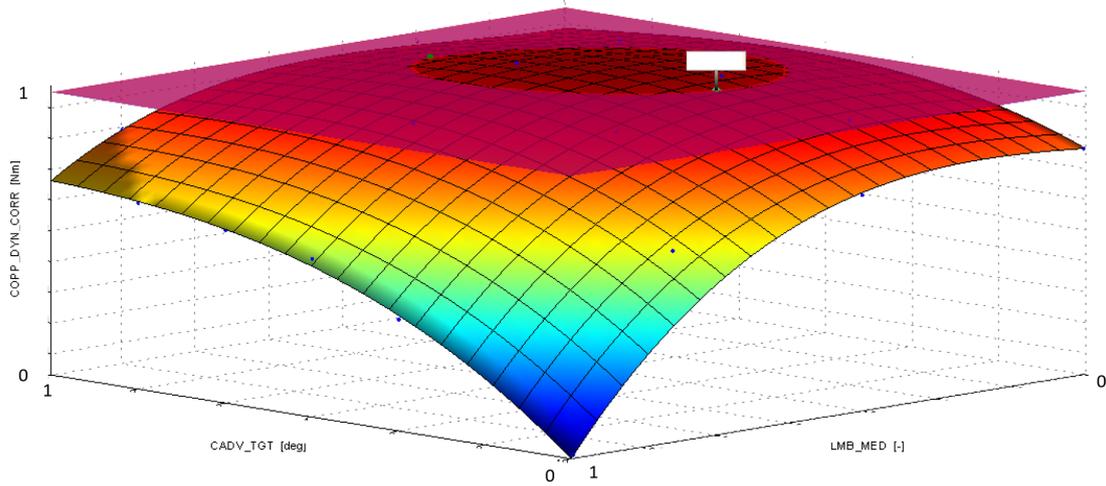


Figura 2.41. Ottimizzazione minima Pmax: coppia

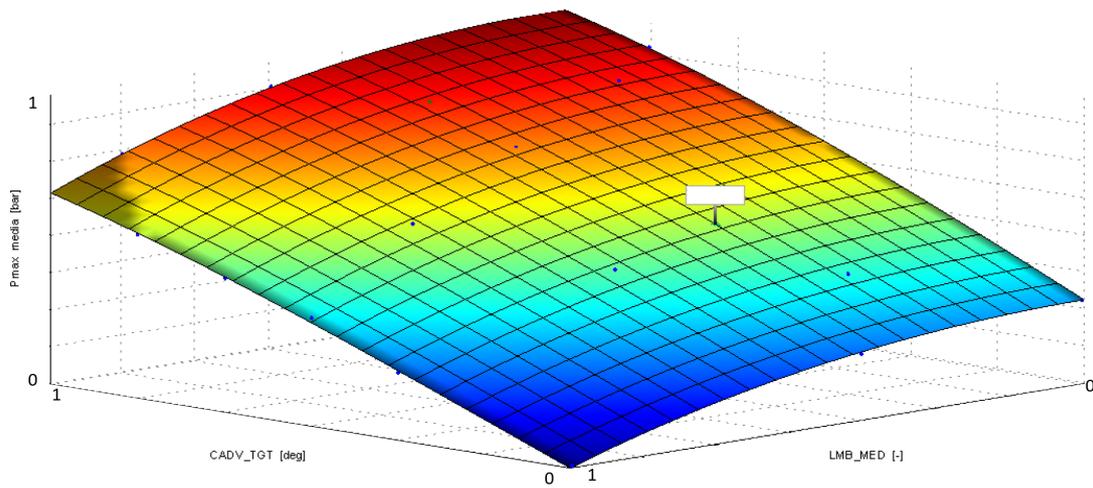


Figura 2.42. Ottimizzazione minima Pmax: Pmax

Noti i valori di coppia massima ottenibili, questi sono stati ridotti di una certa percentuale e i valori ottenuti sono stati utilizzati dall'ottimizzatore come vincolo

di coppia minima da erogare, andando allo stesso tempo a minimizzare la pressione massima mediata sui 4 cilindri.

In figura 2.41 è presente un piano che rappresenta questo vincolo, tale per cui saranno accettabili solamente combinazioni di parametri che permettano di erogare una coppia maggiore del livello a cui è posto tale piano.

Ovviamente, dovendo ridurre la pressione massima, il punto trovato dall'ottimizzatore sarà sicuramente sulla curva di intersezione tra il piano e la superficie che rappresenta la coppia.

Dal grafico in figura 2.43 è evidente come sia possibile rinunciare ad una piccola percentuale di coppia per avere un grande abbassamento delle pressioni massime in camera di combustione.

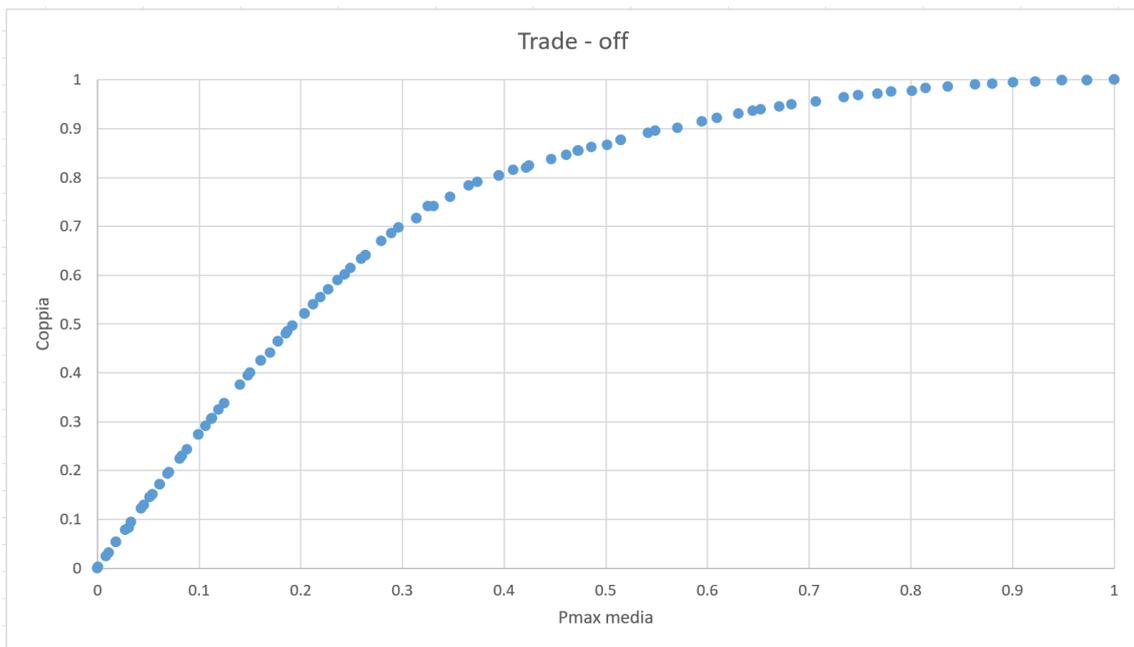


Figura 2.43. Trade-off: coppia vs Pmax media

La stessa procedura è stata ripetuta per tutti i breakpoint analizzati, andando a trovare il miglior compromesso tra coppia e pressioni massime.

Riguardo alla coppia, inoltre, sono state ricavate le correzioni anticipo da applicare in caso di modifica del λ target rispetto alla mappa base.

2.3 Compensazione benzina in transitorio

2.3.1 Descrizione dell'attività

Questa attività è stata effettuata per risolvere un problema di carburazione che si è verificato durante una sessione di prove libere nella stagione 2018; in particolare sono state riscontrate delle grosse deviazioni dal λ target dei cilindri orizzontali, con conseguenti buchi di coppia, nel momento in cui il pilota chiedeva un veloce transitorio di manopola in uscita da alcune curve.

Una di queste situazioni è chiaramente visibile in figura 2.44.

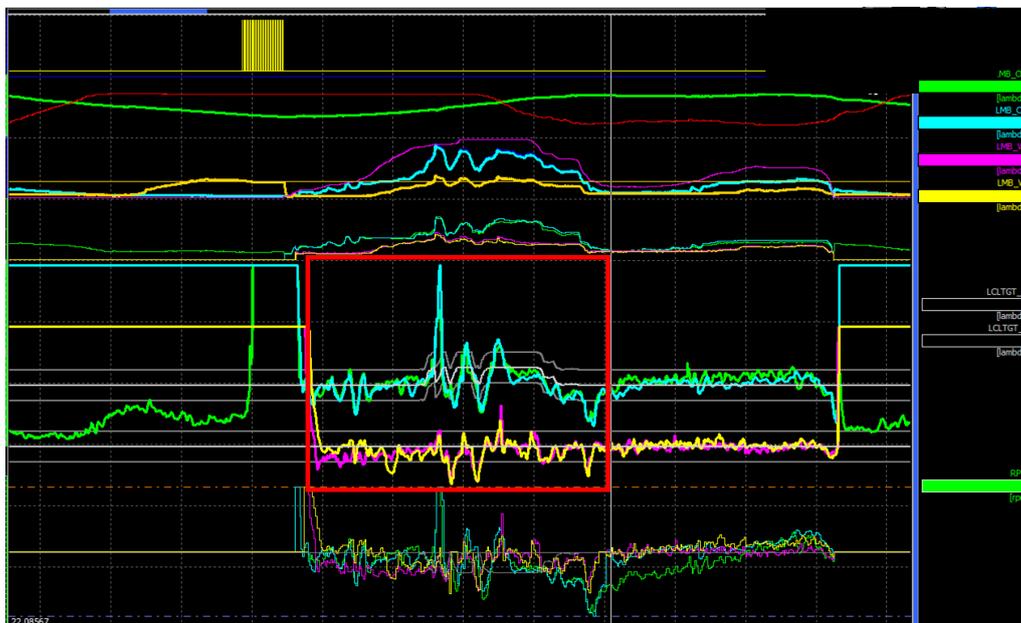


Figura 2.44. Esempio sbandamento λ

Il Software Unico Dorna consente l'utilizzo di diverse strategie per la compensazione del film fluido; in quell'occasione è stata utilizzata la logica mostrata in figura 2.45; la correzione applicata al tempo di iniezione risulta proporzionale alla derivata filtrata dell'angolo di apertura farfalla.

Il *GAIN* agisce solamente sull'entità della correzione e non ne influenza la forma,

mentre l'*HOLD* e il *DECAY* rappresentano rispettivamente il tempo di correzione costante al valore massimo e la velocità con cui la correzione decresce per tornare a 0; un *DECAY* alto significa che la rampa di discesa si esaurisce in un tempo minore, quindi è più ripida.

Lo scopo di questa attività è stato quello di cercare di ridurre la deviazione dei segnali λ dal target, andando a modificare i tre parametri che descrivono la forma della correzione.

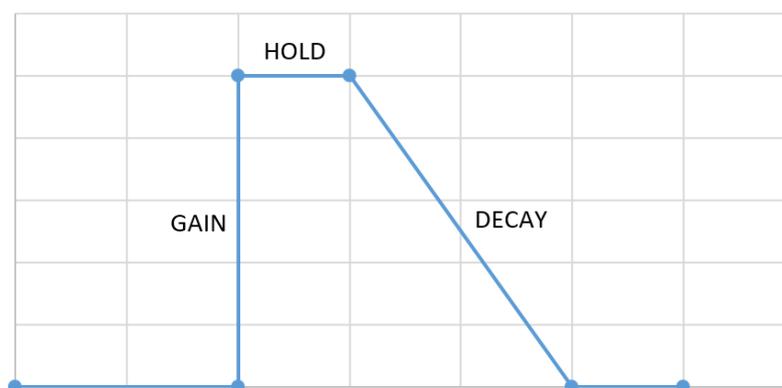


Figura 2.45. Forma del compensatore

Sono stati replicati i tratti di pista affetti dal problema, costruendo ad hoc un giro che contenesse solamente le curve dove il problema risultava più evidente, in modo da non accumulare chilometri inutili sul motore che ha effettuato le prove.

I giri così creati sono stati riprodotti variando i 3 parametri del compensatore in base ad un primo DoE esplorativo, generato da AVL CAMEO 4TM secondo 3 diversi criteri, ognuno dei quali conta 15 combinazioni di parametri. I diversi DoE sono stati valutati in base al calcolo della distanza media tra tutti i design points, dopo aver normalizzato i range di variazione di ogni parametro tra 0 e 1, mediante l'utilizzo di un layout su AVL CONCERTO 5TM realizzato appositamente.

Il primo DoE è di tipo “Latin Hypercube”, cioè un insieme di n punti (in questo caso $n = 15$) proiettati su n diversi livelli di ogni *variation* definiti casualmente [6].

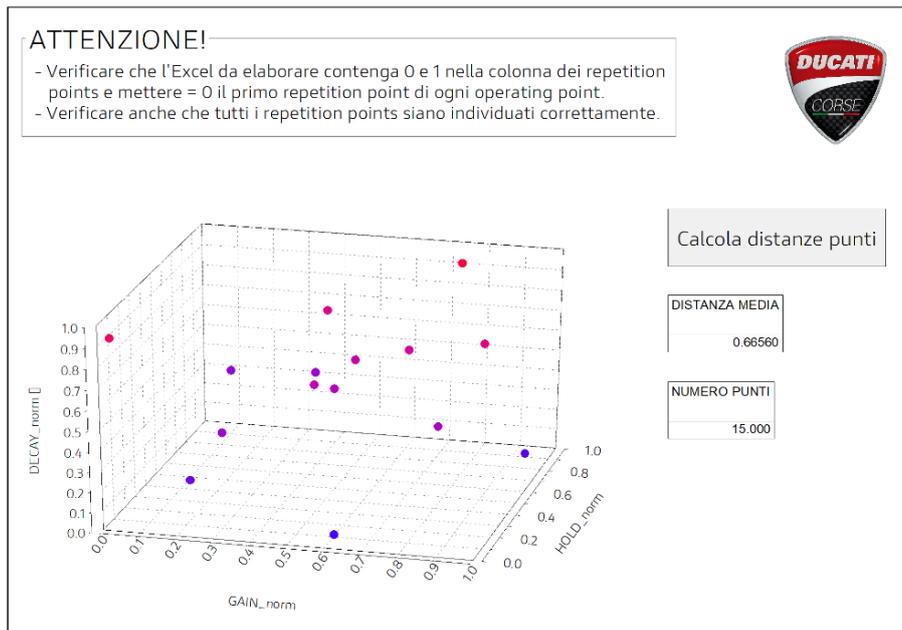


Figura 2.46. Latin hypercube design

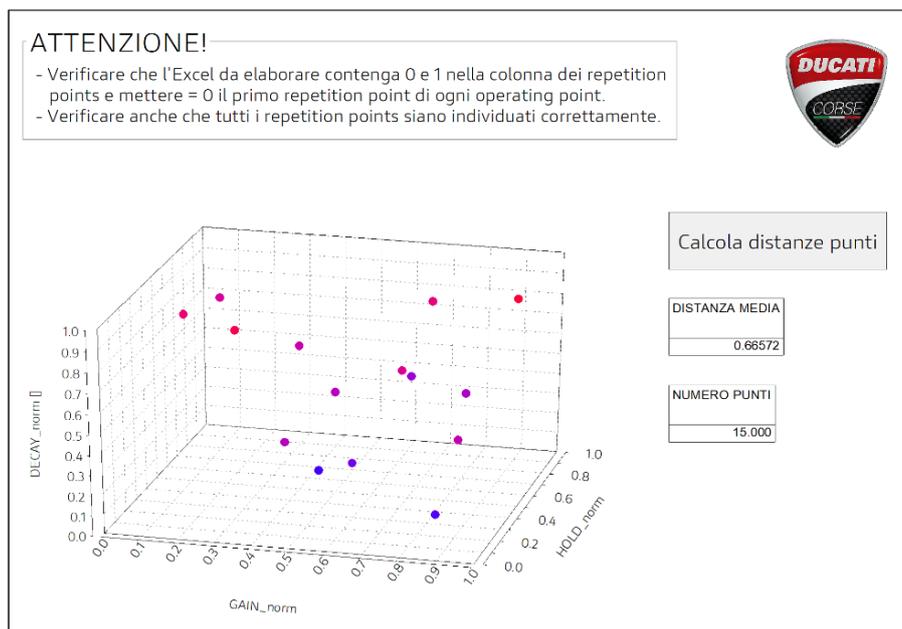


Figura 2.47. Sobol design

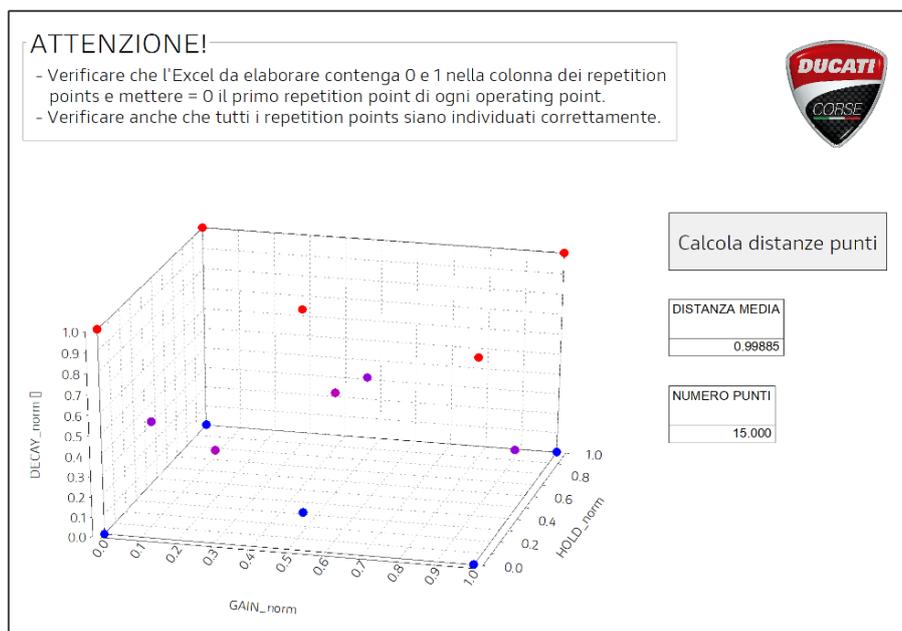


Figura 2.48. S-Optimal design

Il secondo DoE è di tipo “Sobol”, il cui nome deriva dal matematico russo I. M. Sobol e che viene considerato un design “space filling” ma ha l’inconveniente di coprire male gli estremi del Design Space [6].

Il terzo DoE è di tipo “S-optimal”, cioè un altro design “space filling” che garantisce una distribuzione omogenea dei punti di design su tutto lo spazio, coprendo bene anche gli estremi [6].

Osservando le figure 2.46, 2.47 e 2.48, il design S-Optimal risulta essere, come previsto, quello che copre meglio gli estremi del Design Space e che ha una distanza media tra i punti molto maggiore degli altri due, che mettono un maggior numero di punti al centro, sacrificando le estremità.

Essendo un primo step esplorativo è più utile, a parità di numero di punti, andare a investigare il comportamento agli estremi del Design Space, al costo di perdere accuratezza di modellazione nella zona centrale, per poi andare a concentrarsi maggiormente nella zona dove sarà più probabile trovare l’ottimo; per questo motivo si

è deciso di procedere con il design S-optimal.

2.3.2 Esecuzione primo DoE

Sono stati effettuati 2 giri per ogni punto del DoE (3 giri per il primo punto, perché il primo giro di tutta la prova verrà scartato).

I giri sono stati eseguiti uno di seguito all'altro e i valori di *GAIN*, *HOLD* e *DECAY* sono stati aggiornati una volta ogni due giri, caricando in centralina una nuova mappa durante una frenata prima dell'inizio del nuovo giro, senza la necessità di interrompere la prova.

Grazie ad un export di Wintax si sono ricavati due indici di errore nelle zone interessate dal problema (Track Sections individuate automaticamente):

- *LCL LEAN RICH IDX O wgt Evo* (errore integrale λ cilindri orizzontali)
- *LCL LEAN RICH IDX MAX O wgt Evo* (errore massimo λ cilindri orizzontali)

wgt (weighted) significa che l'errore viene pesato diversamente in base al suo segno, in questo modo errori verso il grasso sono considerati meno rilevanti di errori verso il magro, a causa del diverso impatto che hanno sulla coppia erogata.

Si è visto che il parametro che ha la maggiore influenza è il *GAIN* e il valore 1.3 risultava sempre il migliore, per questo motivo sono state effettuate alcune prove aggiuntive portando il *GAIN* a 1.6.

Anche con il *GAIN* a 1.6 non si è raggiunto un punto di minimo locale dell'errore integrale delle λ della bancata orizzontale, per questo si è deciso di intraprendere una seconda campagna di prove, con un nuovo DoE.

Quanto appena detto è evidente se si procede con la modellazione (RNN, 1 local model 3° grado) e l'ottimizzazione di AVL CAMEO 4TM degli indici relativi alla prima curva (quella più critica), con la funzione obiettivo di minimizzare l'indice *LCL LEAN RICH IDX O wgt Evo* considerando di non poter uscire al di fuori del

100% del Design Space.

Il risultato dell'ottimizzazione è:

- $HOLD = 1$
- $DECAY = 1$
- $GAIN = 1.6$

che sarà il punto centrale del DoE successivo; dalla figura 2.49 si nota il mancato raggiungimento di un minimo con gradiente nullo, quindi il punto trovato si trova in una zona dove c'è sicuramente margine di miglioramento.

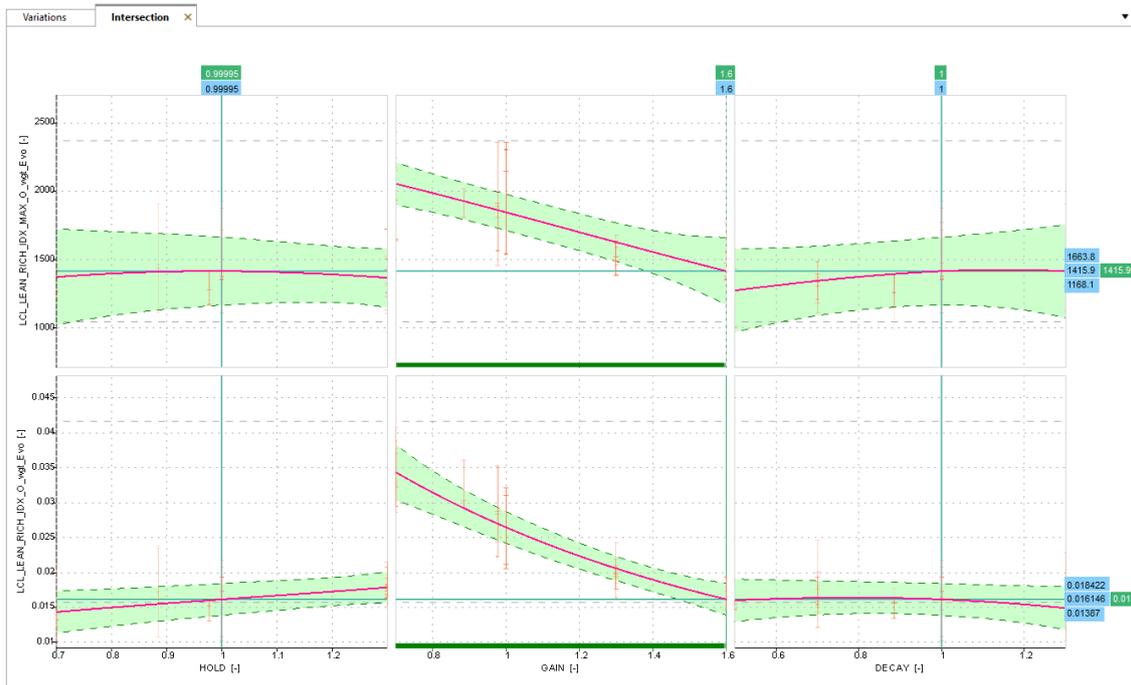


Figura 2.49. Modello primo DoE fuel transient

2.3.3 Esecuzione secondo DoE

In base ai risultati ottenuti dal primo DoE, si è deciso di lasciare l'*HOLD* invariato rispetto alla mappa base (si è notato che molto spesso non interviene) e di far variare solamente *GAIN* e *DECAY*. Anche in questo caso si è utilizzato un DoE S-Optimal.

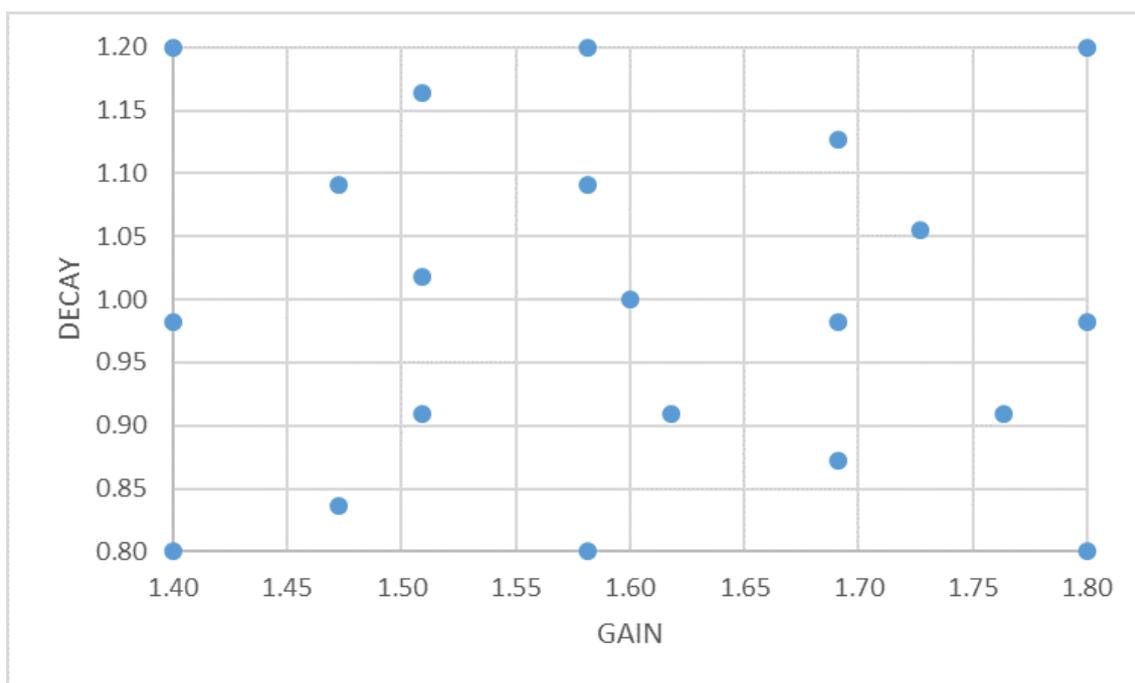


Figura 2.50. Secondo DoE fuel transient

Su AVL CAMEO 4TM sono stati creati dei modelli per individuare la combinazione ottimale di *GAIN* e *DECAY* per minimizzare l'errore integrale delle λ della bancata orizzontale.

Come nel primo DoE, ci siamo concentrati sul modello realizzato a partire dai dati ottenuti nella prima curva.

Il modello di figura 2.51 è stato ottenuto utilizzando una RNN, con 5 local models di 3° grado e Ridge Regression attivata.

Gli errori massimi di tutte le curve e gli errori integrali delle curve 2, 3 e 4 sono risultati difficilmente modellabili per via degli errori molto piccoli dove il rumore di

misura ha un grande impatto sulla misura stessa, per cui non se ne è tenuto conto. Da qui si nota che il minimo dell'errore si ha per un *GAIN* di 1.7 e un *DECAY* di 0.8, che ha un'influenza molto bassa nella zona di interesse.

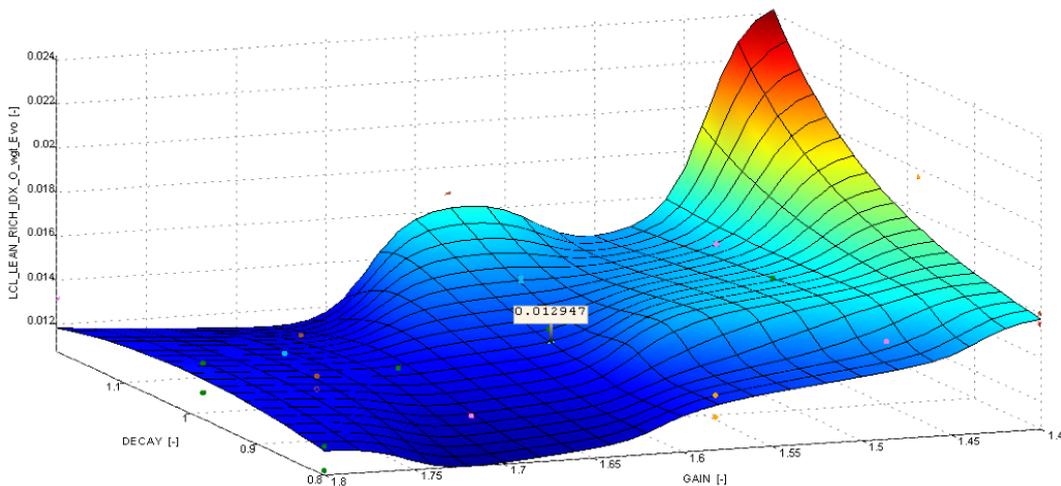


Figura 2.51. Modello secondo DoE fuel transient

2.3.4 Prove successive

A differenza delle precedenti prove dove si andava a modificare tutto il piano quotato, in queste prove sono state applicate le modifiche solamente nelle zone di intervento del compensatore.

Osservando i dati Wintax si è visto che ancora non si riesce a compensare del tutto la manovra relativa alla prima curva, quindi sono state fatte altre prove aumentando solo il *GAIN* e aumentando sia *GAIN* che *DECAY*, andando così ad applicare una correzione più “impulsiva”; in seguito è stato fatto un ulteriore tentativo variando anche la fase di iniezione.

Abbiamo notato che la diversa fase ha un effetto sulla carburazione, nonostante le

modifiche applicate al compensatore. Sarà necessaria una ulteriore fase di ottimizzazione del compensatore nel caso in cui la nuova fase garantisca un vantaggio in termini di coppia.

La nuova mappa con la miglior combinazione di parametri trovata fino ad ora (compresa la fase di iniezione) è stata provata in alcuni giri di pista e, a parte alcune differenze dovute alla non ripetibilità tra un giro e l'altro, non si sono visti peggioramenti rispetto alla mappa base, cioè quella da cui si è partiti per questo tipo di attività.

A partire dall'ultima mappa provata, è stata fatta una nuova campagna di misure applicandole ulteriori *GAIN* e *DECAY* su tutto il piano quotato; il DoE è quello di figura 2.52.

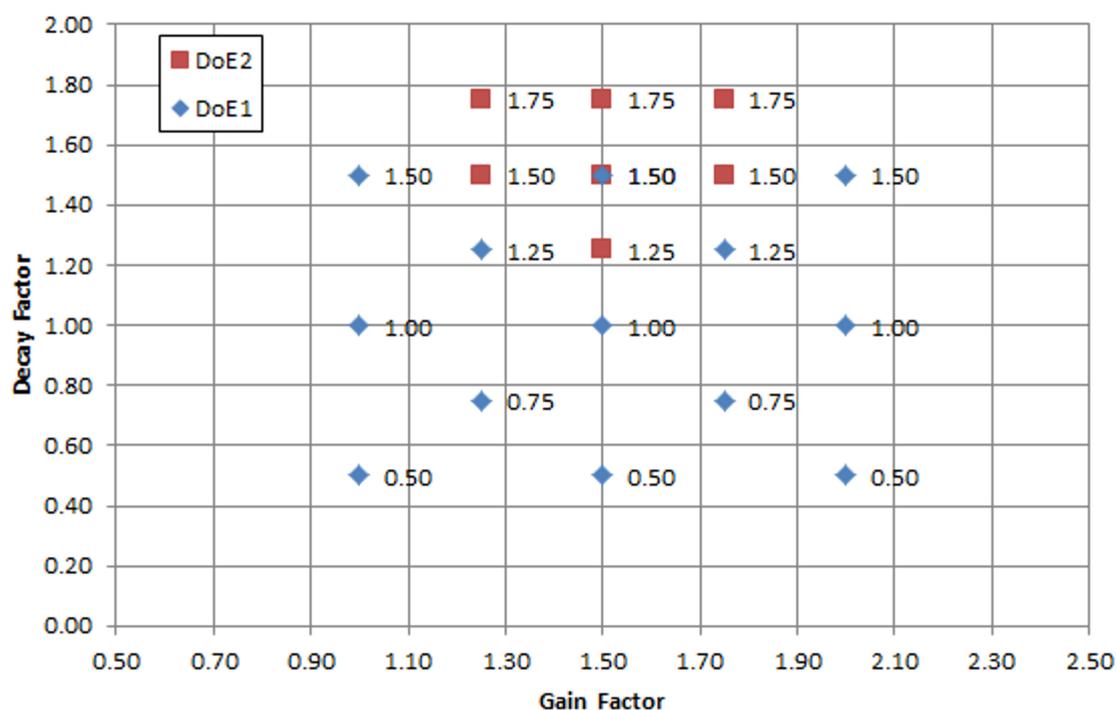


Figura 2.52. Terzo DoE fuel transient

Per l'analisi di queste prove, inoltre, sono state apportate le seguenti modifiche:

- Definizione manuale delle Track Sections su Wintax, per isolare meglio le manovre più critiche
- Indici *MAX* resi in valore assoluto, invece che con il proprio segno
- Modifica soglia errore di coppia per valutazione *IDX wgt* (l'indice integrale si carica solamente quando viene superata la soglia di errore di coppia rispetto a quella attesa)

Precisazioni sul significato degli indici:

- Gli indici *LCL LEAN RICH IDX X EVO* considerano l'integrale dell'errore λ , solo dove questo è superiore a una certa soglia
- Gli indici *LCL LEAN RICH IDX MAX X EVO* integrano localmente l'errore per bancata quando il precedente ha derivata (filtrata) non nulla
- Gli indici *wgt* agiscono in modo analogo ai precedenti, con la differenza che la banda di mascheramento dell'errore è espressa in % di coppia
- L'indice *LCL LEAN RICH IDX MAX X Evo NoAbs* rappresenta l'errore locale di λ . Ne viene considerato il valore minimo (per valutare i soli buchi in ricco) e successivamente elaborato secondo il proprio valore assoluto.

Si è deciso di considerare il contributo di tutte e 4 le curve analizzate, per cui è stata fatta una sommatoria degli indici di ogni curva a parità di *GAIN* e *DECAY* applicati; le curve che hanno errori più grandi avranno un maggiore impatto nella costruzione degli indici totali.

Dopo la somma, ogni indice è stato adimensionalizzato per assumere valori compresi tra 0 (valore minimo) e 1 (valore massimo), quindi i nuovi indici presi in esame sono i seguenti:

- *LCL LEAN RICH IDX MAX O Evo NoAbs adim*
- *LCL LEAN RICH IDX MAX O wgt Evo adim*
- *LCL LEAN RICH IDX O wgt Evo adim*

A partire da questi indici è stato creato un KPI che ne tiene conto in ugual misura (facendo una media pesata con peso uguale a 0.33 per tutti gli indici), in figura 2.53 i modelli su AVL CAMEO 4TM dei tre indici e del KPI.

I 4 modelli sono stati creati con una RNN di grado 5, 1 local model, overlap medio (in questo caso non influisce perché il local model è uno solo) e Ridge Regression attiva; le zone in ombra indicano che quelle parti di modello sono al di fuori del Design Space.

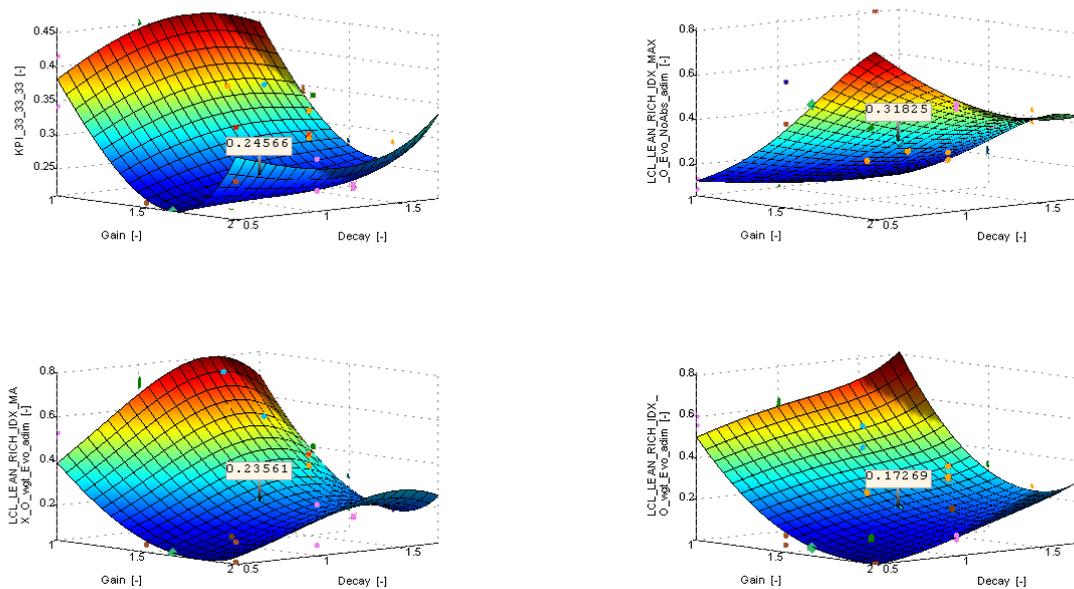


Figura 2.53. Modello 1 terzo DoE fuel transient

Si evidenzia un comportamento opposto tra i due indici pesati in coppia e quello che tiene conto solo dell'errore della lambda in ricco; infatti il contributo di quest'ultimo sposta il minimo del KPI verso *GAIN* minori rispetto a quelli richiesti per

ottenere i minimi degli indici pesati in coppia.

Da questi modelli si nota una sensibilità maggiore del *GAIN* rispetto al *DECAY*; in ogni caso, variando il *DECAY*, il *GAIN* che mantiene al minimo il KPI risulta sempre compreso tra 1.5 e 1.7 circa.

Data la scarsa qualità dei modelli dovuta alla difficoltà di replicare e misurare esattamente le manovre esaminate, sono stati provati anche altri parametri di creazione dei modelli, in figura 2.54 riporto un esempio. In questo caso è stato modificato l'overlap da medio a grande e il numero di local models è stato portato da 1 a 10; nonostante i modelli siano più “nervosi” rispetto ai precedenti, il comportamento è molto simile.

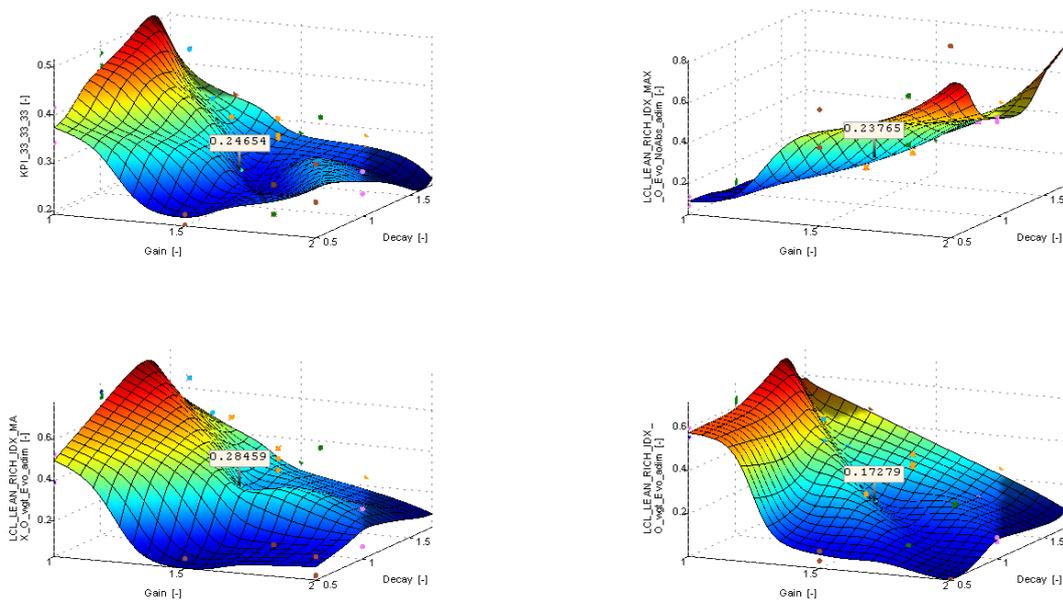


Figura 2.54. Modello 2 terzo DoE fuel transient

Di seguito le immagini delle prove che si avvicinano di più ai valori di *GAIN* che minimizzano il KPI (curve 1 e 3).

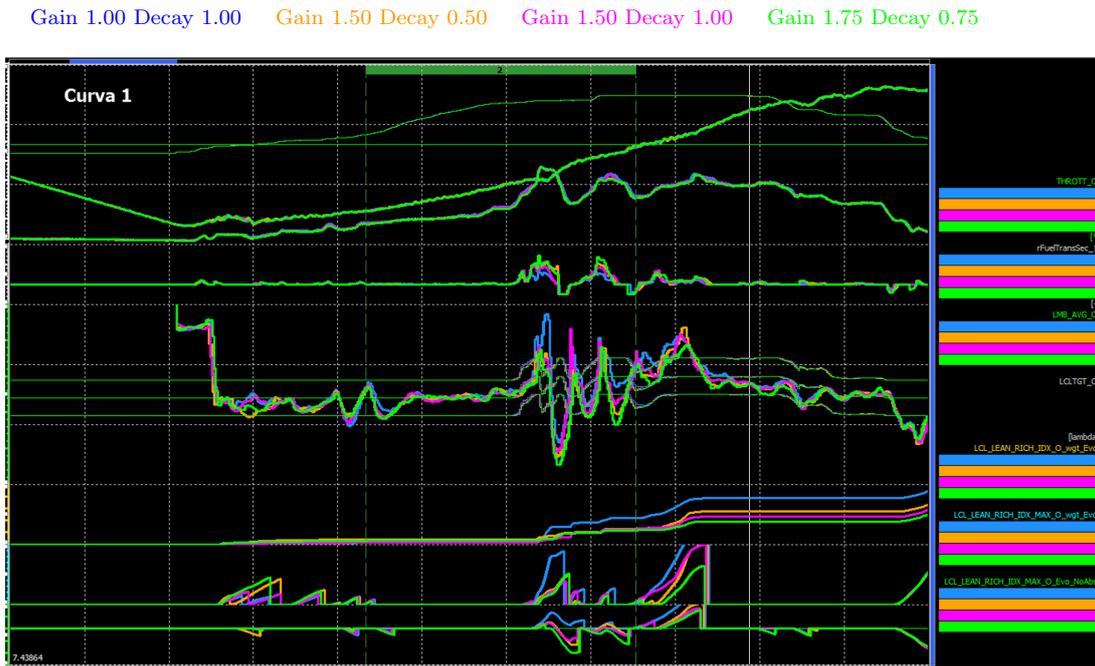


Figura 2.55. Risposta λ curva 1

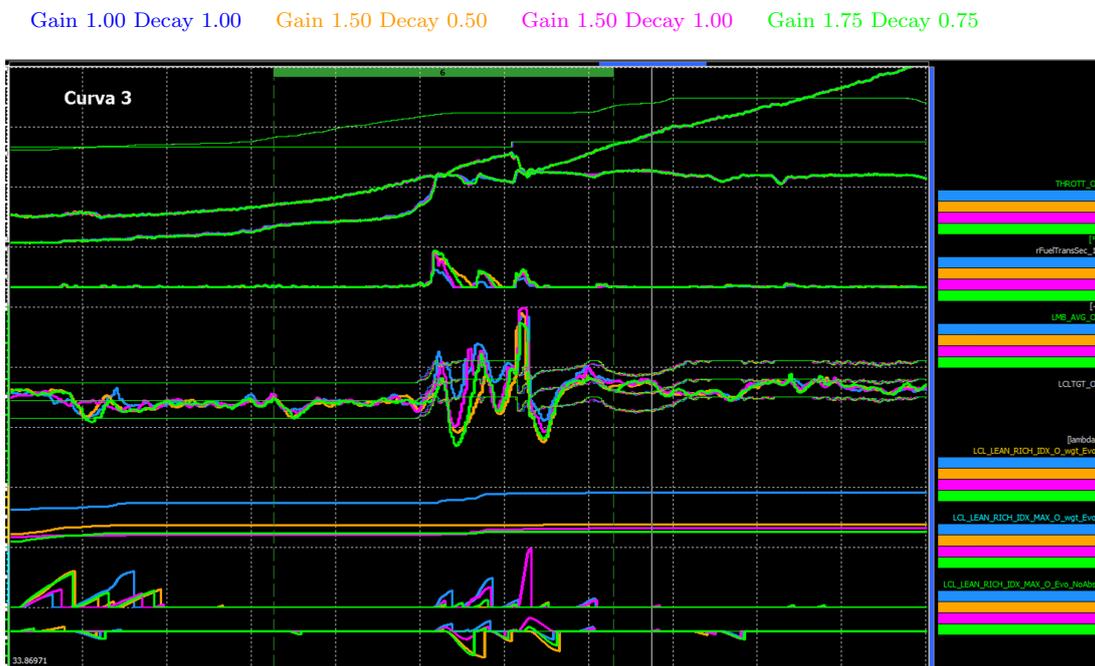


Figura 2.56. Risposta λ curva 3

2.3.5 Possibili sviluppi

Nel caso di ulteriori prove future, potrebbe essere utile lasciare il *GAIN* a un valore di circa 1.6 e far variare solamente il *DECAY*, con un range di variazione molto ampio, in modo da poter costruire meglio dei nuovi modelli e trovare più chiaramente il minimo assoluto del KPI.

Capitolo 3

Conclusioni

Le attività descritte in questa tesi dimostrano la grande utilità di avere a disposizione uno strumento che permetta la modellazione di ogni tipo di grandezza e la relativa ottimizzazione.

La corretta scelta dei test da eseguire e la conseguente modellazione hanno permesso di dover impiegare per poco tempo delle risorse costose come un banco prova e un motore MotoGP, con il grande vantaggio di aver ottenuto una grande quantità di informazioni molto utili per una conoscenza più approfondita del comportamento di tale motore.

I modelli hanno anche permesso di riscontrare alcune criticità che altrimenti non sarebbero emerse e che sono state prontamente corrette.

Un ulteriore passo in avanti potrebbe essere quello di utilizzare AVL CAMEO 4TM per eseguire quello che viene chiamato "Active DoE" [7], cioè una procedura di test che crea i vari modelli durante lo svolgimento della prova e modifica la prova stessa determinando le configurazioni migliori da misurare per arrivare più velocemente al punto di ottimo richiesto, riducendo al massimo i tempi e i costi dell'attività in sala prova.

Bibliografia

- [1] Scheda tecnica Desmosedici GP, <https://www.ducati.com/it/it/racing/motogp/ducati-team-moto-desmosedici-gp>
- [2] Zerbini, G., Cugnetto, G., and Ivarson, M., *Model-Based Optimization of the Ducati Multistrada MY15 with Desmodromic Variable Valve Timing (DVT)*, 6th International Symposium on Development Methodology, Wiesbaden, 2016.
- [3] Bartoccini, D., Niedermaier, P., and Grassberger, H.P., *Model-Based Approach for Engine Performance Optimization*, SAE Technical Paper 2018-32-0082, 2018, doi:10.4271/2018-32-0082.
- [4] AVL List GmbH, *AVL CONCERTO 5TM Help, version R2.5*, July 2018.
- [5] AVL List GmbH, *AVL CONCERTO 5TM - Exploration guide*
- [6] AVL List GmbH, *AVL CAMEO 4TM R2 User's Guide Basics*
- [7] AVL List GmbH, *AVL CAMEO 4TM R2 User's Guide Advanced*