

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE in INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

in

Propulsori termici e ibridi per autoveicoli M

*Implementazione e calibrazione del controllo in coppia
di un motore turbocompresso da competizione*

CANDIDATO

Lorenzo Laraia

RELATORE

Chiar.mo Prof. Ing. Nicolò Cavina

CORRELATORI

Ing. Daniele Genova

Ing. Giovanni Sartoni

Anno Accademico 2015/2016

Sessione III

Indice

Introduzione	3
Capitolo 1. L'azienda	7
1.1 La storia.....	7
1.2 Oggi.....	9
1.3 Le competizioni.....	15
Capitolo 2. Il motopropulsore.....	19
2.1 Erogazione della coppia	19
2.2 La sovralimentazione	22
2.3 Sistema di controllo.....	24
2.4 Motronic	27
Capitolo 3. Il modello.....	33
3.1 Architettura del sistema.....	33
3.1.1 Input del sistema	33
3.1.2 Elaborazione della richiesta del pilota	35
3.1.3 Scelta dell'anticipo.....	36
3.1.4 Individuazione della riserva di coppia	37
3.1.5 Scelta della coppia lato aria.....	38
3.1.6 Scelta dell'angolo di apertura farfalla	38
3.1.7 Controllo della <i>waste-gate</i>	41
3.2 Simulazioni	42
Capitolo 4. Calibrazione	45
4.1 Specifiche di calibrazione	47
4.1.1 Specifica per la calibrazione dei modelli polmone e farfalla.....	48
4.1.2 Specifica per la calibrazione delle coppie perse	52

4.1.3	Specifica per la prova di variazione del lambda	55
4.1.4	Specifica per le prove di spazzolata di anticipo	57
4.2	Elaborazione dati.....	58
4.2.1	Calibrazione del modello polmone	61
4.2.2	Verifica del modello polmone.....	65
4.2.3	Calibrazione del modello farfalla.....	68
4.2.4	Calibrazione delle coppie perse	71
4.2.5	Calibrazione delle mappe in funzione del lambda	74
4.2.6	Calibrazione delle mappe dalle prove di variazione di anticipo	75
4.3	Interfaccia di calibrazione	83
Capitolo 5.	Verifica e ultimazione delle calibrazioni	87
5.1	Verifica a banco	87
5.2	Verifica su pista.....	91
5.2.1	Prima sessione di prove.....	92
5.2.2	Seconda sessione di prove.....	95
5.2.3	Terza sessione di prove	96
5.2.4	Quarta sessione di prove	99
Conclusioni	103
Bibliografia e sitografia	105
Ringraziamenti	107

Introduzione

L'obiettivo di questa tesi è quello di illustrare le fasi di implementazione, calibrazione e verifica della struttura di coppia per il controllo software di un motore turbocompresso da competizione. La vettura su cui è montato il propulsore deriva da uno dei modelli stradali Ferrari; il progetto è stato svolto presso la sede dell'azienda costruttrice a Maranello, in particolare negli uffici del reparto Applicazione Motopropulsore, con l'aiuto di Daniele Genova, ingegnere che si occupa principalmente della progettazione dei software di centralina delle vetture Ferrari.

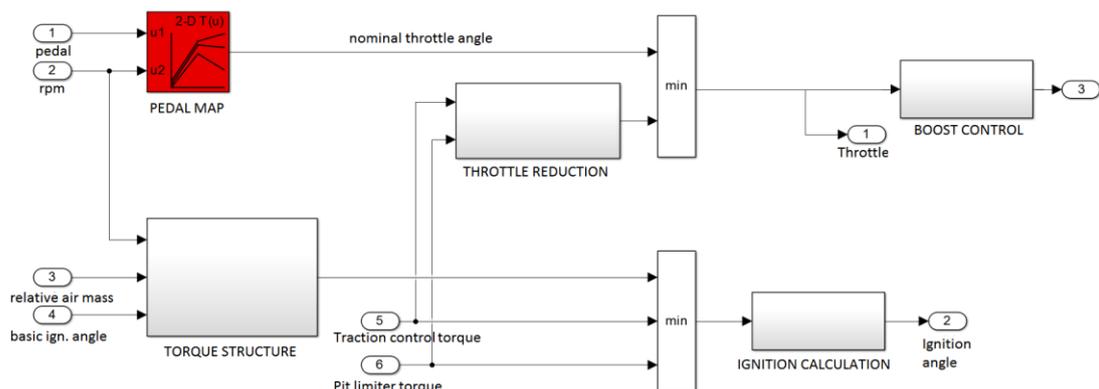


Figura 0.1 - Strategia di controllo attuale

La strategia di controllo originale è basata sulla relazione diretta tra l'apertura della valvola a farfalla e la pressione esercitata dal pilota sul pedale dell'acceleratore. Gli interventi secondari (*anti-lag*, *warmup*, *start*, *traction control*, limitatore, etc.) contribuiscono al calcolo definitivo delle attuazioni sotto forma di offset di apertura di farfalla o di angolo di accensione. L'angolo di accensione viene scelto in modo da garantire le massime efficienze in fase di combustione. Questo permette di minimizzare i consumi ma non garantisce un controllo preciso e immediato della coppia erogata: la regolazione della coppia attraverso la variazione della massa d'aria aspirata è più lenta rispetto alla regolazione mediante la variazione di anticipo, il cui valore può essere modificato da un ciclo di combustione all'altro. Come per l'attuazione della farfalla, allo stesso modo l'angolo di accensione può variare rispetto al valore ottimale in seguito a richieste di funzioni di controllo secondarie.

Il controllo del sistema turbocompressore è basato sull'angolo di farfalla e sui giri motore. L'obiettivo del compressore è quello di realizzare una certa pressione a valle della farfalla, e per fare questo confronta il target di pressione con il valore misurato e muove la valvola *waste-gate* di conseguenza.

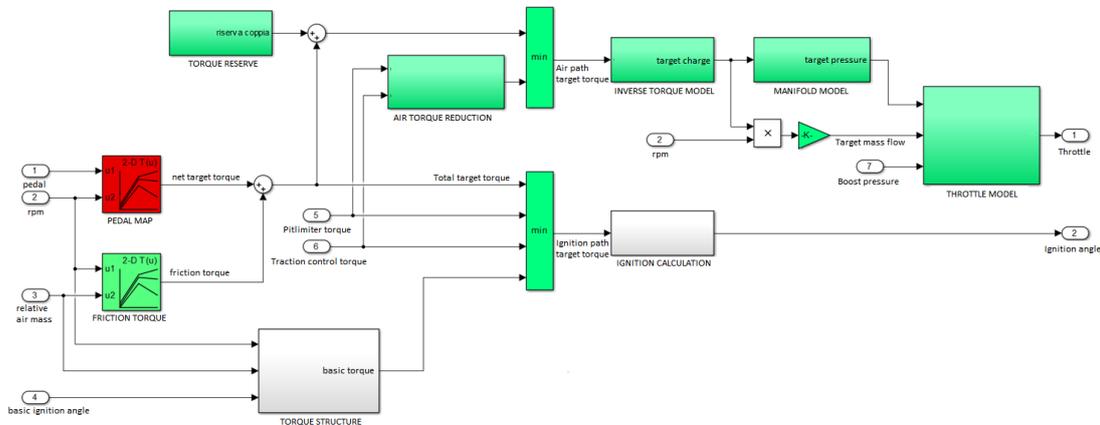


Figura 0.2 - Strategia di controllo in coppia

La necessità di migliorare le prestazioni della macchina da competizione e allo stesso tempo aumentare la sua guidabilità si è tradotta nella decisione di implementare una strategia di controllo in coppia nel software di centralina. La pressione sul pedale dell'acceleratore viene convertita in richiesta di coppia, e quindi di accelerazione; rispetto alla strategia di controllo precedente, la risposta del motore risulta più precisa e controllabile. Per ridurre il *turbo-lag* viene aggiunta una "riserva di coppia". In questo modo l'angolo di apertura farfalla è maggiore e viene aspirata più aria rispetto a quella che basterebbe aspirare per erogare la coppia richiesta attuando l'anticipo ottimo. Di conseguenza, il controllo dell'anticipo interviene diminuendo l'angolo di accensione in modo da ridurre l'efficienza di erogazione della coppia. Nel sistema attuale, l'affondata sul pedale non corrisponde ad un aumento di coppia immediato perché il turbocompressore non può rispondere istantaneamente al movimento della farfalla, a causa delle dinamiche "lente" di riempimento e svuotamento del collettore di aspirazione. Il fatto di poter regolare la coppia attraverso l'anticipo ha due vantaggi: in primo luogo, quando il pilota richiederà un aumento della coppia in fase di accelerazione, il motore reagirà quasi istantaneamente. In secondo luogo, grazie alla maggiore temperatura e portata dei gas di scarico, in turbina viene trasferita una quantità di entalpia notevole anche ai bassi carichi. Grazie a questi due fattori, il *turbo-*

lag risulta minore o addirittura nullo. Un aspetto negativo di cui bisogna tenere conto è il probabile aumento dei consumi. Diminuendo l'anticipo di accensione cala infatti l'efficienza e per erogare la stessa coppia è necessario aumentare il combustibile iniettato. L'entità di questo peggioramento dovrà essere determinata in fase di verifica su pista del sistema di controllo.

Il progetto di aggiornamento del sistema di controllo può essere suddiviso in tre fasi. Come prima cosa è stato realizzato attraverso Simulink il modello del controllo in coppia; lo sviluppo delle funzioni eredita gran parte della sua struttura dal software dei motori di serie Ferrari, con notevoli semplificazioni applicate in quegli ambiti in cui, o per la necessità di limitare i costi o per l'assenza di particolari vincoli normativi, risulti possibile evitare inutili complicazioni.

La parte più lunga del progetto è stata quella di calibrazione. L'inserimento di nuove mappature e la necessità di modificare quelle già esistenti ha richiesto numerose attività a banco, cominciate con la scrittura delle specifiche di calibrazione e terminate con la verifica in sala prove e su pista delle mappe calibrate. In questa fase ho scritto personalmente le istruzioni per lo svolgimento delle prove a banco, elaborato i dati con script e funzioni scritte in linguaggio MATLAB (utilizzando e modificando alcuni *tool* di calibrazione Ferrari) e analizzato i dati di verifica con particolari software (Measure Data Analyzer e WinDarab).

L'ultima parte è stata quella di verifica e irrobustimento del sistema di controllo in coppia. Questo è avvenuto inizialmente al banco prove, dove è stato possibile aggiustare le calibrazioni e inserire nuove funzionalità all'interno del software, e con una successiva fase di prove in pista, con le quali il software è stato ulteriormente migliorato, le calibrazioni sono state rifinite ed è stato possibile ottenere il parere di piloti professionisti. Grazie alla loro approvazione e all'assenza di problemi di funzionamento del sistema, ad oggi il controllo in coppia è utilizzato con continuità durante tutti i test in pista.

Capitolo 1. L'azienda

Ferrari S.p.A. è un'azienda automobilistica italiana che produce macchine sportive di lusso e partecipa a numerose competizioni nel mondo delle corse. Tutte le nuove vetture vengono ideate, progettate e infine assemblate nella sede di Maranello, in provincia di Modena; anche la fase di produzione avviene presso questo complesso, con l'eccezione della lastratura dei telai e delle scocche in alluminio che vengono prodotti nello stabilimento Scaglietti di Modena.

1.1 La storia

I meriti della nascita e della crescita di Ferrari S.p.A. devono essere attribuiti senza dubbio alla passione e all'intraprendenza del suo fondatore, Enzo Ferrari.



Figura 1.1 - Enzo Ferrari

Nato nel 1898 a Modena, Ferrari dimostrò fin da giovane una forte inclinazione per le automobili; dopo i difficili anni della prima guerra mondiale, durante i quali perse il padre e il fratello, venne assunto dalla Carrozzeria Giovannoni di Torino, che si occupava di convertire autocarri leggeri dismessi dall'uso bellico in torpedo o *coupé de ville* di lusso. Il suo compito era soprattutto quello di collaudare gli autotelai ricondizionati; in questo modo riuscì ad acquisire un'ottima tecnica di guida che gli permise di essere assunto poco tempo dopo come assistente al collaudo presso un'impresa meccanica milanese, la C.M.N. (Costruzioni Meccaniche Nazionali). Fu in questa azienda che ebbe inizio la carriera da pilota nel mondo delle corse di Enzo

Ferrari; dopo alcune gare alla guida di una Isotta Fraschini 100/110 IM Corsa, il giovane modenese iniziò a correre su Alfa Romeo, scuderia che lo accompagnerà per vari motivi nel corso di tutta la vita. Come pilota ufficiale della casa del Biscione prese parte a diverse corse; dopo una di queste gare, quella al Circuito del Savio, conobbe la madre di Francesco Baracca, eroico pilota dell'aviazione italiana ai tempi della prima guerra mondiale. Fu lei a suggerirgli di far dipingere sulla propria vettura l'emblema personale del figlio, un cavallino rampante, come portafortuna.

Nel 1929, all'età di 31 anni, fondò a Modena, in via Trento e Trieste, la Scuderia Ferrari, società sportiva che aveva l'obiettivo di far correre i propri soci. Inizialmente non fu altro che un satellite dell'Alfa Romeo, per la quale gestì le competizioni sportive fino al 1938, anno in cui la Scuderia fu sciolta e Ferrari assunse l'incarico di direttore dell'Alfa Corse. Il 6 settembre dell'anno successivo il "Drake", soprannome attribuito ad Enzo Ferrari per la somiglianza caratteriale con il famoso corsaro inglese, lasciò definitivamente l'Alfa Romeo, con l'impegno di non usare il nome Ferrari in relazione a corse o macchine per almeno quattro anni, ma con il personale obiettivo segreto di riuscire un giorno a battere la casa del Biscione con una vettura da lui costruita. Fondò pochi giorni dopo l'Auto Avio Costruzioni (A.A.C.) nella stessa sede della ex Scuderia Ferrari; su base FIAT realizzò le prime due vetture A.A.C. che fece gareggiare senza successo nell'ultima Mille Miglia prima della guerra.



Figura 1.2 - Logo Ferrari

Durante gli anni del conflitto l'Auto Avio Costruzioni fu trasferita a Maranello, dove venne costruita la prima parte di quella che poi diventerà la famosa sede Ferrari. L'attività principale era quella di fabbricare rettificatrici oleodinamiche per soddisfare l'elevata richiesta di tecnologie legate all'industria bellica. Alla fine della guerra Enzo Ferrari cominciò la progettazione completa della prima vettura marcata Ferrari, con l'idea futuristica di adottare un motore 12 cilindri a "V" che potesse utilizzato in più

campi, dalle Monoposto alle vetture Sport, fino ai modelli Gran Turismo. La macchina, denominata “125 S”, fu completata pochi mesi dopo e il 12 marzo 1947 Enzo Ferrari la guidò nella prima prova su strada.



Figura 1.3 - Ferrari 125 S

Da quel momento l’azienda iniziò a crescere in modo esponenziale in termini di capitale, *know-how* tecnologico e dimensioni della sede di Maranello. Nel 1960 Ferrari diventa una Società per Azioni e solo 9 anni dopo viene stipulato un patto con Fiat, potenza automobilistica nella quale Enzo Ferrari aveva individuato un ottimo alleato, per la cessione del 50% dei titoli azionari dell’azienda di Maranello. Negli anni successivi fu completata la costruzione del circuito di Fiorano (1972) e, dopo la morte del Fondatore nel 1988, il pacchetto azionario divenne per il 90% del Gruppo Fiat, con il restante 10% che venne ereditato dal figlio Piero Ferrari.

Il successo dell’azienda è cresciuto continuamente fino ai giorni nostri, sia a livello di prestigio internazionale che per fatturato. Nel 2013 e nel 2014 il marchio è stato riconosciuto come il più influente al mondo dall’azienda di valutazione finanziaria e consulenza Brand – Finance, secondo la quale “il Cavallino rampante su sfondo giallo è immediatamente riconoscibile in tutto il mondo, anche dove non ci sono ancora le strade”.

1.2 Oggi

Al giorno d’oggi Ferrari vende le proprie automobili ad un ritmo mai immaginato prima. Nel 2015 le macchine consegnate alla rete di distribuzione sono state 7664 (+6% rispetto all’anno precedente), grazie all’esordio sul mercato della nuova 488 GTB. Nei primi giorni del 2016 la Società ha completato la separazione da FCA e

debuttato sul mercato azionario della Borsa di Milano, dopo che il 21 ottobre 2015 aveva esordito al New York Stock Exchange.

La sede di Maranello, ormai diventata una vera e propria cittadella, è in continuo sviluppo, sia per quanto riguarda l'espansione fisica degli spazi che per quanto concerne l'interazione tra l'azienda e i lavoratori in termini di benessere di questi ultimi. La progettazione dei luoghi di lavoro è stata affidata ad architetti di fama mondiale, tra i quali si può citare Renzo Piano, che si è occupato della costruzione della Galleria del Vento. Il Centro Sviluppo Prodotto è stato realizzato seguendo i principi innovativi dell'architettura bioclimatica, mentre altri ambienti, quali il padiglione Nuove Linee di Montaggio o il padiglione Lavorazioni Meccaniche Motori, sono stati arricchiti dalla presenza di aree verdi che migliorano l'aspetto estetico e regolano il microclima. Inoltre Ferrari può vantarsi di aver raggiunto l'indipendenza energetica, riducendo le emissioni di CO² di circa il 40%, grazie all'installazione di un impianto fotovoltaico e di un impianto di trigenerazione (produzione congiunta di energia elettrica, termica e frigorifera).

La nuova sede della Scuderia Ferrari, edificata sul lato opposto della strada rispetto all'ingresso storico della sede di Maranello, supera i già alti standard ai quali sono abituati i lavoratori del Cavallino. Il progetto del nuovo edificio ha infatti adottato le specifiche della filosofia nZEB (*net Zero Emission Building*) che per le normative europee saranno obbligatorie per i nuovi edifici privati solo dal 2021. Secondo questi principi un edificio deve presentare nell'arco di un anno solare una somma algebrica dei flussi energetici entranti e uscenti pari a zero. Per raggiungere questi obiettivi bisogna considerare due diversi aspetti. Per prima cosa bisogna ricorrere alla produzione energetica da fonti rinnovabili (solare termico e fotovoltaico) in modo da superare l'energia prodotta da fonti fossili; in secondo luogo si devono costruire gli edifici riducendo e ottimizzando i fabbisogni energetici sfruttando l'illuminazione naturale, migliorando l'isolamento termico e la climatizzazione e regolando accuratamente la ventilazione e la temperatura in ogni ambiente.

Per quanto riguarda i prodotti rappresentativi dell'azienda, cioè le automobili, la produzione può vantare veri e propri gioielli su quattro ruote. La gamma attuale dei veicoli prodotti da Ferrari è costituita da 9 modelli, divisi tra 8 e 12 cilindri. Le vetture che montano motore a 12 cilindri sono:

- **F12berlinetta:** è la capostipite della nuova generazione di berline Ferrari con motore 12 cilindri. Viene prodotta dal 2012, anno in cui è stata presentata e definita dalla stessa azienda “vettura stradale, prodotta in serie, più potente e prestazionale mai realizzata dalla Ferrari”. Il motore è aspirato, con cilindrata di 6262 cm³, ed eroga una potenza massima di 740 CV a 8250 giri/min e una coppia massima di 690 Nm a 6000 giri/min (l’80% di questa coppia è già disponibile a 2500 giri/min).



Figura 1.4 - F12 berlinetta

- **GTC4Lusso:** è una gran turismo a 4 posti e 4 ruote motrici e sterzanti (sistema 4RM-S brevettato Ferrari), dotata di motore a 12 cilindri da 6262 cm³ con potenza massima di 690 CV a 8000 giri/min e coppia massima pari a 697 Nm a 5750 giri/min. La velocità massima è di 335 km/h (come la F12 berlinetta) mentre l’accelerazione da 0 a 100 km/h avviene in appena 3,4 secondi.



Figura 1.5 - GTC4Lusso

- **812 Superfast:** è l’ultima arrivata in casa Ferrari ma si ispira alle origini della casa di Maranello, perché con il suo motore a 12 cilindri ricorda direttamente la prima vettura di serie prodotta esattamente 70 anni fa. Le prestazioni mettono in evidenza la cultura motoristica della Ferrari: con i suoi 6,5 litri può erogare una potenza di 800 CV a 8500 giri/min e una coppia di 718 Nm a 7000

giri/min (l'80% della coppia è già disponibile a 3500 giri/min). Inoltre è dotata di sistema di iniezione diretta a 350 bar e di condotti di aspirazione a geometria variabile.



Figura 1.6 – 812 Superfast

Tra gli 8 cilindri si possono ammirare:

- **California T**: è la prima Ferrari del nuovo millennio ad adottare un motore turbocompresso. Pur ispirandosi al modello California, da cui eredita l'intelaiatura interna e il *concept*, ne stravolge alcuni concetti, ad esempio il motore e l'estetica. Il propulsore, potendo contare su due turbo, è un V8 da 3.885 cm³ e raggiunge la potenza massima di 560 CV e una coppia di 755 Nm a 4750 giri. Rispetto al motore aspirato della California ha 70 CV in più e consuma il 16% in meno;



Figura 1.7 - California T

- **488 GTB**: questo modello prende il posto della 458, migliorandone alcuni aspetti grazie alle conoscenze maturate dalle competizioni di F1 e GT, dove la 458 è stata campione del mondo WEC e vincitrice di due edizioni della 24 Ore di Le Mans. Il motore turbo raggiunge una potenza di 670 CV a 8000 giri/min e una coppia di 760 Nm a 3000 giri/min. Il nome indica la cilindrata unitaria e la sigla Gran Turismo Berlinetta, denominazione tradizionale di Ferrari;



Figura 1.8 - 488 GTB

- **488 Spider:** con lo stesso motore della versione coupé, la vera novità è costituita dal tetto rigido ripiegabile RHT (*Retractable Hard Top*), attorno a cui si è sviluppato il progetto. Grazie all'introduzione di nuovi sistemi elettronici di controllo il tempo di risposta è del 9% in meno rispetto al modello Spider precedente;



Figura 1.9 - 488 Spider

- **GTC4Lusso T:** figlia diretta della GTC4Lusso, grazie all'introduzione del turbo il motore passa da 12 a 8 cilindri. La trazione è solo posteriore, garantendo un minor peso complessivo che, unitamente all'adozione delle 4 ruote sterzanti, danno alla vettura un carattere agile e reattivo. Il motore rappresenta l'ultima evoluzione dei turbo 8 cilindri a V vincitori del premio "International Engine of the Year 2016". La potenza massima è di 610 CV a 7500 giri/min mentre la coppia è pari a 760 Nm tra i 3000 e i 5250 giri/min.



Figura 1.10 - GTC4Lusso T

Una categoria a parte spetta alle serie speciali limitate:

- **F12tdf**: questa vettura, realizzata in soli 799 esemplari, è un omaggio al Tour De France, una leggendaria gara di durata francese in cui la Ferrari ha dominato negli anni '50 e '60. Il motore è quello della F12berlinetta, con l'incremento della potenza da 740 CV a 780 CV a 8500 giri/min; anche la coppia è maggiore, passando da 690 Nm a 705 Nm a 6750 giri/min. Questo garantisce un'accelerazione da 0 a 100 km/h in 2,9 secondi.



Figura 1.11 - F12tdf

- **LaFerrari**: con questo modello Ferrari è entrata nel mondo dei propulsori ibridi, sfruttando le conoscenze di F1 sul KERS per massimizzare la performance e ridurre i consumi. Il sistema HY-KERS permette di integrare perfettamente il motore termico V12 e il motore elettrico; l'elevata coppia fornita da quest'ultimo a bassi giri ha permesso l'ottimizzazione del motopropulsore tradizionale agli alti regimi. Il risultato è la possibilità di erogare una coppia di 900 Nm e una potenza combinata di 960 CV. LaFerrari è stata realizzata in 499 esemplari, venduti prima della sua presentazione ufficiale, con l'aggiunta di un cinquecentesimo esemplare la cui vendita è avvenuta all'asta e il cui ricavato è destinato alle popolazioni colpite dal terremoto del Centro Italia del 2016.



Figura 1.12 - LaFerrari

- **LaFerrari Aperta:** è la versione spider del modello LaFerrari, realizzata in 209 esemplari destinati ai clienti più appassionati, per celebrare i 70 anni della casa di Maranello. La vettura è del tutto simile alla versione coupé, con la differenza della presenza di un tetto rigido rimovibile in fibra di carbonio. L'altra differenza rilevante è il diverso angolo di apertura delle portiere a fine corsa.



Figura 1.13 - LaFerrari Aperta

1.3 Le competizioni

Il nome Ferrari è da sempre associato alle competizioni sportive. Alla fondazione dell'azienda nel 1929, l'obiettivo di Enzo Ferrari era quello di realizzare una scuderia che caricasse le spese della realizzazione e gestione delle automobili da gara direttamente sui piloti, *gentleman drivers* con la passione delle corse, o sugli organizzatori dei circuiti, che avevano interesse nell'ingaggiare piloti celebri per poter attirare sempre più pubblico alle gare.

Nel corso degli anni Ferrari ha dominato in diverse categorie, ma sicuramente i successi che l'hanno resa celebre in tutto il Mondo sono quelli ottenuti nel Campionato di Formula 1. In questa categoria Ferrari è l'unico costruttore che abbia preso parte a tutte le edizioni a partire dalla prima, che si è svolta nel 1950; fino ad oggi ha vinto 15 titoli Piloti e 16 Costruttori. Per lungo tempo inoltre è stato l'unico team a realizzare in modo completamente autonomo le sue monoposto in tutti i suoi principali componenti (telaio, motore, cambio, sospensioni).

L'idea iniziale di Enzo Ferrari di permettere ai propri clienti di poter gareggiare con le vetture di serie non è mai tramontata. Oggi infatti l'ente Attività Sportive GT si occupa dell'organizzazione di varie competizioni nelle quali possano correre anche i cosiddetti

gentleman drivers; a questo ente rispondono i progetti di Corse Clienti e Competizioni GT.

Corse Clienti è il reparto che gestisce i campionati monomarca della casa di Maranello. Il più importante tra questi campionati è il Ferrari Challenge, che si distingue ulteriormente secondo 3 categorie geografiche: Europa, Nord America e Asia-Pacifico. La serie, nata nel 1993, è omologata secondo le norme FIA (*Federation Internationale de l'Automobile*) per garantire i migliori standard a livello di organizzazione e di sicurezza. La partecipazione a queste gare è permessa solo a concessionarie e officine autorizzate; per questo le vetture sono particolarmente simili tra loro a livello di prestazioni e il pilota può mettere in luce le proprie capacità. Tra le categorie presenti in ogni gara si possono trovare anche particolari eventi riservati agli over 55 (Coppa *Gentlemen*) e alle donne pilota (*Ladies Cup*). La vettura attualmente utilizzata in queste competizioni è la Ferrari 458 EVO, potenziata grazie ad un kit aerodinamico che ha massimizzato le prestazioni in termini di effetto suolo e velocità in curva. Per le prossime stagioni la macchina che scenderà in pista sarà la Ferrari 488 Challenge, la prima equipaggiata con motore turbo e la più potente fino ad ora (670 CV).

Un altro programma gestito da Corse Clienti è XX Programmes. Per citare il sito ufficiale Ferrari [4], “se possedere una Ferrari è un privilegio, avere una XX è una sorta di apoteosi”. Le vetture di questa categoria sono, a partire dalla prima ad essere stata prodotta, la FXX, la 599XX e la FXX-K. Avere una di queste macchine, che possono arrivare ad avere fino a 1050 cavalli come nel caso della FXX-K, significa “essere coinvolti nello sviluppo delle Ferrari del futuro” attraverso la partecipazione a sessioni di test tecnici monitorati da personale specializzato. Permettendo ai clienti di scambiare informazioni con gli ingegneri e i collaudatori professionisti di Maranello, le vetture possono essere spinte al limite della perfezione tecnologica.

Infine il programma F1 Clienti, nato nel 2003, si occupa di accompagnare un ristretto gruppo di persone verso l’acquisto di una monoposto della massima categoria e di seguire questi appassionati nell’utilizzo della vettura su pista. Le auto che possono essere acquistate sono moltissime: dalle ultime monoposto scese in pista guidate da Sebastian Vettel o Kimi Raikkonen alle legendarie monoposto di Michael Schumacher, fino ad arrivare all’ultima 12 cilindri scesa in pista, la 412 T2 del 1995.

Il reparto Competizioni GT si occupa invece delle gare di Gran Turismo. All'interno di questa categoria rientrano numerosi campionati, ma il più famoso è sicuramente il *World Endurance Championship* (WEC), organizzato dalla FIA e dall'ACO (*Automobile Club de l'Ouest*). A queste gare possono partecipare vetture omologate secondo particolari regole che vincolano tutti gli elementi della macchina e che portano alla definizione di una classe di veicoli conosciuta come *Le Mans Prototype* (LMP). Il calendario di questo campionato comprende alcune tra le gare storiche di durata, come la 24 Ore di Le Mans, la 6 Ore del Nürburgring e la 6 Ore di Silverstone. Ferrari partecipa a queste gare nella categoria LMGTE Pro (professionisti) e LMGTE Am (amatori) affidando le proprie auto (in particolare 488GTE, 488 GT3, 458 ITALIA GTE e 458 ITALIA GT3) a scuderie satellite come AF Corse e Risi Competizione. Anche in questi campionati la Rossa vanta innumerevoli successi, l'ultimo dei quali arrivato nella passata stagione con la vittoria del titolo Costruttori GT nel WEC.

Capitolo 2. Il motopropulsore



Figura 2.1 - Motore Ferrari 8 cilindri

Il motore 8 cilindri Ferrari da competizione ha una cilindrata totale di 3996 cm^3 e riesce ad erogare una potenza di più di 500 CV e una coppia di oltre 600 Nm.

2.1 Erogazione della coppia

Come già anticipato, lo scopo di un motore a combustione interna è quello di sviluppare una certa potenza, determinata dalla coppia disponibile alla frizione e dalla velocità di rotazione. La coppia alla frizione è quella sviluppata dal motore durante la fase di combustione a meno delle perdite dovute agli attriti interni, delle perdite dovute al pompaggio e della coppia necessaria per muovere gli ausiliari (es. pompa aria condizionata, alternatore). L'accelerazione del veicolo è invece determinata dalla coppia disponibile alle ruote, che non è altro che la coppia alla frizione moltiplicata per il rapporto di trasmissione. Confrontando la coppia alle ruote con le resistenze a cui è sottoposto il veicolo è possibile intuire se ci sarà un'accelerazione, una decelerazione o un moto a velocità costante.

Nel caso di motore ad accensione comandata la coppia erogata viene influenzata principalmente da tre fattori: la quantità d'aria aspirata dal motore, la quantità di combustibile iniettato e l'istante a cui viene fatta partire la combustione (angolo di

accensione). La loro gestione avviene tramite attuatori diversi e causa effetti diversi sull'efficienza di combustione.

La massa di aria che partecipa alla combustione, fissata la pressione di sovralimentazione, dipende dalla pressione del collettore e quindi dall'apertura della valvola di aspirazione. Questa regolazione è la leva "lenta" della coppia, in quanto le dinamiche di riempimento e svuotamento del collettore di aspirazione non sono istantanee. Le modalità di regolazione della farfalla sono cambiate nel corso degli anni; inizialmente essa era comandata semplicemente da un cavo metallico che la collegava direttamente al pedale dell'acceleratore. Con l'esigenza di controllare in modo sempre più preciso il funzionamento del motore, specialmente dopo l'introduzione delle normative contro l'inquinamento, risultò indispensabile introdurre la valvola a farfalla a controllo elettronico (sistema DBW, *drive-by-wire*). In questo modo è stato possibile separare la richiesta del guidatore dall'attuazione stessa per poter introdurre alcune funzionalità volte a ridurre l'emissione degli inquinanti ma anche la sicurezza e il comfort alla guida.

Una regolazione pressoché istantanea della coppia (leva "veloce") è rappresentata dalla possibilità di variazione dell'anticipo di accensione. Questo parametro può cambiare da una combustione all'altra e influisce pesantemente sulla coppia prodotta, perché per garantire lo sfruttamento maggiore dell'energia chimica del combustibile, la combustione deve essere sincronizzata con il movimento del pistone. In centralina è presente una calibrazione, detta "curva a ombrello", che permette al controllo di stabilire l'angolo di accensione necessario per garantire una certa efficienza. Con questo termine si intende il rapporto tra la massima coppia erogabile, ottenuta applicando l'angolo di anticipo ottimo, e la coppia erogata attuando un anticipo di accensione diverso da quello ottimale, con entrambe le coppie riferite allo stesso punto motore (cioè a parità di massa d'aria aspirata e combustibile iniettato).

La quantità di combustibile iniettato viene determinata in base al rapporto aria/combustibile desiderato ed è controllata dal sistema di iniezione. Attualmente molti motori ad accensione comandata adottano l'installazione dell'iniettore in camera di combustione (GDI, *Gasoline Direct Injection*) con il quale si evita l'accumulo di combustibile liquido nel condotto di aspirazione, vengono garantite evaporazioni più efficaci ed è possibile realizzare particolari condizioni della miscela; il tutto a discapito

dei costi dei componenti, che aumentano perché vengono richieste pressioni di iniezione più alte e perché gli iniettori devono sottostare a stress termici e meccanici molto elevati. Bisogna sottolineare però che la regolazione del lambda (cioè il titolo della miscela) non è una vera e propria leva di controllo della coppia. In generale questa variabile è limitata a causa dei limiti di infiammabilità della miscela e dei limiti di temperatura. Nella maggior parte dei motori benzina che circolano su strada l'obiettivo lambda è fissato a 1 per legge, ed è concesso variarlo solo per migliorare l'efficienza del catalizzatore in determinati momenti (ad esempio per liberarlo dall'ossigeno accumulato durante la fase di *cut-off*) o per protezione dei componenti (quando le temperature diventano eccessivamente alte). In un motore da competizione invece il controllo del lambda assume significati diversi: non essendoci vincoli legati ai dispositivi di trattamento dei gas di scarico, il rapporto aria/combustibile può essere modificato in determinate situazioni per gestire l'erogazione della coppia. Questo deve essere fatto entro certi limiti che dipendono dalle temperature dei gas di scarico, dall'esigenza di risparmiare carburante e dal regolamento imposto dalla Federazione che organizza la competizione.

Per quanto riguarda la Ferrari trattata in questo progetto, i valori di attuazione di queste tre leve vengono stabilite dalla centralina in un modo molto semplice: la farfalla dipende direttamente dal segnale proveniente dal pedale dell'acceleratore, l'angolo di accensione viene scelto per garantire le massime efficienze di combustione mentre il valore di lambda è mantenuto pressoché costante, anche se è possibile variarne l'obiettivo per diversi scopi. La struttura di coppia è ciò che deve essere implementato nel sistema di controllo del motore da competizione per garantire stabilità alla guida, aumentare le prestazioni su pista e permettere a piloti meno esperti di correre in sicurezza. Con l'introduzione del sistema di controllo in coppia la richiesta del pilota, pur rimanendo il target principale del sistema di controllo, non è che una delle numerose domande di coppia che giungono al motore ad ogni ciclo di calcolo; altre funzioni, come quella di controllo della trazione, contribuiscono alla scelta delle attuazioni migliori istante per istante. Con il nuovo sistema è possibile controllare l'erogazione della coppia in modo molto più rapido grazie alla regolazione dell'anticipo di accensione, anche se questo causa maggiori consumi nelle fasi di parzializzato. Dato che in un giro di pista il tempo trascorso a pedale non premuto

completamente è decisamente inferiore rispetto alle fasi a farfalla spalancata (durante le quali l'anticipo attuato sarà quello che garantisce le massime efficienze), il peggioramento in termini di consumi non dovrebbe rappresentare un ostacolo verso l'adozione del controllo in coppia.

2.2 La sovralimentazione

Ad eccezione della Formula 1, il cui regolamento ha vietato l'utilizzo dei motori turbocompressi dal 1988 al 2014, le tecnologie di sovralimentazione sono sempre state presenti nei campionati automobilistici più famosi (WEC, IMSA, WRC, IndyCar). Lo sviluppo di questi motori, che è stato in parte trasferito anche sulle vetture stradali, non si è mai arrestato e sta vivendo ora una nuova fase di avanzamento.

Il concetto che sta alla base dei motori sovralimentati è la necessità di accrescere la quantità d'aria aspirata dal propulsore; questo permette infatti l'incremento del combustibile che può essere iniettato (a pari rapporto aria/combustibile) e, di conseguenza, l'aumento della potenza sviluppabile dal motore. Avere più aria fresca all'interno dei cilindri è possibile tramite diverse strade: aumentando la cilindrata, aumentando la velocità di rotazione, aumentando la densità dell'aria. Concentrandosi sull'ultimo elemento, incrementare la massa d'aria a parità di volume è possibile attraverso l'aumento della pressione e/o il calo della temperatura.

Le modalità con cui garantire la sovralimentazione sono molteplici: allo stato attuale il sistema più diffuso è quello costituito da un turbocompressore, che sfrutta l'entalpia dei gas di scarico (che andrebbe altrimenti sprecata, almeno in parte) per mettere in moto un compressore, posizionato prima della valvola a farfalla. Altri sistemi che vengono utilizzati in particolari applicazioni sono i compressori volumetrici, accoppiati all'albero motore tramite cinghia, e i compressori centrifughi, che sfruttano lo stesso principio di compressione dei turbocompressori ma sono messi in moto da una puleggia che ruota insieme al motore o da un motore elettrico.

Nei motori turbo, turbina e compressore sono collegati tra loro tramite un albero di trasmissione coassiale. Il compressore viene azionato dalla turbina, che viene eccitata dall'energia cinetica e termica dei gas combusti. La compressione dell'aria fresca ne causa un aumento della temperatura, che a sua volta comporterebbe un calo di densità e il parziale annullamento degli effetti desiderati. Per questo un altro componente

fondamentale nell'economia della turbocompressione è l'intercooler, scambiatore di calore che ha il compito di raffreddare l'aria prima del riempimento del collettore di aspirazione.

Una delle peculiarità dei sistemi turbocompressi è la loro tendenza all'autoesaltazione. All'aumentare dell'aria immessa nei cilindri e quindi dell'energia posseduta dai gas di scarico (che diventano di più, più caldi e più veloci), le giranti della turbina e del compressore iniziano a ruotare sempre più rapidamente. Risulta quindi fondamentale inserire un dispositivo che possa interrompere questo effetto per proteggere il motore da eventuale danneggiamenti: con la valvola *waste-gate* è possibile deviare parte dei gas di scarico (o anche tutti) in modo da evitare il loro passaggio attraverso la turbina e quindi fermare l'accelerazione del compressore.

Il turbocompressore presenta tuttavia numerose complicazioni. Dal punto di vista strutturale i problemi maggiori sono dovuti alle maggiori temperature dei gas di scarico, alle pressioni che possono anche raddoppiare rispetto a un motore aspirato e alle elevatissime velocità di rotazione della turbina e del compressore. Inoltre esiste un limite noto fin dall'introduzione dei sistemi di sovralimentazione con turbocompressore: il *turbo-lag*. Questo problema è dovuto al fatto che dal momento della pressione del pedale fino alla realizzazione di una pressione di aspirazione tale da garantire l'erogazione della coppia richiesta passano alcuni istanti, dovuti alla lentezza della dinamica del sistema. Dopo l'apertura della farfalla, il polmone impiega qualche istante per riempirsi, i gas di scarico devono aumentare la propria energia e l'inerzia del turbocompressore deve essere vinta.

La riduzione o addirittura l'eliminazione di questo fastidioso effetto è però possibile con alcuni accorgimenti. Una possibilità è l'adozione di turbine a geometria variabile, che permettono l'eccitamento della girante anche quando l'entalpia dei gas di scarico è ancora piuttosto bassa. Altre soluzioni possono essere quella di adottare un sistema misto, nel quale affiancare al turbocompressore un compressore volumetrico, mentre nei motori ibridi è possibile accelerare il compressore tramite particolari unità elettriche.

Uno degli obiettivi dell'introduzione del sistema di controllo in coppia è proprio quello di limitare fortemente la sensibilità al *turbo-lag*. Questo è possibile grazie al principio di riserva di coppia, che riduce i tempi di risposta del motore grazie a due contributi:

- al momento della richiesta di accelerazione da parte del pilota, il motore sta già aspirando l'aria sufficiente a soddisfare la nuova coppia da erogare ma sta producendo una coppia inferiore (per non superare la richiesta precedente) perché sta attuando un anticipo di accensione minore. Grazie al fatto che l'angolo di anticipo può essere modificato da un ciclo di combustione a quello successivo (leva "veloce" della coppia), la richiesta del guidatore può essere soddisfatta immediatamente, mentre se si cercasse di aumentare la coppia erogata solo aumentando l'aria aspirata, si subirebbero le dinamiche lente di riempimento del collettore e di attivazione della turbina;
- dato che l'angolo di accensione viene ritardato per ridurre l'efficienza di combustione e quindi la coppia erogata, i gas di scarico si trovano a una temperatura più alta. Questo fattore, sommato alla maggiore quantità di aria aspirata e quindi di fumi di combustione, garantisce un maggiore trasferimento di energia alla turbina. Una volta esaurita la riserva di coppia, l'ulteriore richiesta del pilota potrà essere soddisfatta altrettanto rapidamente con l'aumento dell'aria aspirata perché il compressore si trova già ad alte velocità di rotazione.

Naturalmente questi discorsi valgono per un angolo di pedale diverso dal 100% (cioè non completamente premuto). Nel caso di massima pressione sull'acceleratore la coppia richiesta viene limitata dalla coppia base (che coincide con la curva di coppia massima del motore, stabilita dal regolamento); l'aria aspirata è la massima possibile compatibilmente con il sistema di sovralimentazione e l'anticipo attuato è quello che garantisce le massime efficienze.

2.3 Sistema di controllo

Nel 2009 L. Guzzella e C.H. Onder prevedevano che "un terzo del valore delle macchine del futuro consisterà in componenti elettrici ed elettronici" e che "questi componenti aiuteranno a ridurre il consumo di combustibile e l'emissione di agenti inquinanti, ad aumentare la sicurezza, e a migliorare la guidabilità e il comfort delle

automobili”¹. Questa profezia si è già in parte avverata, e il motore inteso come propulsore endotermico non è che una piccola parte del sistema addetto al moto del veicolo. Si può quindi introdurre il concetto di “attuatore policilindrico a controllo elettronico” per intendere non solo una macchina a fluido che trasformi energia chimica in energia meccanica, ma anche tutto l’insieme di sottosistemi e funzioni adibite al suo controllo software.

La gestione delle operazioni necessarie per il corretto funzionamento del motore è assegnata a quella che viene chiamata centralina di controllo, o ECU (*Engine Control Unit*). Gli obiettivi della centralina, o meglio del sistema di controllo, sono quelli di assicurare che la richiesta del pilota sia trasformata in modo opportuno in comandi agli attuatori del motore, di monitorare il funzionamento dei vari sensori e attuatori e di intervenire nel caso venga messa in pericolo la sicurezza del guidatore o l’integrità del motore. Essa regola tutte le funzioni del motore in modo tale che venga erogata la giusta quantità di coppia e che contemporaneamente le emissioni e i consumi siano i più bassi possibili. Alla base del funzionamento della centralina ci sono i principi dell’automazione, dei controlli automatici e della programmazione informatica: l’obiettivo del controllo è quello di ricevere informazioni da parte di sensori (ad esempio potenziometro sul pedale, sonda lambda, sensori di pressione, etc.) e trasformare questi segnali in comandi da inviare agli attuatori (farfalla, bobina, iniettori, *waste-gate*, etc.).

Le funzioni che compongono il sistema di controllo del motore sono tantissime: il manuale che le descrive tutte può avere anche più di 10000 pagine, prendendo come esempio quello di un motore di serie Ferrari. Il *function sheet* di un motore da corsa è decisamente più breve, dato che gli attuatori da comandare e le funzionalità da gestire sono molte di meno.

¹ L. Guzzella, C. H. Onder, “Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems”, Springer, 2009, pag 4

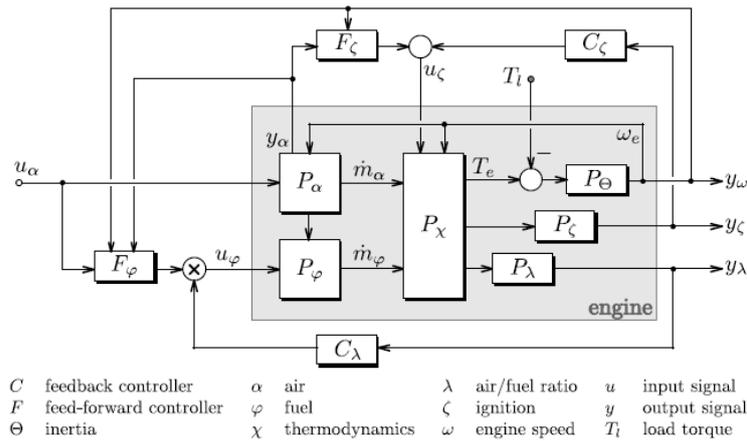


Figura 2.2 - Sistemi di controllo principali di un motore ad accensione comandata

L'applicazione della teoria dei sistemi di controllo ai motori a combustione interna è quindi uno sviluppo relativamente recente. Prima degli sviluppi dell'elettrica e dell'elettronica infatti non era certo possibile dotare il propulsore di sensori e attuatori che gestissero automaticamente il suo funzionamento in modo ottimale. I sistemi erano collegati tra loro in modo meccanico e le "calibrazioni" non potevano essere modificate dopo l'avviamento. Il controllo elettronico dei motori venne introdotto su larga scala con l'avvento del convertitore catalitico trivalente, necessario per la riduzione degli inquinanti presenti nei gas di scarico dei motori a benzina. Questo dispositivo richiede infatti un controllo preciso del rapporto aria/combustibile (controllo lambda) in camera di combustione per poter garantire l'efficacia del processo di cattura e trasformazione di ossidi di azoto, monossido di carbonio e idrocarburi incombusti.

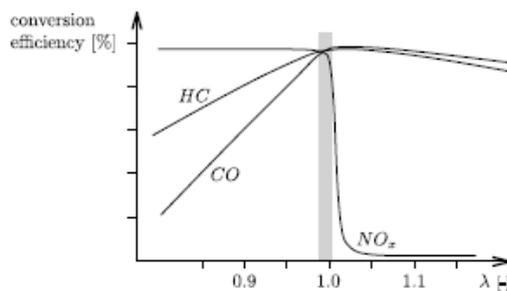


Figura 2.3 - Efficienza di conversione di un catalizzatore trivalente

Per poter gestire la quantità di benzina da iniettare in funzione dell'aria aspirata, e mantenere quindi λ nell'intorno di 1, il sistema di controllo tiene conto di vari aspetti:

- l'iniezione precisa deve avvenire in base all'esatta massa d'aria aspirata. Questa quantità può essere calcolata in modi diversi: attraverso il sistema α -n, attraverso l'utilizzo di un debimetro o attraverso un modello *speed-density*;
- la quantità di combustibile da iniettare può essere molto piccola (ad esempio ai bassi carichi) e quindi il circuito di iniezione (pompe, condotti, iniettori) deve essere preciso e ben calibrato;
- per chiudere il *loop* di controllo è essenziale ricorrere a dei sensori, detti sonde lambda, che misurino il rapporto aria/combustibile nel condotto di scarico. Questo permette di verificare l'efficacia delle attuazioni e correggere il valore di combustibile iniettato nel caso lambda misurato non sia uguale al target.

Tra gli altri sistemi di controllo presenti sulla centralina di una vettura con motore ad accensione comandata ci sono:

- controllo in catena aperta dell'iniezione;
- controllo in catena aperta dell'angolo di accensione;
- controllo in catena chiusa della detonazione;
- controllo del minimo;
- gestione del lavaggio del canister.

2.4 Motronic

Il fornitore di centraline e software di controllo per i motori Ferrari è Bosch, azienda leader del settore elettronico che si occupa, nel mondo dell'informatica e dell'automazione, di *smart technologies* (*smart homes, smart cities, connected mobility e connected industry*). Il nome dato da Bosch ai propri sistemi per il controllo in catena aperta e chiusa dei motori ad accensione comandata è Motronic. Essi comprendono tutti i sensori per individuare lo stato attuale del motore e del veicolo e gli attuatori che mettono in atto i necessari comandi. L'unità di controllo sfrutta i dati provenienti dai sensori per monitorare lo stato della macchina in tutte le sue parti con intervalli di tempo molto brevi (nell'ordine del millisecondo) per permettere il funzionamento in *real-time* del controllo.

Il nucleo della ECU è un microcontrollore dotato di memoria flash programmabile che immagazzina tutti gli algoritmi di controllo e i dati (calibrazioni, parametri, etc.). Le

variabili di input provenienti dai sensori influenzano i calcoli nella memoria flash; da questi segnali il microcontrollore individua quale comportamento il veicolo deve avere per soddisfare le richieste del guidatore e muove gli attuatori di conseguenza.

Una importante funzione di Motronic è il *monitoring*, cioè il controllo in tempo reale del corretto funzionamento dell'intero sistema di controllo, attraverso il sistema OBD (*On-Board Diagnosis*). L'irrigidimento delle normative ha richiesto sempre maggiore attenzione sul controllo degli errori e delle *failures* dei sistemi elettronici a bordo, al punto che metà della capacità di Motronic, in termini di potenza di calcolo e memoria, è dedicata alla diagnosi.

L'obiettivo delle centraline montate sulle vetture stradali è quello di soddisfare determinati compiti primari (controllo della carica, iniezione, accensione) nel rispetto di quello che viene chiamato controllo in coppia. L'intero sistema di controllo è caratterizzato anche da numerose funzioni secondarie che accompagnano gli obiettivi primari della centralina. Lo scopo di questo progetto di tesi è importare la struttura di coppia di Motronic nel software di controllo del motore Ferrari da competizione.

Per comprendere meglio tutte le potenzialità di Motronic, il sistema è stato suddiviso in sottosistemi, la descrizione dei quali viene tradotta e rielaborata rispetto al manuale Bosch [1]:

- richiesta di coppia (TD, *Torque Demand*): la posizione del pedale dell'acceleratore è convertita in un valore di coppia richiesta. Oltre al segnale diretto inviato attraverso l'acceleratore, il guidatore può richiedere coppia attraverso altri sistemi, ad esempio il *cruise-control*: in questo caso la coppia richiesta al motore dipende dalle condizioni di guida attuale. Quando il pedale non viene premuto e nessuna richiesta giunge al motore, la coppia richiesta corrisponde al valore necessario per mantenere il motore in rotazione alla velocità di minimo (*idle speed*). Altre richieste di coppia possono provenire dai filtri di guidabilità, dai sistemi elettrici (batteria, alternatore) e altri organi ausiliari come il sistema dell'aria condizionata;
- struttura di coppia (TS, *Torque Structure*): questo sottosistema ha il compito di coordinare le varie richieste di coppia che giungono al motore (richiesta del pilota, della trasmissione, del catalizzatore, etc.). Dall'elaborazione di questi segnali il sistema genera una richiesta di coppia definitiva, che viene

trasformata in attuazioni dai sistemi riguardanti l'aspirazione, l'iniezione e l'accensione. L'input della prima funzione è la massa d'aria relativa, o carico; è definito come il rapporto tra la massa d'aria reale nel cilindro e la massima massa d'aria che potrebbe essere dentro al cilindro a condizioni standard. A seconda del carico richiesto una certa apertura di farfalla verrà imposta. L'effetto dell'accensione viene invece espresso tramite l'angolo a cui viene fatta scoccare la scintilla. Infine l'iniezione gestisce la quantità di benzina che entra in camera ed è gestita dal tempo di apertura dell'iniettore e dalla pressione del *rail*. L'iniezione è uno strumento molto potente nella struttura di coppia, in quanto può intervenire in quei casi sia necessario un taglio improvviso della coppia erogata (ad esempio *traction control*) interrompendo l'apporto di carburante al cilindro. Inoltre, nei sistemi ad iniezione diretta, è possibile alternare combustioni classiche di tipo omogeneo, con lambda unitario, e combustioni magre a carica stratificata. In questo caso la coppia può essere regolata a seconda del titolo della miscela generata. La coppia effettivamente presente alla frizione viene calcolata attraverso dei modelli fisici che sfruttano le informazioni provenienti da vari segnali, ed è utilizzata come diagnosi del funzionamento del sistema Motronic;

- sistema di aspirazione (AS, *Air System*): il valore di carico obiettivo calcolato dopo la struttura di coppia viene convertito in segnali da inviare agli attuatori adibiti al controllo del riempimento del cilindro. La farfalla è il principale regolatore della massa d'aria aspirata dal motore; il valore di angolo di apertura è determinato grazie a modelli fisici e calibrazioni. Nei motori turbocompressi esistono altri attuatori da tenere in considerazione: la *waste-gate* per l'attivazione della turbina e l'intervento del compressore volumetrico. Questo sottosistema ha l'ulteriore compito di calcolare l'effettiva quantità di aria aspirata, e per farlo può sfruttare la presenza di segnali di pressione e temperatura nel collettore di aspirazione (modello di *speed density*), di un sensore di portata d'aria (sistema con debimetro) o semplicemente di un sensore di pressione nel polmone (sistema α -n);
- sistema di iniezione (FS, *Fuel System*): la funzione di questo sistema è quella di fornire al rail una certa quantità di benzina, ad una certa pressione, presa dal

serbatoio. A partire dal valore di aria effettivamente aspirata, della pressione nel rail e della pressione nel collettore di aspirazione, viene calcolato il tempo di apertura dell'iniettore per soddisfare il rapporto aria/combustibile richiesto. La fasatura dell'iniezione è un altro importante parametro e viene controllata in modo preciso grazie al segnale di posizione angolare del cilindro;

- sistema di accensione (IS, *Ignition System*): l'angolo di anticipo di accensione viene calcolato a partire dalla coppia richiesta, dalle condizioni operative del motore e sulla base di eventuali interventi di protezione componenti (ad esempio il controllo della detonazione). Il risultato di questo calcolo viene trasmesso al sistema elettrico che fa in modo che la candela faccia scoccare la scintilla al momento desiderato. L'angolo di accensione è generalmente stabilito in modo da ottimizzare i consumi e quindi massimizzare l'efficienza. Non sempre però è possibile attuare l'angolo ottimale: la fase di *catalyst heating* richiede ad esempio anticipi ritardati per generare fumi di scarico ad alte temperature. Il controllo della detonazione controlla perennemente la combustione in tutti i cilindri: permette al motore di avere alte efficienze al limite di detonazione, evitando i danni che questo fenomeno può avere in camera di combustione;
- sistema di scarico (ES, *Exhaust System*): l'obiettivo principale di questo sottosistema è quello di regolare il controllo in catena aperta e chiusa dei sistemi di trattamento dei gas di scarico (catalizzatore trivalente e, nel caso dei motori GDI, sistemi di trattamento degli ossidi di azoto). Nel caso dei motori da competizione il problema dei dispositivi allo scarico non si pone, in quanto non si è sottoposti agli stessi vincoli dei propulsori da strada. Risulta comunque importante il controllo del rapporto aria/combustibile effettivo, effettuato grazie a dei speciali sensori, le sonde lambda, e il monitoraggio delle temperature, che devono essere limitate per la protezione dei componenti;
- sistema dei dati operativi (OD, *Operating Data*): la funzione di questo sistema è quella di valutare i dati sulle condizioni di funzionamento del motore (temperatura, pressione, velocità di rotazione, etc.) e rendere disponibili i segnali agli altri sottosistemi. Viene utilizzato anche per la diagnosi e l'auto adattamento dei sensori e per l'identificazione dei *misfire*;

- altri sottosistemi sono il sistema di controllo degli ausiliari (AC, *Accessory Control*), il sistema di comunicazione (CO, *Communication*), il sistema di diagnosi (DS, *Diagnostic System*), sistema di *monitoring* (MO, *Monitoring*).

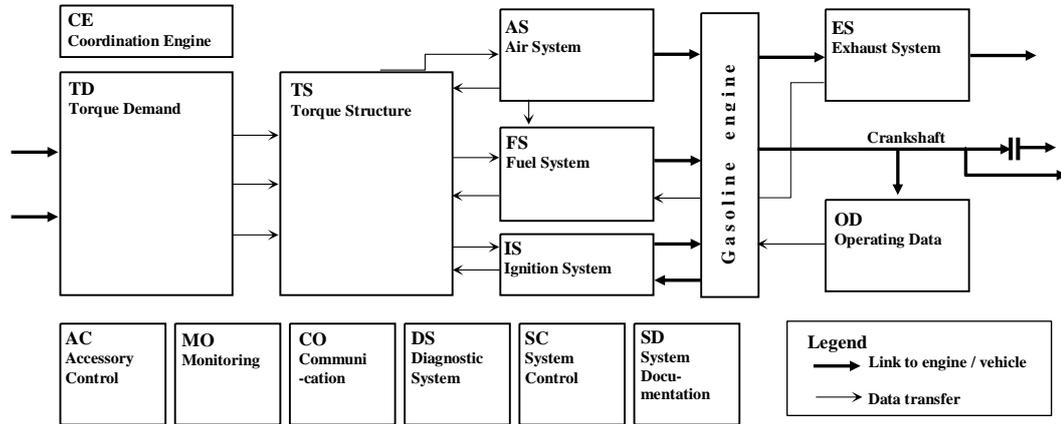


Figura 2.4 - Struttura del sistema Motronic

Il sistema Motronic è cambiato radicalmente dalla sua introduzione, avvenuta nel 1979. La sua funzione originaria era quella di riunire in una singola centralina di controllo l'iniezione elettronica del carburante e l'accensione. Col tempo, sempre più funzionalità sono state aggiunte per soddisfare i vincoli imposti dalle normative ma anche per andare incontro alle richieste sempre più esigenti dei consumatori in termini di prestazioni, sicurezza e comfort. Alcune di queste nuove funzioni sono ad esempio il controllo del minimo, il controllo delle emissioni dovute all'evaporazione della benzina, il ricircolo dei gas di scarico per la riduzione dei consumi e degli inquinanti.

Capitolo 3. Il modello

Il nuovo sistema di controllo è stato sviluppato in linguaggio Simulink. Con questo programma e uno strumento informatico realizzato da Bosch è possibile inserire alcune funzioni di controllo direttamente nel software originale, in un'area del codice dedicata alle esigenze dei clienti di Bosch Motorsport. Inoltre Simulink permette di testare il funzionamento del modello prima del caricamento in centralina grazie alla simulazione, cioè alla riproduzione della lettura, del calcolo e della scrittura dei segnali in modo virtuale.

3.1 Architettura del sistema

3.1.1 Input del sistema

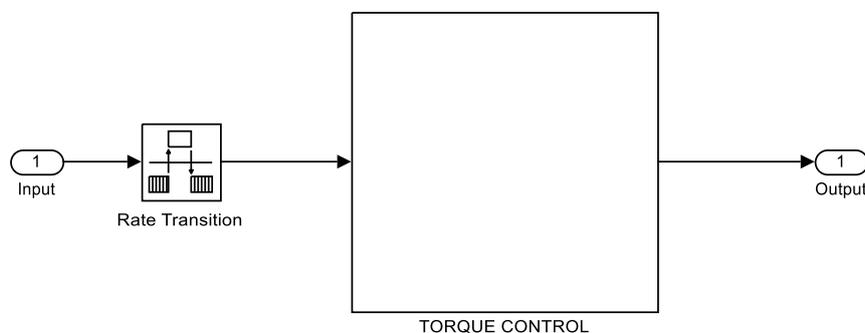


Figura 3.1 – Lettura degli input e scrittura degli output del sistema di controllo in coppia

Come prima cosa è necessario individuare i segnali che sono già a disposizione della centralina (o perché provenienti da sensori o perché calcolati da funzioni già esistenti) e che verranno utilizzati nel nuovo sistema di controllo. Tra queste variabili ci sono: grandezze misurate da sensori o calcolate dal sistema Bosch (angolo pedale, giri motore, marcia inserita, massa d'aria in ingresso, temperatura dell'acqua, temperature e pressioni del collettore di aspirazione); condizioni di attivazione o disattivazione di determinate funzioni (controllo minimo, sistema *anti-lag*, *cut-off*); richieste di coppia provenienti da altri sistemi o calibrazioni (anticipo massimo, limitatore per giri massimi, *traction control*, sistema di controllo olio, assistenza alla partenza e limitatore in *pit lane*).

Bisogna tenere conto di un aspetto importante che riguarda i tempi di calcolo della centralina. Ogni segnale misurato o calcolato infatti viene acquisito a intervalli regolari e la frequenza di aggiornamento di un determinato segnale dipende solitamente dalla variabilità della grandezza in questione, dall'importanza di registrare ogni sua oscillazione e dallo spazio di memoria a disposizione per il calcolo. I tempi tra un calcolo e l'altro sono standardizzati e i valori tipici sono 1 ms, 2 ms, 10 ms, 100 ms e synchro (in questo caso il task di calcolo è sincronizzato con i giri motore e viene chiamato ogni volta che uno dei cilindri passa per un certo angolo, che nel caso di Motronic cade poco prima del punto morto superiore di fine scarico). Affinché il nuovo sistema di controllo possa interfacciarsi correttamente con le funzioni già presenti ed eseguire i calcoli in modo accurato, viene inserito un blocco, chiamato *Rate Transition*, che ha il compito di leggere tutti gli input ogni 2 ms per sincronizzarsi con il software Bosch.

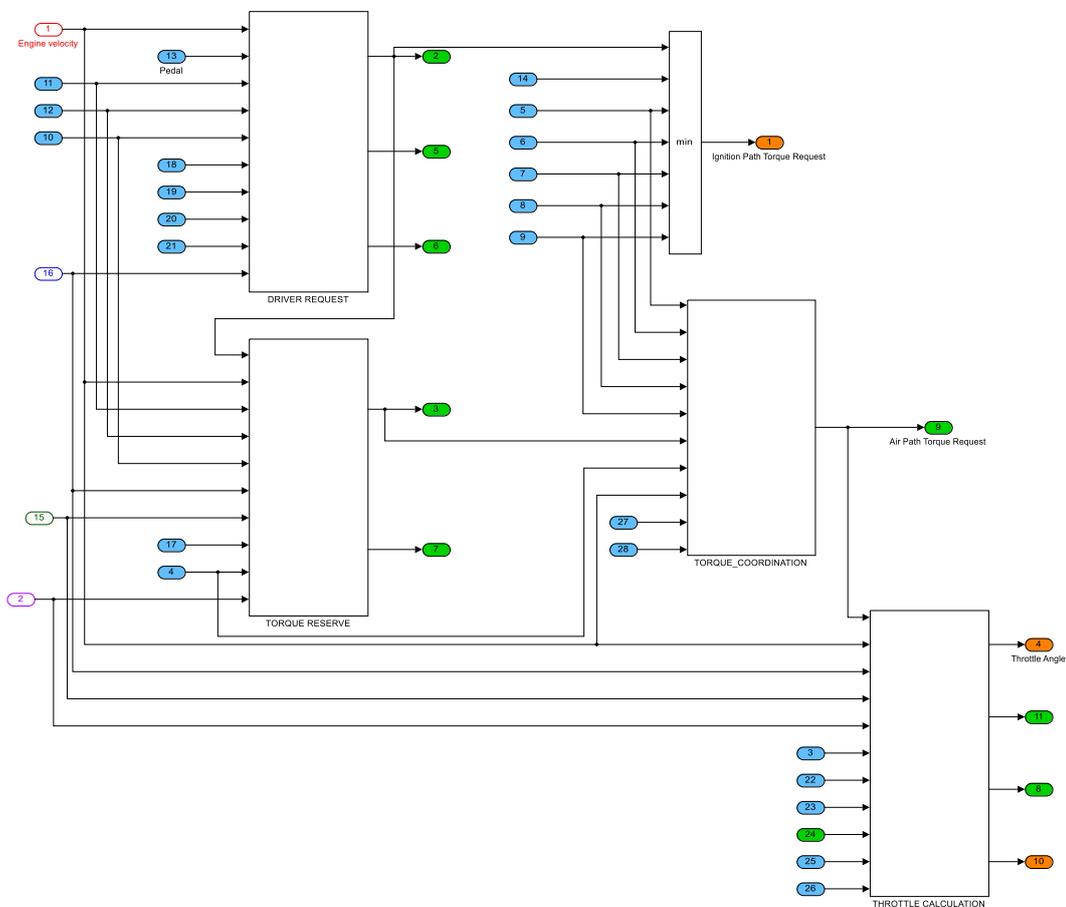


Figura 3.2 – Blocchi principali per la realizzazione del controllo in coppia

3.1.2 Elaborazione della richiesta del pilota

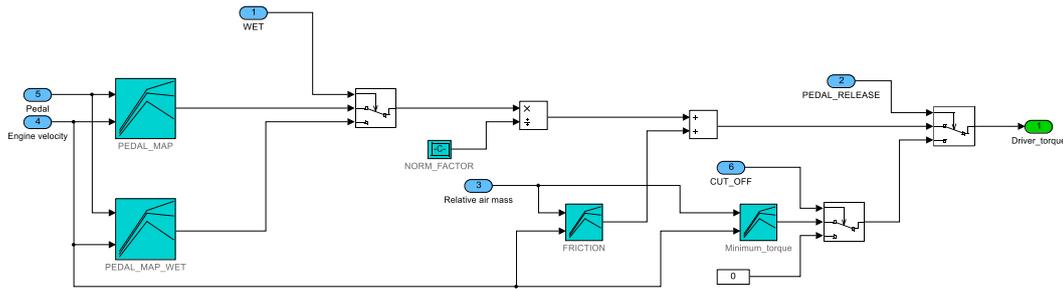


Figura 3.3 – Trasformazione del segnale sul pedale in richiesta di coppia

Il primo passo verso la definizione delle richieste che la centralina deve rivolgere al motore consiste nello stabilire cosa stia chiedendo il pilota alla guida. Il segnale calcolato a partire dall'input del guidatore è l'obiettivo principale del motore, il quale sarà autorizzato a non soddisfare tale domanda solo nel caso di interventi di coppia esterni, volti a garantire la sicurezza e la salvaguardia del propulsore.

Il software riceve l'informazione dai potenziometri posti sul pedale dall'acceleratore e la converte in una richiesta di coppia netta attraverso una calibrazione che dipende anche dai giri motore, la cosiddetta mappa pedale. Questa mappa in realtà è presente in più di una variante in centralina: ce ne sono 8, di cui 4 per la situazione di pista bagnata, ognuna calibrata in modo tale che la risposta della macchina in seguito alla pressione sull'acceleratore sia differente. Durante una gara, il pilota può scegliere quale configurazione utilizzare attraverso la regolazione di uno dei manettoni a disposizione.

La coppia netta richiesta dal pilota viene quindi normalizzata rispetto a un valore di riferimento. A questo valore percentuale vengono sommate le coppie perse, il cui apporto dipende dalla velocità di rotazione del motore e dal carico (o efficienza volumetrica o portata d'aria relativa). Le coppie perse sono costituite dalle dispersioni dovute al moto del pistone all'interno del cilindro, dal lavoro di pompaggio e dall'energia spesa per muovere gli ausiliari collegati all'albero motore (alternatore, asse a camme, ...). In altre parole, le coppie perse sono il lavoro che il motore deve compiere per poter rimanere acceso ma senza portare alcun effetto utile all'albero.

L'ultimo passaggio prima di inoltrare la richiesta di coppia lorda da parte del guidatore prevede la possibilità di bypassare il segnale nel caso in cui il motore sia acceso ma in condizione di minimo. In questa situazione, essendo il pedale rilasciato, la coppia

richiesta sarebbe solamente quella dovuta alle coppie perse. Nel caso in cui la velocità di rotazione scendesse al di sotto di quella del minimo (fissata da calibrazione), il valore di coppia richiesta verrebbe incrementato per ristabilire il regime di rotazione desiderato. Se il pedale viene rilasciato e il *cut-off* abilitato dalle giuste condizioni, la coppia richiesta viene imposta uguale a zero per richieder al motore l'ingresso in *cut-off*.

3.1.3 Scelta dell'anticipo

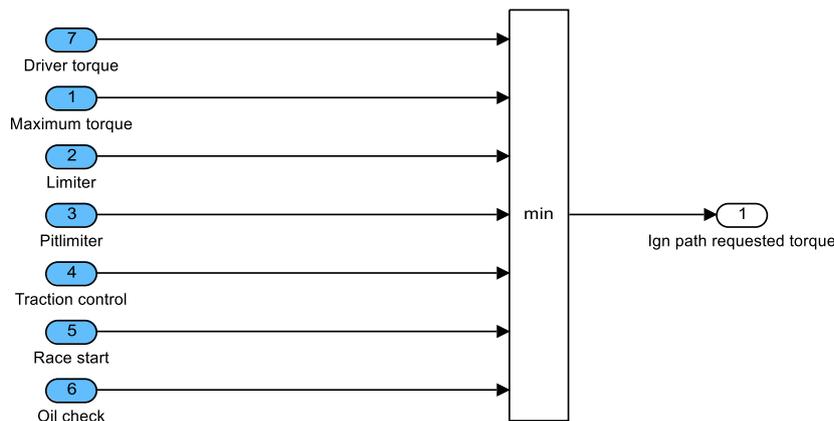


Figura 3.4 – Limitazione della coppia lato anticipo

Una volta definita la richiesta del pilota, la centralina confronta questo segnale con richieste secondarie di coppia che rappresentano l'intervento di altre funzionalità. Questo avviene dopo che la richiesta del pilota è stata sdoppiata per essere inviata ai blocchi relativi alla leva "veloce" (anticipo) e ai blocchi relativi alla leva "lenta" (aria). La coppia richiesta viene semplicemente confrontata con le altre domande che giungono alla struttura di controllo, in modo che venga scelto il segnale più piccolo. Dato che tutte le richieste sono espresse in percentuale, quando una funzione secondaria non deve limitare la richiesta del pilota assume un valore pari al 100%.

I contributi che possono intervenire per ridurre la coppia in situazioni particolari sono:

- la coppia del *traction control*, che si attiva per ridurre l'accelerazione delle ruote motrici e per garantire il miglior compromesso tra massima trazione e salvaguardia degli pneumatici;

- la coppia base, cioè la coppia massima che può essere ottenuta applicando l'anticipo base (che è l'anticipo massimo che si può attuare per avere le massime efficienze ma senza correre il pericolo di detonazione);
- la coppia del controllo olio;
- la coppia calcolata per garantire la migliore partenza all'inizio della gara;
- la coppia per limitare la velocità in *pit lane*;
- la coppia per limitare la velocità di rotazione nel caso venga raggiunto il limite superiore.

3.1.4 Individuazione della riserva di coppia

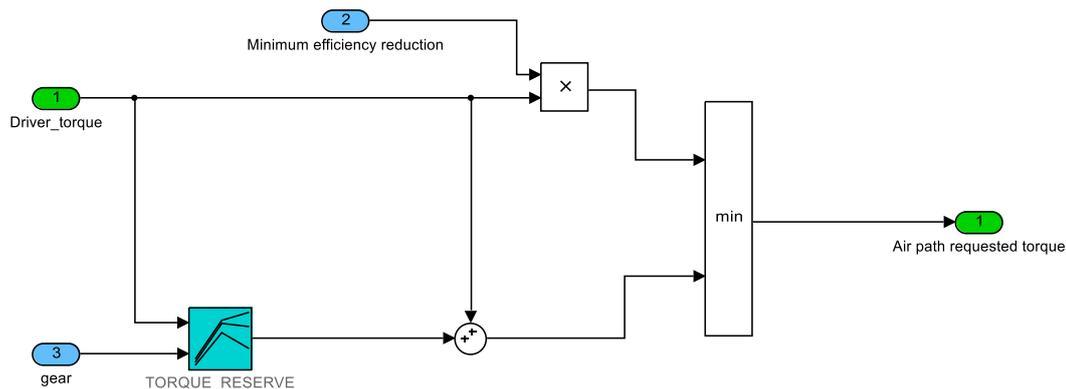


Figura 3.5 – Realizzazione della riserva di coppia

La parte di controllo lato aria è quella che viene maggiormente modificata rispetto alla struttura precedente; per la precisione, molte delle nuove calibrazioni sono state introdotte ex-novo perché caratteristiche del sistema di controllo in coppia.

Come primo passaggio, la centralina deve calcolare di quanto incrementare la richiesta di coppia per garantire una certa “riserva”, utile nel caso dei transitori di pedale per limitare il *turbo-lag*. L'incremento di coppia viene stabilito in base a delle calibrazioni che dipendono dalla marcia inserita e dalla richiesta del pilota; queste mappe possono essere corrette in base alle esigenze del pilota per garantire una determinata rapidità di accelerazione. Viene fissato un limite massimo di coppia lato aria che è la coppia massima che si può richiedere in modo tale che si possa soddisfare esattamente la richiesta del pilota tramite un degrado di anticipo; in altre parole, è un vincolo che garantisce che non venga mai erogata più coppia di quella che il guidatore sta richiedendo in un determinato istante.

3.1.5 Scelta della coppia lato aria

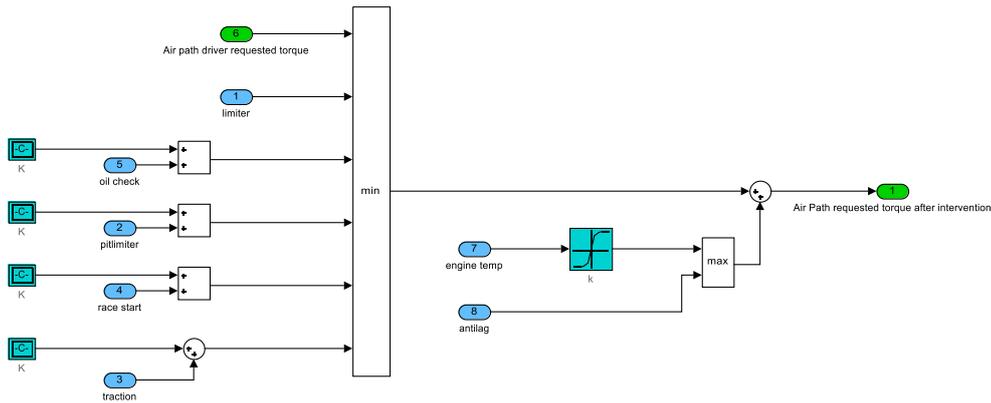


Figura 3.6 – Limitazione della coppia lato aria

Analogamente a quanto succede alla coppia richiesta dal pilota nella sezione di controllo dell'accensione, la coppia lato aria viene confrontata con le altre richieste secondarie calcolate in centralina. Questa funzione deriva direttamente da quella già presente nel software precedente: in realtà in quel caso le richieste di taglio di coppia venivano convertite in riduzioni dell'angolo di farfalla. Questo angolo negativo veniva poi sommato algebricamente alle altre richieste del sistema (pedale, offset del sistema *anti-lag*, offset per il sistema di assistenza alla partenza, offset per il *warm up* e offset calcolato dalle richieste di coppia delle funzioni secondarie).

3.1.6 Scelta dell'angolo di apertura farfalla

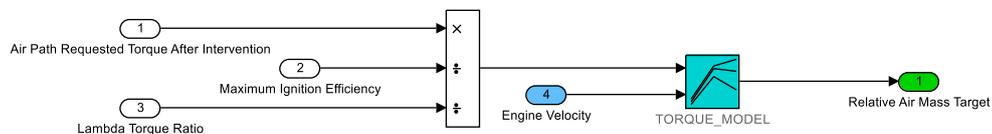


Figura 3.7 – Trasformazione della richiesta di coppia lato aria in richiesta di carico

La richiesta in termini di coppia può ora essere trasformata nel comando per l'attuazione della farfalla. Per prima cosa si passa dalla richiesta di coppia lato aria (corretta in base alle efficienze di anticipo massimamente attuabile e di lambda nominale) ad un target di carico, cioè un obiettivo di massa d'aria relativa che deve essere aspirata dal motore per garantire l'erogazione di quella coppia. Questo è possibile attraverso una calibrazione che restituisce il valore di carico in funzione della coppia target e dei giri motore.

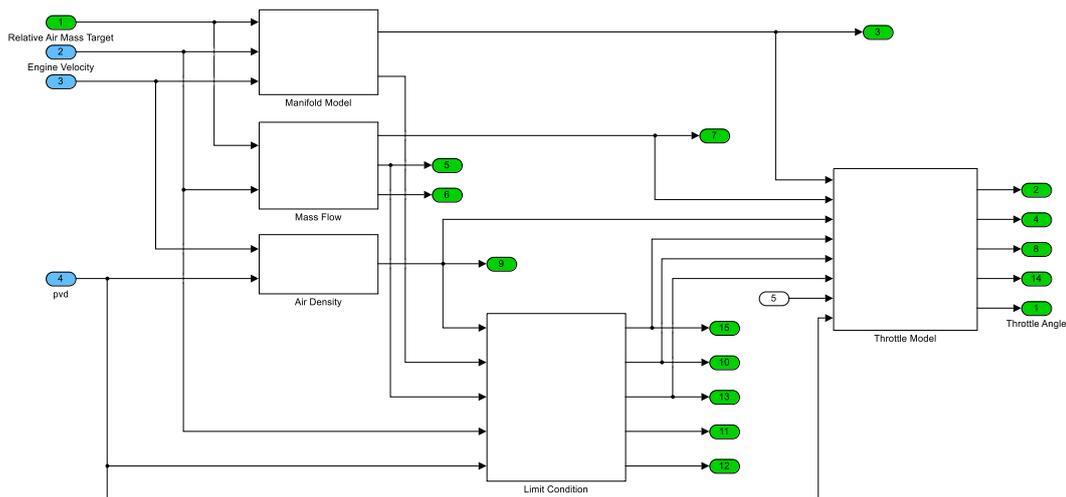


Figura 3.8 – Funzioni di calcolo dei modelli del sistema di aspirazione

Il carico obiettivo viene quindi convertito in una pressione del collettore dal modello polmone, costituito da una mappatura la cui calibrazione è una delle fasi più critiche di tutto il progetto. Da essa (in particolare dalla sua inversa, che restituisce il valore di carico data la pressione misurata nel polmone e la velocità di rotazione del motore) dipendono infatti tutte le calibrazioni del software che hanno come input il valore di carico; ogni volta che la mappa del modello polmone viene modificata, anche tutte le altre devono essere ricalibrate.

Parallelamente viene calcolata la portata d'aria in funzione del carico obiettivo precedentemente individuato. Questa dipende dai giri motore e da un parametro che dipende dalla cilindrata del motore e dalla densità dell'aria.

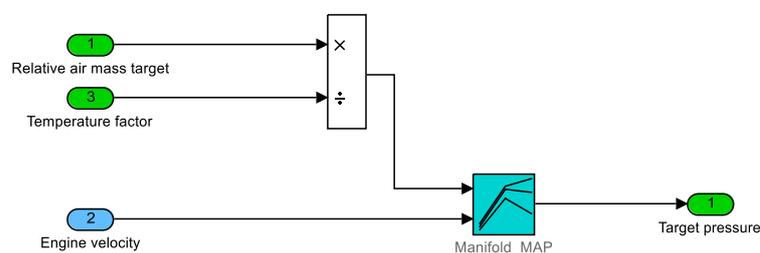


Figura 3.9 - Calcolo del target di pressione

A questo punto la centralina ha a disposizione tutti i segnali che le servono per stabilire l'angolo di apertura farfalla desiderato. Per effettuare questo calcolo viene utilizzata una mappa che restituisce il valore di apertura della valvola in funzione del rapporto tra la pressione del polmone e quella dopo l'intercooler (valle/monte farfalla) e della

portata di aria target corretta dal fattore dipendente da temperatura e pressione e dalla funzione ϕ , che dipende a sua volta dallo stesso rapporto di pressioni.

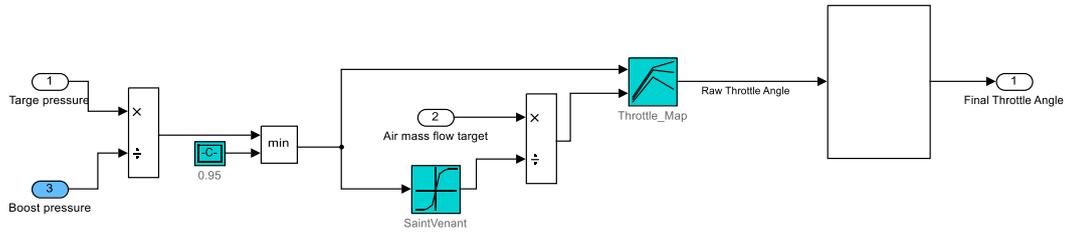


Figura 3.10 – Modello farfalla

La funzione ϕ viene determinata a partire dalla definizione generale di portata. La massa di fluido che passa per unità di tempo per una determinata sezione è definita dalla formula

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot c \quad [\text{kg/h}]$$

nella quale ρ [kg/m³] è la densità del fluido, A [m²] è l'area di passaggio effettiva e c [m/s] è la velocità del fluido. In pochi passaggi la stessa relazione può essere scritta nella seguente forma

$$\dot{m} = A(\alpha) \cdot \rho_0 \cdot \sqrt{R \cdot T_0} \cdot \phi \left(\frac{p_2}{p_0} \right)$$

con α angolo di farfalla, R costante universale dei gas, T_0 temperatura monte farfalla e la funzione ϕ definita come

$$\phi \left(\frac{p_2}{p_0} \right) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]}$$

con γ che è il rapporto tra il calore specifico a pressione costante e il calore specifico a volume costante del gas.

L'andamento della funzione per valori del rapporto di pressione da 0 a 1 assume valori nulli agli estremi ed ha il massimo in corrispondenza di $(p_2/p_0)_{cr} = 0,528$. Sperimentalmente si è dimostrato che per valori del rapporto minori del rapporto critico ci si trova in condizioni di blocco sonico; in questo caso la portata dipende solo dalle condizioni di monte e dall'apertura della farfalla e la portata massica normalizzata sul suo valore massimo vale 1.

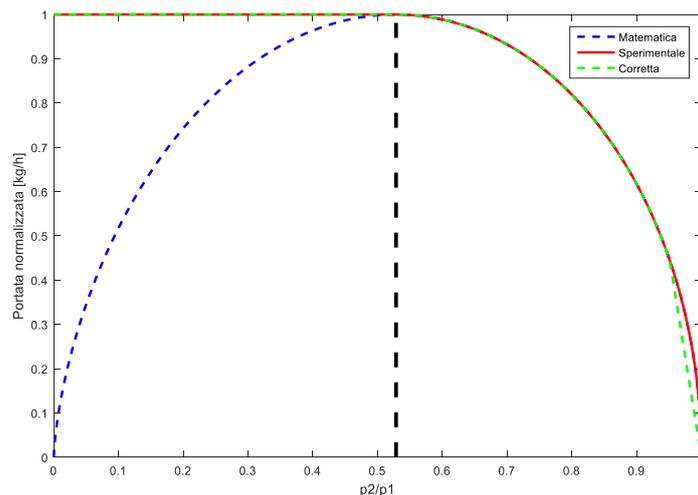


Figura 3.11 – Funzione di Saint Venant

Tornando al software di centralina, una volta che l'angolo di apertura farfalla è stato calcolato dal controllo in coppia, il valore viene scritto come output e utilizzato dalle funzioni già presenti nel sistema Bosch. Tale angolo di apertura può essere bypassato per richieste del cambio in fase di scalata; a valle di questo *switch* il valore viene filtrato per evitare una battuta meccanica troppo violenta e limitato per evitare pressioni troppo basse ad alti giri. Infine un sistema di sicurezza impone un valore costante (minore del 10%) nel caso venga individuato un errore nella lettura dei potenziometri del pedale.

3.1.7 Controllo della *waste-gate*

In un motore turbo la pressione di sovralimentazione dipende da quanto velocemente ruoti la turbina. A sua volta, questo dipende dalla portata dei gas di scarico e dalla loro temperatura, cioè dall'entalpia che i fumi possono trasferire alla girante della turbina. Grazie ad una valvola chiamata *waste-gate* il sistema di controllo può decidere di quanto sfruttare i gas di scarico per mettere in moto il turbocompressore. Con questo attuatore i gas possono essere fatti passare attraverso un condotto parallelo alla turbina e in questo caso la loro entalpia non viene del tutto recuperata.

Nel sistema di controllo del motore da competizione, la regolazione della *waste-gate* è gestita dalla funzione di controllo della sovralimentazione. Nel passaggio al controllo in coppia questo sottosistema non è stato aggiornato e quindi gli input e i target della funzione sono gli stessi utilizzati nella strategia della passata stagione.

Il funzionamento del controllo della sovralimentazione è molto banale: alcune calibrazioni stabiliscono la pressione polmone target in base alla richiesta di apertura farfalla e ai giri del motore. Questo avviene in due sottosistemi paralleli: quello del pre-controllo, che verifica che la pressione richiesta non superi i limiti imposti dal regolamento e calcola lo scostamento della pressione target rispetto alla pressione reale, e il blocco di controllo diretto, che calcola in catena aperta un segnale per comandare direttamente la *waste-gate*.

Questa struttura comporta due problemi se utilizzata nel sistema di controllo in coppia. Il primo è dovuto al fatto che un input della funzione di controllo è il valore di apertura di farfalla. Il secondo è che il target del controllo *waste-gate* è il valore di pressione a valle farfalla. Con la nuova strategia però l'angolo di farfalla dipende a sua volta dalla pressione di sovralimentazione, e questa dipendenza reciproca potrebbe causare l'innescarsi di oscillazioni. Sarebbe più corretto quindi imporre un target di pressione dopo il compressore e svincolare il comportamento della *waste-gate* dal movimento della farfalla.

3.2 Simulazioni

Una delle potenzialità di Simulink è quella di poter simulare il funzionamento del sistema di controllo appena progettato. La simulazione è uno strumento importantissimo per lo sviluppo software dei sistemi di controllo: permette infatti di valutare la risposta del modello a determinati input, che possono essere inseriti manualmente o presi da acquisizioni effettuate direttamente in vettura. In questo modo si può evitare la fase di prototipazione fisica, in modo da risparmiare tempo e denaro che possono essere reinvestiti per la sperimentazione di nuove funzionalità. Nell'ambito della progettazione software, simulare significa poter evitare di compilare un software che potrebbe non funzionare una volta caricato sulla centralina motore.

In generale una buona simulazione richiede che il modello venga validato, cioè bisogna essere sicuri che gli output virtuali siano gli stessi che avrebbe l'oggetto fisico. Nel caso del software di controllo del motore da competizione Ferrari la simulazione è stata svolta con l'obiettivo di valutare il funzionamento della struttura di controllo e i miglioramenti apportati rispetto al software precedente.

In fase di progettazione del sistema di controllo la simulazione è servita per controllare l'assenza di errori nella compilazione del modello; grazie a dati di pista già disponibili, è stato possibile utilizzare input reali come ingressi del sistema per valutare gli output delle nuove funzioni. Inoltre, con un modello di dinamica del veicolo molto semplice, è stato possibile valutare le differenze tra i due sistemi (attuale e controllo in coppia) per quanto riguarda la risposta ad un segnale virtuale del pedale. Bisogna sottolineare però che i due modelli di sistema di controllo utilizzati per la simulazione non sono calibrati in modo analogo, quindi la simulazione serve solamente ad illustrare i diversi comportamenti delle due strategie e non come metodo di confronto delle prestazioni.

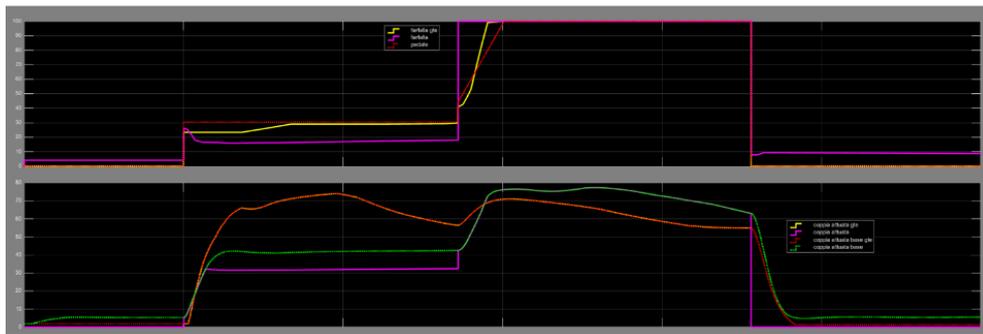


Figura 3.12 – Simulazione di un profilo di affondata del pedale

L'immagine rappresenta gli output dei due sistemi di controllo ottenuti attraverso Simulink. Nella parte superiore si vede il comportamento della farfalla in risposta all'input di pedale, che è l'unico segnale in ingresso ai modelli, mentre nella parte inferiore si possono vedere gli andamenti della coppia attuata, della coppia base e della riserva di coppia.

In parzializzato (30% pedale), la farfalla del sistema originale (segnale giallo) segue il profilo del pedale ma risente anche dell'aumento dei giri motore, perciò non è costante. La coppia attuata (gialla nell'immagine inferiore) coincide esattamente con la coppia base (rossa nell'immagine inferiore), cioè quella ottenuta attuando il massimo anticipo possibile. Con il controllo in coppia, la farfalla (viola) è tale da garantire una coppia attuata costante (viola nell'immagine inferiore): l'aria aspirata è maggiore di quella sufficiente a garantire l'erogazione della coppia attuata e quindi l'anticipo sarà minore di quello base, altrimenti la coppia erogata sarebbe troppo grande (verde nell'immagine inferiore).

Durante la rampa fino al 100% di pedale, la farfalla segue il profilo di salita nel caso del controllo attuale, mentre viene spalancata totalmente nel caso di controllo in coppia. Questo accade perché oltre a una certa soglia di apertura farfalla il nuovo sistema riconosce una condizione limite per cui è necessario spalancare la farfalla per garantire la portata d'aria target. La coppia erogata dal sistema attuale risente della dinamica lenta di riempimento del collettore e cresce non istantaneamente; nel caso del controllo in coppia, invece, una certa quota di coppia viene garantita istantaneamente grazie alla variazione dell'angolo di accensione.

Infine, a pedale pari a 100%, la farfalla è completamente spalancata e la coppia erogata è in entrambi i casi pari alla coppia base (cioè la coppia massima del motore).

Capitolo 4. Calibrazione

I sistemi di controllo elettronico del motore possono sfruttare al meglio le proprie potenzialità solo quando si adattano perfettamente al propulsore per cui vengono utilizzati. Per poter estendere la validità di un software di controllo a più modelli possibile di motore, è necessario che alcune delle sue parti siano rappresentati da parametri modificabili. La calibrazione è proprio la disciplina che si occupa di adattare questi parametri al relativo motore e a tutte le condizioni di funzionamento possibile (ad esempio climi molto freddi o molto caldi, funzionamento ad alta quota, *feeling* di guida diversi, e così via).

La gestione dei parametri viene semplificata in fase di progettazione del software separando le informazioni del *program status* da quelle del *data status*. Il primo contiene tutte le informazioni delle variabili che vengono applicati, i loro valori massimi e minimi, etc.; il secondo contiene invece i numeri che effettivamente tali parametri assumono.

La maggior parte delle modifiche *hardware* effettuate al motore richiedono una ricalibrazione di alcuni parametri. Ad esempio, risulterebbe necessario modificare le mappature relative all'aspirazione dell'aria nel caso ci fossero modifiche dei componenti della linea di aspirazione, dell'asse a camme (fasatura) o del gruppo turbocompressore. Allo stesso modo, modifiche di geometria motore, della tipologia di olio motore utilizzata, degli ausiliari collegati direttamente all'albero motore, implicherebbero la necessità di aggiornare le calibrazioni della coppia.

La fase di calibrazione si svolge in parte in laboratorio, dove vengono utilizzati i motori allestiti al banco, e in parte in pista, con i motori montati direttamente su vettura. Dopo una fase di verifica, i valori di costanti, curve e mappe così ottenuti vengono scritti sulla memoria flash di centralina. Un sistema di calibrazione consiste quindi in una centralina che possa essere interfacciata ad un *tool* di misura e calibrazione. Non solo su veicolo quindi: i sistemi di acquisizione, misura e diagnosi possono essere usati anche sui banchi motore e nei sistemi *In-the-Loop*.

Le calibrazioni servono a sostituire alcuni modelli fisici che rappresentano il funzionamento preciso di determinati componenti del motore; sono costanti o tabelle

sperimentali, che restituiscono il valore della variabile richiesta in funzione di uno o più input. Le calibrazioni del software di controllo del motore da competizione sono più di 3000 e possono essere classificate in varie categorie:

- i *codeword* servono per attivare o disattivare determinate funzionalità presenti in centralina. Sono numeri che vanno da 0 a 255 e vengono letti in codice binario e in 8 bit dal software: ad esempio il numero 27 diventa 00011011. Per attivare o disattivare uno switch, il software legge uno di questi bit e a seconda che il valore letto sia 0 e 1 l'output della funzione viene utilizzato o bypassato;
- le costanti sono numeri che possono avere significato fisico, ad esempio conversione di un'unità di misura, densità dell'aria in condizioni standard, rapporto stechiometrico aria/combustibile, o semplicemente sperimentale (correzione di un segnale, offset, valore di riferimento);
- le mappe 1-D presentano un solo ingresso e restituiscono un output. Una di queste calibrazioni è ad esempio la variazione di efficienza in funzione della variazione di angolo di anticipo (curva ad ombrello);
- le mappe 2-D hanno invece bisogno di 2 input per calcolare un output. Queste mappe sono molto importanti perché spesso sostituiscono complicati modelli fisici. Tra le principali calibrazioni di questo genere si possono trovare il modello polmone (massa d'aria relativa in funzione della velocità di rotazione del motore e della pressione misurata nel collettore di aspirazione), il modello farfalla inverso (angolo di apertura farfalla necessario a garantire il passaggio di una certa portata d'aria in presenza di un dato rapporto di pressione valle/monte farfalla), le mappe pedale (valore di coppia richiesta dal pilota in funzione della velocità di rotazione del motore e della pressione del piede sul pedale dell'acceleratore).

La determinazione dei valori da associare alle variabili richiede sforzi differenti a seconda del tipo di calibrazione. Se per calibrare i *codeword* basta decidere se si voglia o meno attivare la relativa funzione, per le mappe e le costanti fisiche sono necessari test sperimentali per stabilire le correlazioni tra le varie grandezze. Spesso queste prove richiedono l'acquisizione di segnali non misurabili in vettura; inoltre la calibrazione è un processo che deve risultare ripetibile e con i comandi a disposizione del pilota (ad esempio il pedale acceleratore) questo non risulta fattibile. Per questo si

utilizzano i banchi prova; il motore viene messo in moto in laboratorio, dove viene svincolato da tutto ciò che si trova a valle dell'albero motore e dove può essere dotato di molti sensori che in macchina non sono presenti, per motivi di costi e di installazione. Tale possibilità permette così di evitare molti test su veicolo, meno ripetibili, meno affidabili e meno precisi.

In questo capitolo vengono illustrate le prove a banco per la calibrazione delle mappe che sostituiscono i modelli fisici di aspirazione (modello polmone, modello farfalla) e di gestione della coppia (coppia massima in funzione dell'aria aspirata, anticipo ottimo, anticipo minimo, etc.). La calibrazione di alcune mappature richiede invece test su pista perché riguardano aspetti, come ad esempio le sensazioni di guida del pilota, che non possono essere valutate in sala prove. La realizzazione di queste mappe verrà svolta durante la fase di verifica su pista, quando il nuovo software di controllo sarà implementato in centralina e i piloti potranno provare e giudicare il sistema di controllo.

4.1 Specifiche di calibrazione

Per eseguire le prove a banco in laboratorio è necessario fornire al personale che svolge i test una precisa documentazione, contenente le istruzioni per acquisire nel modo opportuno i dati richiesti. L'insieme dei procedimenti per preparare e svolgere una prova viene definito nella specifica di calibrazione; quasi ogni mappa che deve essere calibrata richiede una serie di istruzioni personalizzata.

Le specifiche necessarie per la calibrazione dei parametri presenti nel controllo in coppia di questo progetto sono:

- specifica per la calibrazione dei modelli di polmone e di farfalla: deve essere realizzata per prima perché molte delle calibrazioni che verranno eseguite successivamente hanno come input il valore di massa d'aria relativa aspirata dal motore, che viene calcolato a partire dal segnale di pressione misurato nel collettore di aspirazione;
- specifica per la calibrazione delle coppie perse: serve per indicare il procedimento corretto per l'acquisizione dei dati necessari per la valutazione delle perdite del motore (attriti, pompaggio, ausiliari);

- specifica per la prova di variazione del lambda: indica il procedimento per valutare gli effetti della variazione del rapporto aria/combustibile (rispetto allo stechiometrico o ad un valore di riferimento) sull'efficienza di erogazione della coppia e sull'angolo di anticipo di accensione ottimale;
- specifica per la prova di variazione dell'anticipo: contiene i valori di spazzolata di anticipo che verranno testati per poter disegnare la curva di efficienza e stabilire le mappe di coppia base, anticipo ottimo, coppia massima e anticipo minimo.

Ciascuna prova richiede quindi degli accorgimenti diversi sia in termini di procedimento che di strumentazione. Lo scheletro delle istruzioni da inviare ai tecnici di sala prove è comune e formato dalle seguenti sezioni:

- allestimento hardware: eventuali modifiche ai componenti del motore, sensori particolari da utilizzare, strumenti di misura aggiuntivi;
- disabilitazioni: funzioni di controllo che devono essere disattivate per non influenzare la misura;
- mappe necessarie: calibrazioni che devono già essere implementate in centralina prima dello svolgimento della prova;
- definizione punti: punti motore (velocità di rotazione, carico) in cui è necessario effettuare le prove. Il numero di questi punti dipende dalla precisione con cui si vuole calibrare la tabella e dal budget a disposizione, mentre la discretizzazione (cioè la distanza tra un punto di misura e il successivo) dipende dalla stabilità dell'output in quella determinata zona della mappa: più il valore tende a variare in modo irregolare, più la densità di punti di misura sarà alta;
- canali aggiuntivi: si tratta di segnali che normalmente non vengono misurati (per scelta o perché su veicolo non sono presenti i sensori necessari) ma che servono per la prova;
- procedura: sequenza delle operazioni da seguire per la prova.

4.1.1 Specifica per la calibrazione dei modelli polmone e farfalla

Come detto in precedenza, la definizione delle mappature del modello polmone è una delle fasi più critiche del progetto. Sbagliare la mappa del carico in funzione della

pressione e dei giri motore e procedere con la calibrazione delle mappe di coppia significherebbe aver buttato via tantissime ore di lavoro al banco e dover ripetere non solo la mappa del modello polmone, ma anche tutte quelle successive.

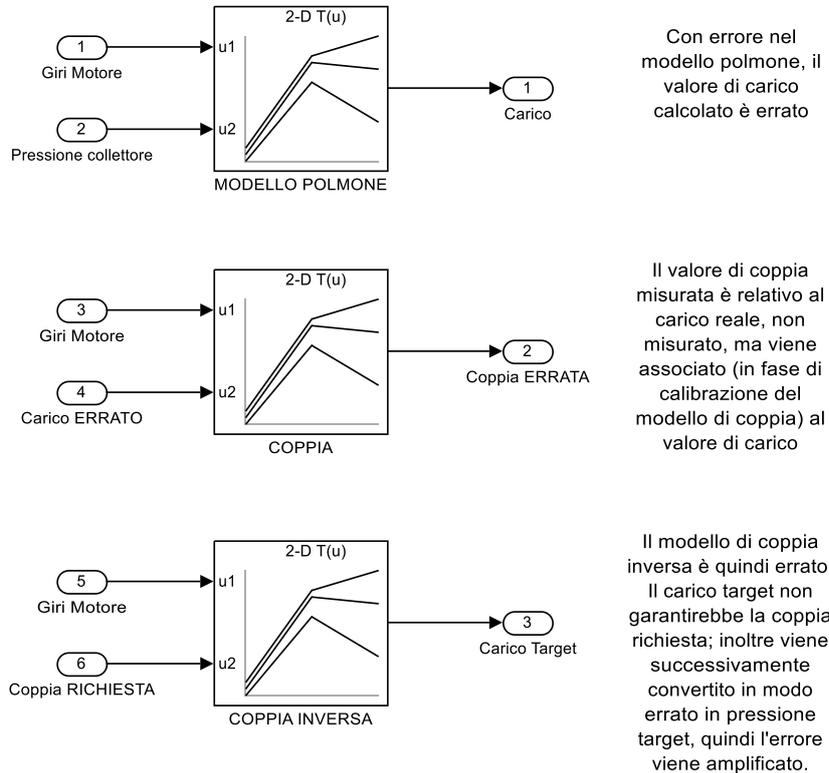


Figura 4.1 – Effetti di una erronea calibrazione del modello polmone

Per questa prova vengono utilizzati due strumenti non disponibili in vettura: il “lambda scanner” e la bilancia gravimetrica. Il primo sostituisce le sonde lambda per stabilire con precisione il valore del rapporto aria/combustibile reale: viene montato lungo il condotto di scarico e può essere accompagnato da un sensore di pressione per la compensazione del valore misurato. Nel nostro caso, il modulo di lettura del lambda scanner non dispone dello spazio per montare il sensore di pressione ma, dato che dopo la turbina non sono installati dispositivi (ad esempio il catalizzatore) che possano causare cadute di pressione, si suppone che nel punto di misura la pressione sia pari a quella ambiente. La bilancia gravimetrica è fondamentale per il calcolo del carico a partire dal consumo di combustibile. In molte vetture stradali la portata d’aria effettiva è misurata dal debimetro, uno strumento che viene posizionato prima del filtro. Nel motore trattato questo dispositivo non viene montato, principalmente per i costi e perché non vi è l’esigenza di utilizzare uno strumento estremamente accurato. In

vettura la portata d'aria viene stimata con una mappa a partire dalla pressione del collettore di aspirazione. Per calibrare questo parametro, a banco la portata d'aria reale viene misurata a partire dalla portata in massa di benzina iniettata:

$$\dot{m}_{aria} = \dot{m}_{combustibile} \cdot \alpha_{st} \cdot \lambda$$

dove α_{st} è il rapporto stechiometrico tra aria e combustibile e λ è il rapporto tra aria e combustibile reale rispetto al rapporto stechiometrico.

L'utilizzo della bilancia presenta comunque alcuni problemi. Dato che la portata viene misurata in base alla variazione di massa del serbatoio della bilancia in un intervallo di tempo consistente (decine di secondi), la sua precisione è garantita solo per i funzionamenti in stazionario, perché viene misurata la portata media. L'impossibilità di misurare la portata in intervalli di tempo più piccoli (portata istantanea) è dovuta principalmente alla sensibilità della bilancia, che non è in grado di misurare variazioni di massa dell'ordine dei milligrammi. Una vaschetta di misura più piccola, d'altro canto, permetterebbe certo una sensibilità maggiore ma si svuoterebbe in pochi istanti; ogni volta che il serbatoio della bilancia viene riempito però è necessario interrompere la misura, perché la differenza di massa pesata viene influenzata dal rifornimento.

Per questo un'indicazione molto importante per queste prove è quella di effettuare le acquisizioni solo dopo un consumo di massa di 50 g, dopo i quali il valore di portata misurata risulta affidabile.

A livello di disabilitazioni è stato necessario disattivare la catena di autoapprendimento dell'iniezione per poter risalire più facilmente al valore di massa di carburante iniettato. Infatti con il controllo in retroazione attivo il valore di massa relativa di benzina viene corretto per permettere la realizzazione del lambda nominale nel caso di deviazioni. Per evitare di dover correggere per ogni punto di misura il valore dell'iniezione, i coefficienti di moltiplicazione vengono impostati ad 1 e gli offset a 0. Le mappe necessarie in questa fase sono le calibrazioni "base", cioè quelle che vengono stabilite dalla sala prove per garantire la protezione componenti (ad esempio anticipo massimo per evitare detonazione, anticipo minimo per non surriscaldare troppo lo scarico), quelle fissate da regolamento (ad esempio coppia massima, pressione iniezione) e quelle fissate a priori in seguito alla definizione di alcune strategie (ad esempio fase di iniezione, tempi di iniezione, fasatura valvole).

Per la definizione dei punti motore in cui effettuare le misure ci si è basati in parte sul *know-how* Ferrari e in parte su raccolte di dati relativi alla versione da competizione per stabilire i limiti minimi e massimi dei valori di velocità di rotazione del motore, pressione del collettore di aspirazione e massa d'aria aspirata relativa. Il motore ha il minimo a 2250 giri/min e non va oltre i 7000 giri/min; in gara sfrutta i regimi tra 4000 e 6500 giri/min e in questo intervallo sono stati quindi presi valori ogni 250 giri/min. Le capacità in termini di pressione vanno da un minimo poco superiore a 100 mbar ad un massimo di 1900 mbar, ottenibile grazie alla sovralimentazione; la discretizzazione è pressoché uniforme con salti di 100 o 150 mbar tra un punto e l'altro. Per mantenere le stesse dimensioni delle calibrazioni già presenti nel software Bosch, si avranno in definitiva 18 breakpoint di giri motore e 14 di pressione, per un totale di 252 punti di misura richiesti.

		GIRI MOTORE																	
		1500	2000	2500	3000	3500	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000	6250	6500	6750	7000
PRESSIONE POLMONE	150																		
	350																		
	600																		
	800																		
	1000																		
	1100																		
	1200																		
	1350																		
	1500																		
	1650																		
	1700																		
	1750																		
	1800																		
	1950																		

Tabella 1 - Piano di prova per la calibrazione del modello polmone e del modello farfalla

I canali di acquisizione che è necessario registrare sono due: la pressione del polmone media, per tenere conto di eventuali sbilanciamenti tra le due bancate, e il carico calcolato a partire dal consumo di combustibile, definito come

$$carico = \frac{\dot{m}_{fuel} \cdot \lambda \cdot \alpha_{st}}{n_{mot} \cdot m_{aria,std}}$$

che indica quindi il rapporto tra la portata d'aria effettivamente aspirata dal motore e la portata d'aria che si avrebbe in condizioni di pressione e temperatura di riferimento (0°C e 1013 mbar).

Per effettuare le prove bisogna rispettare due condizioni: acquisire i dati dopo un consumo di combustibile di 50 g e a una temperatura dell'aria aspirata pari a 50 °C. L'imposizione sulla temperatura di riferimento serve perché in centralina è presente un vettore di correzione del carico in funzione della temperatura: dato che per il nostro

motore è stato scelto come riferimento il valore di 50 °C (temperatura di equilibrio a regime), in corrispondenza del quale il fattore di correzione è pari a 1, risulta più conveniente acquisire i dati a questa temperatura.

4.1.2 Specifica per la calibrazione delle coppie perse

Una volta generata e verificata a banco la mappa del modello polmone sarà possibile procedere con i test successivi, dopo aver ricalibrato le mappe base rispetto ai nuovi valori di carico. La calibrazione delle coppie perse deve essere eseguita prima delle prove successive, perché per valutare l'efficienza di erogazione della coppia in funzione del lambda e dell'anticipo bisogna tenere conto di tutta la coppia erogata dal motore, anche se poi una parte verrà effettivamente persa e non sarà disponibile all'albero.

Le coppie perse rappresentano quella quota di energia trasferita al pistone che non risulta disponibile all'albero per la trasmissione alle ruote. Il loro valore varia tra il 10% (in condizioni di pieno carico) e il 100% (al minimo) del lavoro indicato; più la percentuale è alta, più l'efficienza di erogazione della coppia del motore sarà bassa. Una grande parte di queste perdite si manifesta sotto forma di calore, che deve essere smaltito prima nel refrigerante e nell'olio, quindi nel radiatore e nel sistema di raffreddamento dell'olio; questi componenti devono essere quindi dimensionati di conseguenza.

Le coppie perse sono generate da tre diversi contributi:

- perdite di pompaggio: rappresentano il lavoro netto del pistone sui gas presenti nel cilindro durante le fasi di aspirazione e scarico. Nel grafico $p - V$ sono visibili nell'area compresa tra la linea di aspirazione (pressione minore di quella atmosferica) e quella di scarico: nel caso di motori turbocompressi, nei quali la pressione di aspirazione può essere maggiore di quella atmosferica, questo contributo potrebbe risultare positivo nel bilancio totale di energia;
- perdite dovute agli attriti: è la quantità di energia spesa per vincere le dissipazioni che nascono dai moti relativi dei componenti. Sono inclusi gli attriti tra le fasce elastiche e le pareti del cilindro, gli attriti nei cuscinetti degli alberi in rotazione, gli attriti dei meccanismi delle valvole di aspirazione e di scarico, gli attriti degli ingranaggi e delle cinghie;

- lavoro degli ausiliari: consiste nell'energia necessaria per far funzionare gli accessori collegati direttamente all'albero motore, quali le pompe, le ventole, l'alternatore. Di solito sono compresi solo gli ausiliari essenziali per il funzionamento del motore.

Per acquisire i dati a banco e calcolare le dispersioni del motore è possibile procedere in vari modi. Per un motore aspirato (e per il funzionamento in modalità di aspirato di un motore turbo) è possibile ottenere le informazioni sulle perdite portando il motore al punto desiderato (giri, carico), spegnendo i cilindri per entrare nella condizione di *cut-off* e imponendo al freno (che deve essere in grado di trascinare il motore) di continuare a far girare l'albero alla stessa velocità di rotazione degli istanti precedenti allo spegnimento. In questo modo, leggendo il valore di coppia necessaria al freno per garantire il moto costante del motore, si ottiene esattamente il lavoro per vincere gli attriti del motore e favorire l'ingresso dell'aria fresca in camera. Il fatto di eseguire la prova spegnendo il motore al punto di funzionamento e non mettendolo in moto direttamente con il freno viene fatto per avere le temperature del sistema a valori più vicini possibile alla realtà fino all'istante in cui venga attivato lo stato di *cut-off*.

In un motore turbo questo procedimento non è però fattibile: spegnendo tutti i cilindri infatti verrebbe a mancare l'effetto della turbina e le coppie calcolate non sarebbero realistiche. In sala prove però è possibile dotare il motore di particolari sensori che in vettura non possono essere montati per problemi di ingombri e costi. Uno di questi è il sensore di pressione in camera, che permette di misurare una grandezza di fondamentale importanza nell'analisi della combustione. Disegnando il grafico della pressione del cilindro in funzione del volume (che varia con il moto del pistone) è possibile ottenere il diagramma di indicatore, o diagramma pressione – volume. Lo studio di questo grafico restituisce diverse informazioni sul lavoro effettivo ottenuto dalla combustione: il lavoro indicato del ciclo è infatti l'integrale lungo la curva della pressione, cioè l'area racchiusa all'interno del diagramma.

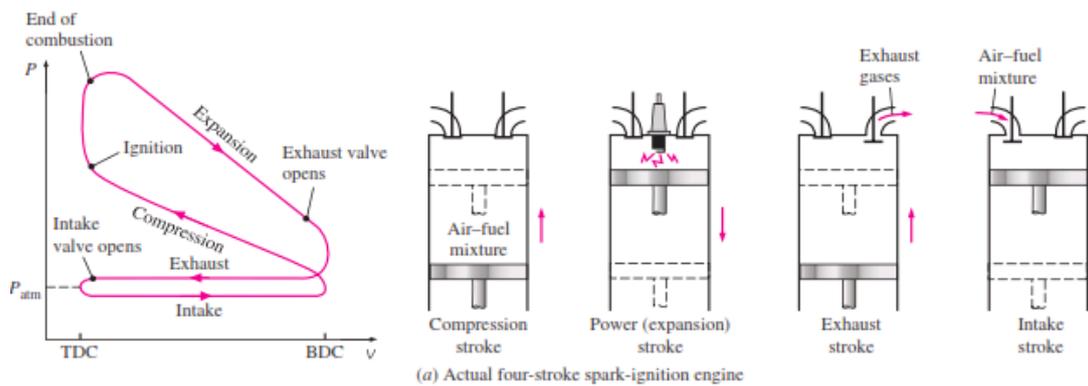


Figura 4.2 – Sequenza delle fasi di un motore a 4 tempi

Grazie a questi dati è possibile ricavare il valore delle coppie perse attraverso la formula

$$Coppie_{perse} = \frac{(pmf + pmp) \cdot V}{4\pi} \cdot 100 \quad [\text{Nm}]$$

dove

- $pmf = pmi - pme$ [Pa] sono le coppie perse dovute ad attriti e ad ausiliari;
- $pmp = pmih - pmi$ [Pa] sono le coppie perse dovute al pompaggio;
- $pmih$ [Pa] è il lavoro del pistone sul fluido presente nel cilindro nelle sole fasi di compressione ed espansione (lavoro totale senza il pompaggio);
- $pme = \eta_o \cdot pmi$ [Pa] è la pressione media effettiva;
- η_o è il rendimento organico, che tiene conto delle perdite meccaniche del motore (forze di inerzia, attriti, movimento degli ausiliari);
- pmi [Pa] è la pressione media indicata;
- V [dm³] è la cilindrata del motore.

Nel caso della calibrazione del motore da competizione si è scelto di misurare le coppie perse ricorrendo al *cut-off* totale per il range di funzionamento in aspirato (con carico che varia tra il minimo e circa 110%) mentre nella zona di attivazione del turbo ci si è affidati alle misure dei dati *indicating*. Inoltre è stata richiesta l'acquisizione dei dati di combustione anche per i punti in aspirato per eseguire un confronto tra i valori misurati nei due casi.

		GIRI MOTORE																	
		1500	2000	2500	3000	3500	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000	6250	6500	6750	7000
CARICO	15	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	20	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	30	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	40	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	50	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	70	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	90	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	110	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	130	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	150	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	170	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	190	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabella 2 - Piano di prova per la stima delle coppie perse

Per lo svolgimento delle prove bisogna rispettare alcune indicazioni:

1. Presenza di un caricabatteria esterno perché l'alternatore deve essere trascinato ma non in grado di ricaricare;
2. Temperatura motore di 90° C;
3. Compressore AC e pompa idroguida devono essere cortocircuitate;
4. Anticipo attuato sempre uguale all'anticipo base;
5. Per i punti in aspirato portarsi al punto di prova, effettuare l'acquisizione *indicating*, poi andare in *cut-off* e dopo aver ricentrato il valore del carico effettuare la registrazione dei dati;
6. Per i punti in turbo effettuare la misura solo dei dati *indicating* a motore acceso.

4.1.3 Specifica per la prova di variazione del lambda

Il parametro λ è di fondamentale importanza per il funzionamento e per il controllo del motore. Viene definito come

$$\lambda = \frac{(A/F)_{reale}}{(A/F)_{st}}$$

dove (A/F) è il rapporto tra la massa d'aria e la massa di combustibile in camera di combustione: il valore stechiometrico è individuato dalla reazione chimica di combustione e dipende dal tipo di combustibile. Per miscele "ricche" si ha $\lambda < 1$, per miscele "magre" invece $\lambda > 1$.

La variazione del parametro lambda ha effetto sulla quantità di coppia erogata e sull'angolo di anticipo di accensione. Le coppie più alte si hanno normalmente per miscele leggermente ricche ($\lambda=0.9$) mentre con miscele magre le prestazioni calano anche se, grazie alla possibilità di bruciare completamente il combustibile iniettato, si ottengono vantaggi in termini di consumi. L'effetto sull'anticipo si manifesta perché a

seconda del rapporto aria/combustibile la velocità di combustione cambia (in particolare con λ vicino a 0.9 si hanno le velocità maggiori). L'angolo di accensione ottimale deve essere quindi spostato per mantenere l'angolo MFB₅₀ (angolo in cui è stato bruciato metà del carburante iniettato) in una finestra tra gli 8° e i 12° dopo il punto morto superiore; in questo modo l'efficienza di erogazione della coppia sarà massima.

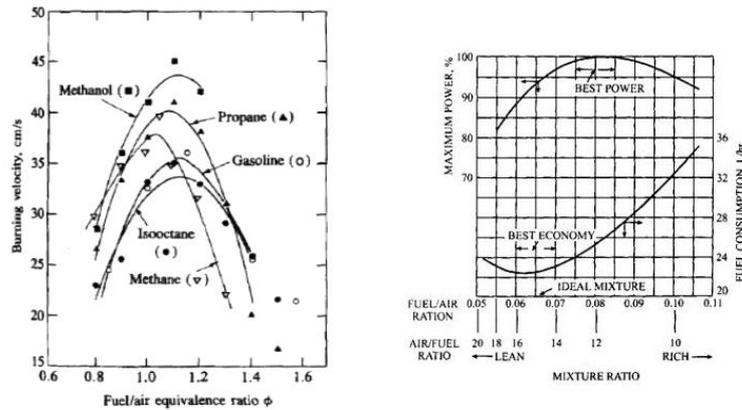


Figura 4.3 - Effetto di λ ($\Phi = 1/\lambda$) sulla velocità di fiamma (sinistra) e sull'erogazione della potenza (destra)

Bisogna tenere conto inoltre che nel caso di un motore da competizione non si possono trascurare le regole imposte dall'ente che stabilisce il regolamento. Uno dei vincoli è quello di dover dichiarare prima dell'inizio del campionato le curve di potenza e di coppia massima della propria vettura. Nel caso del motore da competizione, le curve di coppia e potenza sono state individuate per valori di lambda pari a 1,1, nonostante le prestazioni massime si otterrebbero con un lambda attorno a 0,9, perché non c'è la necessità di spingere il motore al massimo delle proprie capacità e, utilizzando miscele magre, è possibile limitare i consumi. Per questo motivo durante le prove si assume come riferimento il valore 1,1, in corrispondenza del quale l'efficienza di erogazione della coppia è pari a 1 e l'angolo di anticipo ottimo è quello calibrato in mappa.

Le prove di variazione del lambda non richiedono particolari accorgimenti. Le acquisizioni vengono effettuate in solo 9 punti motore, in ognuno dei quali si applicano 5 valori di rapporto aria/combustibile diversi (1,15, 1,1, 1,0, 0,9, 0,85); per ciascuno di questi lambda viene effettuata una spazzolata di anticipo, per trovare la coppia massima e l'anticipo ottimo relativi a quel punto motore. Svolgere i test su più punti motore non risulta conveniente, sia perché si tratta di prove molto lunghe, sia perché

la precisione della curva di efficienza in funzione del lambda è considerata accettabile con un numero limitato di campioni acquisiti.

		GIRIMOTORE																	
		1500	2000	2500	3000	3500	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000	6250	6500	6750	7000
CARICO	15																		
	20																		
	30																		
	40																		
	50																		
	70																		
	90																		
	110																		
	130																		
	150																		
	170																		
	190																		

Tabella 3 - Piano di prova di variazione di lambda

4.1.4 Specifica per le prove di spazzolata di anticipo

L'ultimo test che deve essere effettuato a banco per la calibrazione è certamente quello più lungo e serve per determinare l'effetto che hanno diversi angoli di accensione sulla combustione. I dati di queste prove verranno sfruttati per la realizzazione di varie mappe, tra le quali quella che individua l'anticipo ottimo in ogni punto motore, la mappa di coppia massima e la curva che rappresenta la variazione di efficienza quando si applica un angolo di anticipo diverso da quello ottimale. La lunghezza della prova è dovuta alle prime due mappature citate: queste infatti richiedono che le acquisizioni siano fatte in tutto il campo di funzionamento del motore perché le grandezze che calcolano (coppia, angolo di accensione) devono essere precise in ogni punto motore (e non interpolate) per rispettare la richiesta del pilota e regolare con precisione, attraverso l'attuazione di diversi angoli di anticipo, la coppia erogata. La curva di efficienza in funzione dell'angolo di accensione è invece unica per tutti i punti motore ma la possibilità di calcolarla con molti dati permette di approssimarla meglio.

		GIRIMOTORE																	
		1500	2000	2500	3000	3500	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000	6250	6500	6750	7000
CARICO	15																		
	20																		
	30																		
	40																		
	50																		
	70																		
	90																		
	110																		
	130																		
	150																		
	170																		
	190																		

Tabella 4 - Piano di prova di variazione dell'angolo di anticipo

I punti di misura sono 216, scelti al variare di carico e giri motore. In ciascun punto viene richiesta l'applicazione di vari anticipi; partendo dall'anticipo base (mappa calibrata dalla sala prove con i valori di anticipo più alti possibile senza incorrere in problemi di detonazione) si richiede l'attuazione di anticipi leggermente più grandi ($+3^\circ$, $+6^\circ$) e di anticipi più ritardati (-3° , -6° , -9° e così via).

Gli accorgimenti che bisogna rispettare in modo estremamente accurato sono due:

- il valore di lambda deve essere mantenuto uguale a 1,1 per tutte le prove, in quanto è il valore per cui la coppia prodotta è quella di riferimento e questo ci permette di non dover correggere ogni volta in funzione del lambda il valore di coppia letto;
- gli anticipi da applicare vanno da $+6$ gradi rispetto all'anticipo base fino ad angoli ritardati che garantiscano lo spegnimento del motore (cioè quando il motore non è più in grado di erogare coppia). In corrispondenza di anticipi molto alti bisogna però stare attenti a non incorrere in fenomeni di detonazione troppo violenti e continui; per angoli di accensione molto bassi invece bisogna monitorare la temperatura allo scarico, che non deve mai superare il limite massimo per la protezione dei componenti. Se per alcuni cicli ci si avvicinasse eccessivamente a questa soglia, prima di procedere con l'anticipo degradato successivo, bisognerebbe effettuare qualche ciclo di combustione all'anticipo base per raffreddare lo scarico.

4.2 Elaborazione dati

La fase di acquisizione dati in sala prove genera moltissime informazioni sul funzionamento del motore; questi test servono quindi non solo per la calibrazione ma anche per individuare eventuali anomalie hardware o software. Per l'elaborazione dei dati si fa affidamento a programmi scritti in linguaggio MATLAB; *tool* per la calibrazione sono già utilizzati dagli ingegneri di Ferrari, ma dato che il software di centralina da competizione è scritto in un linguaggio diverso rispetto a quello dei nuovi sistemi di controllo, è stato necessario modificare alcuni *script*.

I dati dei test possono essere registrati con diversi strumenti e salvati in diversi formati. Grazie ai sistemi di acquisizione disponibili in sala prove (nel nostro caso Tornado e INCA) le grandezze di interesse vengono campionate alla frequenza desiderata. I

valori misurati hanno diversi gradi di precisione a seconda dei valori minimi e massimi di quella determinata grandezza e della discretizzazione dell'intervallo. La discretizzazione è espressa in numero di bit: più questo numero è alto, più informazioni potranno essere registrate. Ad esempio, se un canale viene acquisito a 8 bit, l'intervallo tra il minimo e il massimo di quella grandezza sarà diviso in $\sum_{i=0}^7 2^i = 255$ punti: se la differenza tra i due estremi fosse per esempio 127, ogni valore potrebbe essere acquisito con una sensibilità massima di mezza unità.

Dato che le prove di calibrazione sono eseguite in stazionario, ciò che risulta importante dei dati acquisiti è il valore medio relativo ad ogni punto motore. A partire dai file contenenti i dati registrati dall'acquisitore del banco prove (Tornado), vengono creati dei file Excel in cui ogni riga rappresenta un punto motore diverso, mentre ogni colonna contiene le informazioni di un certo segnale. Questi documenti possono essere facilmente letti dagli script MATLAB grazie a funzioni per l'importazione dei fogli di calcolo (per esempio *xlsread*).

Parallelamente allo strumento del laboratorio, anche la centralina può contribuire alla registrazione dei dati. Grazie ad un software chiamato INCA (*INtegrated Calibration and Application tools*), ed a strumenti di interfacciamento particolari (moduli di registrazione), un computer può comunicare con la centralina per caricare un nuovo software, modificare le calibrazioni ed acquisire i segnali in tempo reale. I file vengono salvati in formato “.dat” e possono essere facilmente analizzati da un altro programma della famiglia ETAS, chiamato MDA (*Measure Data Analyzer*), che permette di visualizzare la variazione dei segnali nel tempo attraverso un oscilloscopio.

Quando si ricevono questi due tipi di file dalla sala prove bisogna innanzitutto verificare che i dati siano allineati fra loro, cioè che i valori medi di una riga del foglio Excel corrispondano alle misure effettuate dalla centralina in quel punto motore. Per svolgere questa analisi preliminare è stato utilizzato un *tool* già esistente e scritto sempre in linguaggio MATLAB che permette di confrontare le diverse sorgenti tra loro. Potrebbe capitare che un dato segnale non sia stabile durante una misura o che non venga aggiornato tra un'acquisizione e l'altra; in questo caso bisognerebbe rimuovere i dati di quel punto motore per non influenzare il processo di calibrazione.

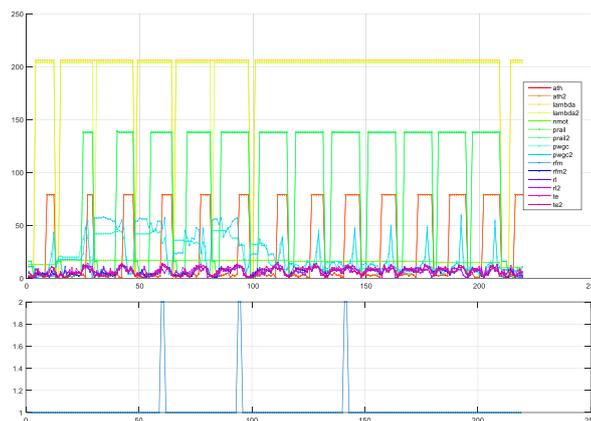


Figura 4.4 - Risultato dell'allineamento dei dati banco e dei dati INCA

Come prima cosa l'utente indica una serie di segnali che ritiene possano essere rappresentativi di un allineamento riuscito o fallito; le grandezze vengono scelte in base alla prova di calibrazione (ad esempio per la mappatura del modello polmone è necessario che il valore di lambda misurato sia accurato) ma solitamente si considerano anche quelle più importanti per il funzionamento del motore (apertura farfalla, giri motore, etc.). Lo script confronta, per ogni punto motore, il valore dei segnali medi del foglio Excel con il valore dello stesso segnale di tutte le acquisizioni di centralina. Viene disegnato quindi un grafico che indica in quanti file “.dat” è stato individuato quel determinato valore. Scegliendo come segnali di allineamento solo grandezze che rimangono costanti durante la misura (ad esempio lambda target), lo script non sarebbe in grado di determinare univocamente la memo INCA relativa a quel punto motore. Selezionando invece canali il cui valore cambia in continuazione (per la fisica del motore o perché richiesto dalla specifica di calibrazione) il sistema può individuare con precisione la corrispondenza tra le varie misure. Nella parte inferiore del grafico si vedono quindi quante memo corrispondono ai valori medi misurati dallo strumento di sala prove. Se un punto motore fosse associato a più di una misura di centralina (anche dopo aver eventualmente aumentato il numero di canali per l'allineamento) potrebbero esserci errori in una delle due misure.

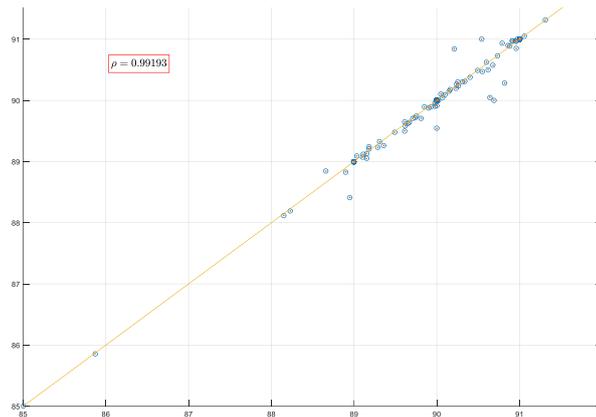


Figura 4.5 – Allineamento per un dato canale di acquisizione

4.2.1 Calibrazione del modello polmone

Dai dati della prima prova a banco si possono ottenere queste importanti calibrazioni:

- modello polmone: calcola il valore di massa d'aria aspirata relativa in funzione della velocità di rotazione e del valore di pressione del collettore di aspirazione;
- modello polmone inverso: viene calcolata invertendo il modello diretto e serve per calcolare il valore di carico in funzione del numero di giri e della pressione misurata nel polmone;
- modello farfalla: indica la portata d'aria che scorre attraverso la valvola a farfalla in funzione dell'angolo di apertura della stessa e del rapporto tra le pressioni valle/monte farfalla;
- modello farfalla inverso: permette di conoscere l'apertura della farfalla necessaria per ottenere una portata obiettivo in funzione del rapporto delle pressioni valle/monte farfalla.

Per calibrare la mappa di modello polmone si utilizza un semplice *script* che legge i valori di alcuni segnali dal foglio Excel relativi (lambda, pressione, velocità di rotazione, consumo di combustibile, temperatura) e in pochi calcoli genera la calibrazione richiesta. I passaggi sono i seguenti:

1. Per prima cosa viene indicato il documento dal quale leggere i dati del test; idealmente sarebbe opportuno fornire al programma di calcolo anche i file rappresentativi del software di controllo e delle vecchie calibrazioni di centralina, in modo tale che le dimensioni delle mappe vengano rispettate automaticamente. Questo non è sempre possibile in quanto alcune calibrazioni non sono presenti nel vecchio sistema di controllo;

2. Un'interfaccia permette di indicare i *breakpoint* delle mappe che si vogliono generare: si può decidere sia di mantenere quelli precedenti sia di inserirne di nuovi;
3. Vengono richiesti alcuni parametri necessari al calcolo del carico a partire dal consumo di combustibile e a correggerlo in base ai valori di pressione e temperatura. Ricordando la formula

$$carico = \frac{\dot{m}_{fuel} \cdot \lambda \cdot \alpha_{st}}{n_{mot} \cdot m_{aria,std}}$$

i valori da indicare sono il valore del rapporto stechiometrico della benzina utilizzata (13,56) e la cilindrata totale del motore (3,996051 dm³). Inoltre bisogna indicare la temperatura (50° C) e la pressione (1013 mbar) di riferimento per il calcolo dei fattori correttivi del carico

$$F_T = \sqrt{\frac{323,15}{(273,15 + T)}} \quad F_P = \frac{P}{1013}$$

con temperatura espressa in °C e pressione in mbar.

Il valore del carico viene corretto perché a pari pressione del polmone la quantità d'aria che entra nel cilindro risulta influenzata dalla densità dell'aria stessa, che a sua volta dipende appunto dalla temperatura e dalla pressione. Più la temperatura è alta, più la densità è bassa e la massa d'aria in camera è inferiore; più la pressione è alta invece, più la densità sarà grande e la massa d'aria maggiore;

4. A questo punto lo script è in grado di generare la mappa. Dopo aver stabilito il trend del carico nei punti di misura sperimentali, grazie ad alcune funzioni MATLAB per la calibrazione, la calibrazione viene estesa per estrapolazione nei breakpoint non coperti dalle prove a banco;
5. Come ultimo passaggio è possibile salvare la calibrazione in un foglio di lavoro Excel e successivamente invertire il modello grazie a una funzione, scritta sempre in linguaggio MATLAB, che permette di scegliere di eseguire l'inversione per righe o per colonne.

Nelle seguenti figure, i pallini blu rappresentano i dati sperimentali mentre i cerchi rossi sono i valori scritti nella mappa di centralina, ottenuti dall'interpolazione sulla superficie delle combinazioni dei breakpoint in x e in y.

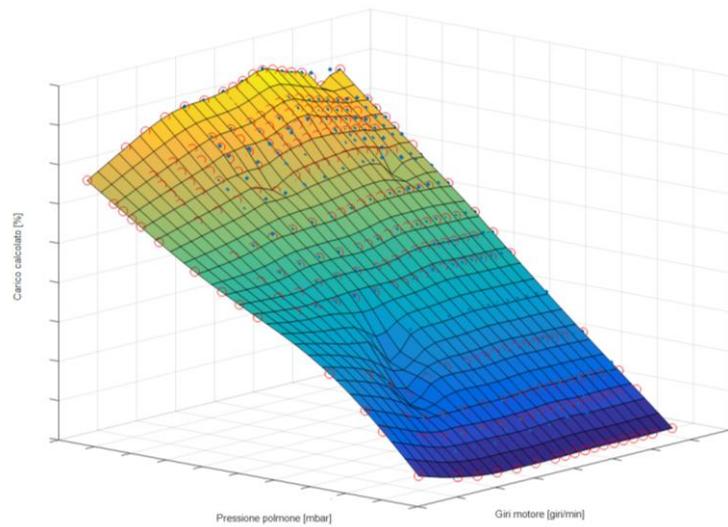


Figura 4.6 – Mappa del modello polmone con errori

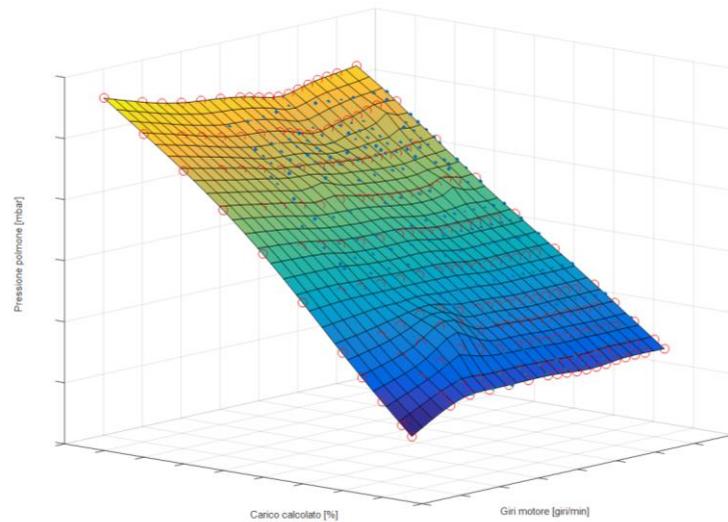


Figura 4.7 – Mappa del modello polmone inverso con errori

Se le misure sono state effettuate correttamente, la mappa così ottenuta sarà globalmente ben calibrata, ma potrebbe presentare delle imperfezioni sia in singoli punti che in aree più estese. Una zona che deve essere sicuramente analizzata è quella che si estende oltre i punti di misura sperimentali: per pressioni sotto i 200 mbar e sopra i 1900 mbar e per velocità di rotazione minori di 2500 giri/min e maggiori di 6000 giri/min non si hanno dati sperimentali e la mappa è stata estrapolata. Le possibilità di intervento sono due: si può decidere di lasciare la mappa così come è stata generata e poi correggerla in fase di verifica a banco oppure, soprattutto nel caso di errori più evidenti, si può confrontare il risultato ottenuto con calibrazioni precedenti

o addirittura di altri motori. Per il modello polmone si è pensato di correggere subito a mano i valori meno plausibili.

L'andamento globale visibile dal grafico tridimensionale del modello polmone rispetta il comportamento teorico atteso: con l'aumentare della pressione la massa d'aria relativa deve necessariamente crescere in modo lineare, mentre con l'aumentare della velocità di rotazione il carico è quasi costante ma mette in luce un picco in corrispondenza di 4500/5500 giri/min.

Nelle zone di estrapolazione l'efficienza volumetrica assume valori poco realistici e questo si può facilmente vedere perché la superficie tridimensionale si discosta dal piano che dovrebbe normalmente disegnare. Estrapolando linearmente i valori, partendo dagli ultimi 2/3 punti di misura disponibili, è stato possibile rendere omogeneo l'andamento del modello polmone, in attesa della verifica a banco.

L'altro problema particolarmente evidente è la presenza di “buchi” in alcune zone della superficie. Questo è dovuto ad errori nell'acquisizione: in alcuni punti di misura consecutivi il valore del consumo letto dalla bilancia gravimetrica risultava esattamente lo stesso, pur trattandosi di punti motore differenti. Ripetendo l'allineamento, aggiungendo come variabile indicativa anche il consumo di combustibile, è stato notato che i dati provenienti da Tornado e quelli di INCA non corrispondevano. Eliminando dal piano di prova questi punti motore e lanciando nuovamente lo script di calibrazione, il modello polmone è stato finalmente calibrato correttamente.

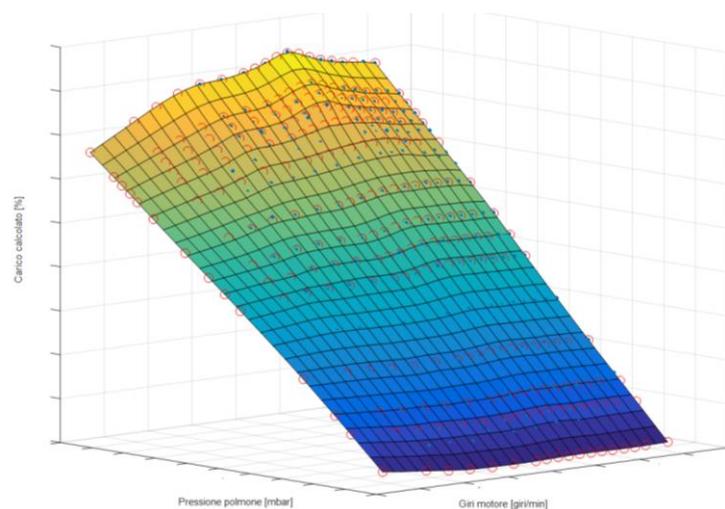


Figura 4.8 – Mappa del modello polmone corretta

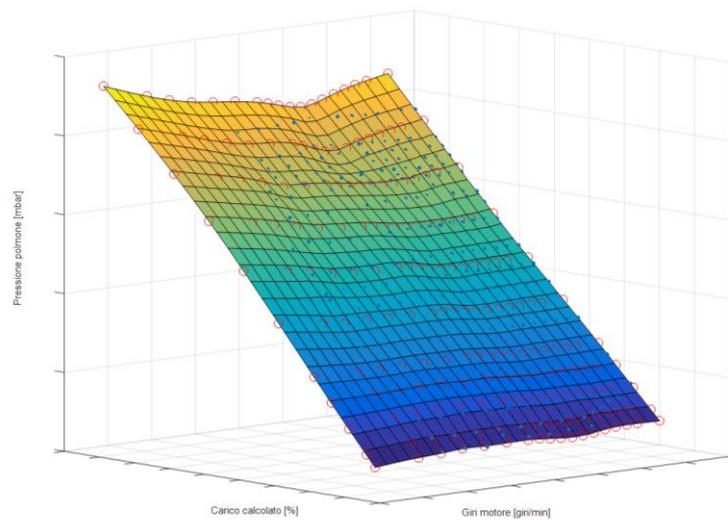


Figura 4.9 – Mappa del modello polmone inverso corretta

4.2.2 Verifica del modello polmone

Prima di procedere con le prove successive è necessario verificare l'effettiva precisione della mappa appena calibrata. Questo passaggio è fondamentale perché per i test successivi le mappe base devono essere ricalibrate: a pari pressione polmone e giri motore il valore di carico è ora diverso rispetto alla calibrazione precedente e le mappature che hanno come input questa grandezza non possono essere mantenute uguali.

Le prove di verifica del modello polmone prevedono semplicemente delle acquisizioni in cui sia possibile verificare la corrispondenza tra il valore di carico calcolato dalla centralina (output della mappa appena calibrata, in funzione di giri e pressione collettore di aspirazione) e quello calcolato dal consumo di combustibile.

I primi risultati della verifica hanno messo in evidenza una piccola differenza tra i due valori di carico ma un comportamento anomalo di un altro parametro, che solitamente viene utilizzato per valutare la bontà della calibrazione. Questo parametro è il risultato del controllo in retroazione sul valore di lambda e serve a chiudere la catena di calcolo della funzione di iniezione. Se il riempimento dei cilindri è diverso da quello ipotizzato dal modello polmone, il valore di combustibile determinato dalla funzione dell'iniezione non garantirà il rapporto aria/combustibile desiderato e il controllo in retroazione interverrà per correggere la quantità di benzina.

Ai bassi carichi si è notato che questo fattore di correzione, che in condizioni di funzionamento corretto è pari a 1, assumeva valori fino a 0,8, facendo ipotizzare che il modello polmone sovrastimava il carico effettivo e quindi il combustibile calcolato era troppo rispetto all'aria realmente aspirata.

Inizialmente la causa di questo problema è stata individuata in due aspetti:

- errori di estrapolazione: sotto ai 250/300 mbar infatti le misure non erano state sempre effettuate per problemi di invasamento motore e quindi molti dati erano stati estrapolati dallo script di calibrazione. Si è ipotizzato che nonostante le correzioni manuali i valori mappati potessero essere ancora errati;
- problemi di instabilità di iniezione: per carichi molto bassi le quantità di combustibile da iniettare risultano molto piccole, fattore che può causare due incertezze nella misura. La prima è dovuta alla sensibilità della bilancia gravimetrica della sala prove; la seconda dipende dalla pressione di iniezione, che se fosse troppo alta comporterebbe tempi di iniezione molto piccoli e spingerebbe l'iniettore a lavorare con aperture irregolari.

Dopo un'analisi più accurata dei dati e delle funzioni di controllo dell'iniezione, si è capito che la causa del problema non andava cercata in un errore di calibrazione della mappa polmone ma nel valore del tempo di iniezione. Nella catena di calcolo di questa grandezza è infatti presente un offset in funzione della pressione del rail calibrato con un valore costante di 0,3 ms, utile probabilmente per uscire dal campo balistico di apertura dello spillo.

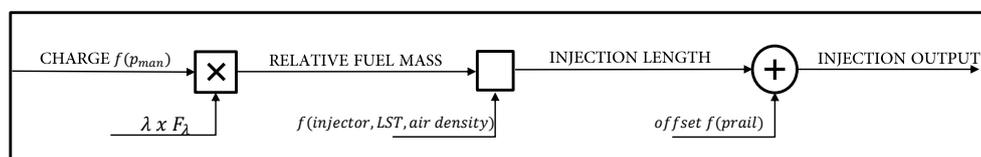


Figura 4.10 - Catena di calcolo del tempo di iniezione

Questo causa però un grosso sbilanciamento ai bassi carichi, dove i tempi di iniezione calcolati in funzione della massa da iniettare e dalle caratteristiche dell'iniettore e del rail sono dell'ordine di 0,7 ms; aggiungere l'offset individuato significa aumentare del 50% i tempi di iniezione e quindi avere una massa eccessiva di combustibile in camera. Per questo il sistema interveniva andando a ridurre la quantità di benzina da iniettare.

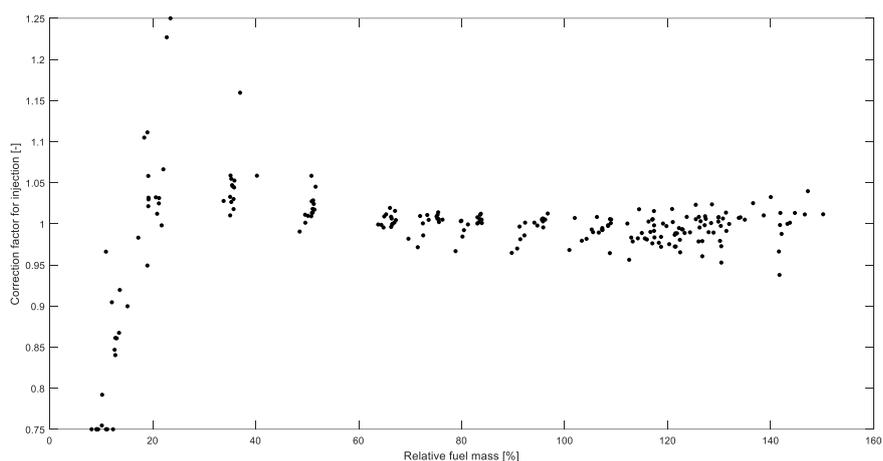


Figura 4.11 – Fattore di correzione dell'iniezione con l'offset nel tempo dell'iniezione

Per risolvere il problema sono state effettuate alcune prove in cui veniva modificato manualmente l'offset del tempo di iniezione in modo da avere sempre il fattore moltiplicativo della retroazione lambda pari a 1. In questa situazione è stato possibile ottenere un vettore di correzione che permettesse di avere sempre il controllo in retroazione quasi disattivato. In realtà alla fine è stato deciso di annullare completamente il vettore di correzione in funzione della pressione del rail perché si è ritenuto sufficientemente corretto il calcolo del tempo di iniezione; si è accettata così una polarizzazione del fattore correttivo.

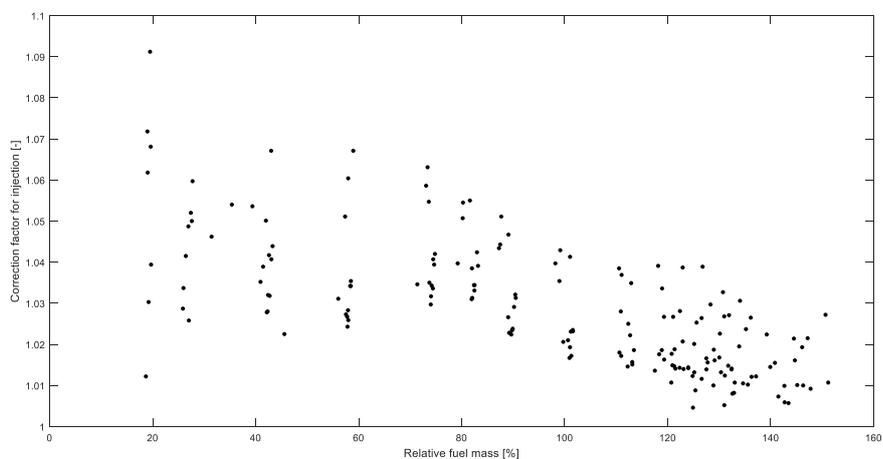


Figura 4.12 – Fattore di correzione dell'iniezione senza l'offset nel tempo dell'iniezione

4.2.3 Calibrazione del modello farfalla

Il modello farfalla (in particolare il modello inverso) serve al sistema di controllo per determinare l'attuazione necessaria a garantire il passaggio della quantità di aria che permetta al motore di soddisfare la richiesta di coppia calcolata dalla struttura di coppia. Per evitare di inserire nel software un modello computazionale troppo pesante, lo schema fisico viene ridotto a una mappa che calcola il valore di portata d'aria attraverso la valvola in funzione dell'angolo di apertura e del rapporto di pressione tra valle e monte farfalla.

La calibrazione è stata effettuata in questo caso con gli stessi dati utilizzati per la calibrazione del modello polmone, perché questo ha permesso di risparmiare tempo a banco e perché teoricamente i dati così ottenuti avrebbero dovuto coprire molti punti della mappatura. In realtà il posizionamento nei vari punti motore indicati nel piano di prova è stato effettuato con combinazioni di farfalla e *waste-gate* tali da non garantire la maggior parte dei breakpoint di rapporto di pressione valle/monte farfalla. Questo implica che molti dei valori che verranno inseriti nella mappa saranno il risultato di estrapolazione.

Un altro problema è rappresentato dal fatto che lo script di calibrazione divide i vari punti motore per gruppi caratterizzati da un angolo di apertura farfalla simile; può capitare però che alcuni punti siano circa a metà tra due breakpoint. In qualunque raggruppamento capitino andranno a contaminare il valore di mappa, che viene calcolato dalla media di tutti i punti motore che ricadono in quell'insieme. Per questo la calibrazione richiederà probabilmente una correzione consistente in fase di verifica. Il *tool* di calcolo scritto in linguaggio MATLAB deriva dalla versione utilizzata dagli ingegneri di Ferrari e consiste in questi passaggi:

1. Innanzitutto viene fornito al programma il file contenente i dati di banco in formato Excel. Come nel caso della calibrazione del modello polmone, la cosa migliore sarebbe quella di indicare le mappe della precedente versione del software di centralina, in questo caso non solo per evitare di dover inserire a mano la dimensione che devono avere le calibrazioni ma anche perché alcune delle calibrazioni già presenti non devono essere cambiate e servono in alcuni passaggi del calcolo;

- Bisogna ora individuare i canali di misura necessari alla determinazione della mappatura: in particolare servono i giri motore, la pressione del collettore, la pressione monte farfalla, l'apertura della farfalla, la portata in massa di aria (calcolata a partire dal consumo di combustibile) e la temperatura del polmone;

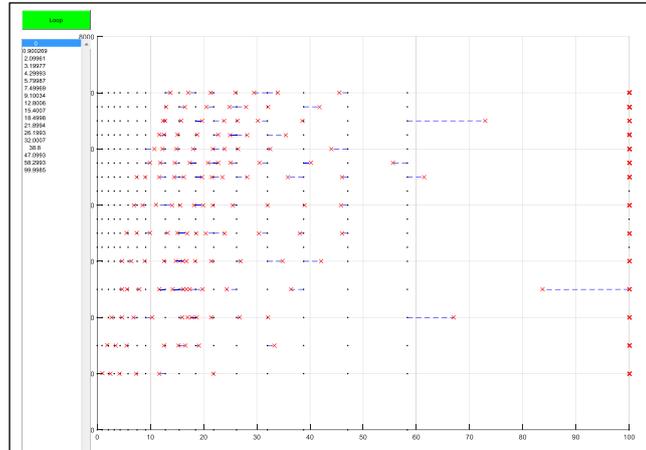


Figura 4.13 – Punti di misura (X rossa) assegnati al breakpoint più vicino (-- blu)

- Il software esegue la calibrazione calcolando, per ogni breakpoint di apertura farfalla e rapporto di pressione valle/monte farfalla, il valore di portata in massa d'aria medio tra i punti di misura che ricadono in quel raggruppamento. Per ogni acquisizione la portata in massa è calcolata a partire dal consumo di combustibile e corretta con fattori di temperatura e pressione. Nelle seguenti immagini è possibile vedere i punti di misura (indicati con una croce blu), i corrispondenti valori di portata sonora corretti (puntino) e il valore medio associato a un gruppo di valori di rapporto di pressione;

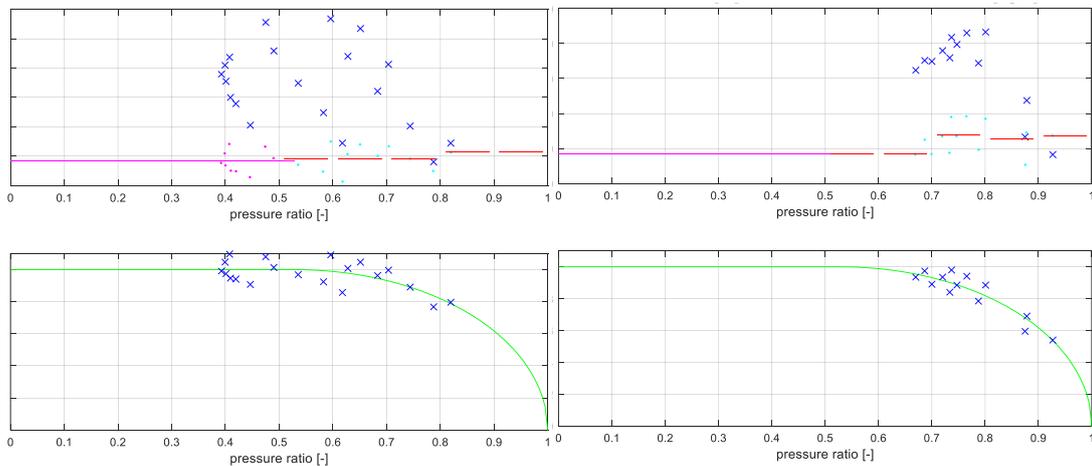


Figura 4.14 - Passaggio del *tool* di calibrazione del modello farfalla

- Una volta completati i vari *breakpoint*, il software estrapola l'andamento della mappa nei punti dove non è stato possibile calcolare la portata d'aria per mancanza di dati.

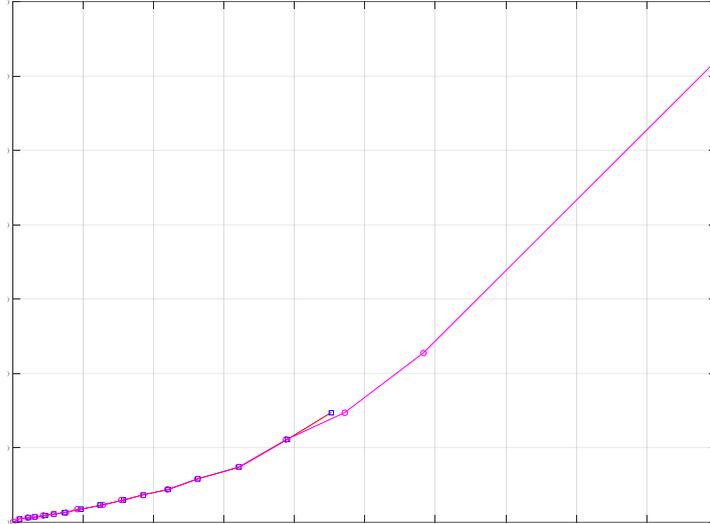


Figura 4.15 - Andamento reale (quadrati blu) e estrapolazione (rosa)

Nel sistema di controllo in coppia è necessario invertire la mappa farfalla perché la variabile che deve essere calcolata non è la portata d'aria, il cui target è noto, ma l'apertura della valvola per garantire tale portata. Tramite lo script di inversione si ottiene quindi il modello farfalla inverso.

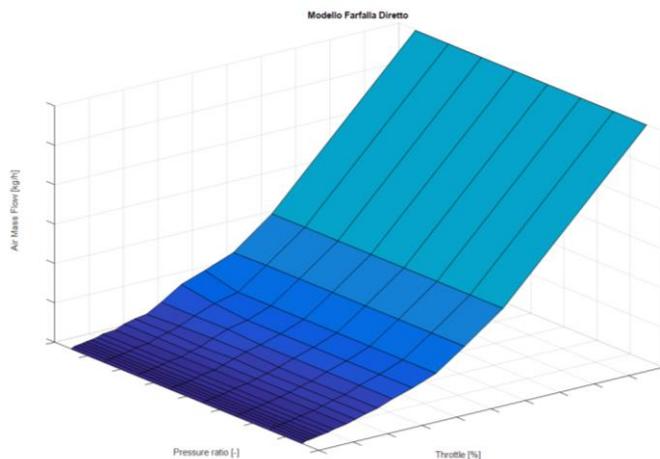


Figura 4.16 – Mappa del modello farfalla

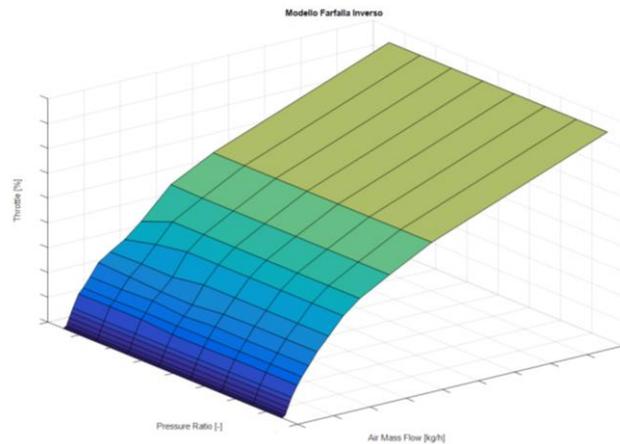


Figura 4.17 – Mappa del modello inverso di farfalla

4.2.4 Calibrazione delle coppie perse

La fase di studio delle coppie perse dal motore è necessaria per poter individuare la corretta quantità di coppia che il motore deve erogare per soddisfare la richiesta del pilota. Inoltre grazie ai numerosi dati a disposizione è stato possibile effettuare alcune considerazioni per valutare le differenze tra le mappe che possono essere ottenute tramite le varie modalità di calibrazione.

Come già introdotto durante la spiegazione delle specifiche di calibrazione, il metodo del *cut-off* è molto preciso perché permette di misurare esattamente la coppia necessaria al trascinarsi del motore, ma presenta un limite: può essere applicato solo in regime di motore aspirato. Per individuare l'andamento della calibrazione ai carichi più alti si può procedere allora in due modi. Il primo consiste nell'estrapolare per tutti i breakpoint richiesti la superficie ottenuta dai dati sperimentali di *cut-off* ai carichi realizzabili in aspirato. Il secondo invece si basa sui dati ottenibili grazie al sensore di pressione in camera (pmi, pme, etc.), che sono disponibili per tutti i punti del piano di prova.

I valori di coppie perse ottenuti con il segnale di pressione in camera sono più piccoli rispetto ai dati ottenuti dalle prove in *cut-off*. I motivi di questa differenza non sono del tutto chiari ma si pensa che le cause possibili siano legate al cambiamento delle condizioni al contorno dopo lo spegnimento del motore. L'effetto maggiore è l'aumento del lavoro di pompaggio, che si può apprezzare dal diagramma di indicatore, dovuto al fatto che in scarico i gas vengano in un certo modo compressi e l'area di pompaggio assuma una forma di tipo triangolare. Agli alti carichi invece si ha l'effetto

opposto: con lo spegnimento dei cilindri la turbina viene rallentata, le contropressioni allo scarico diminuiscono e le coppie perse valutate in *cut-off* risultano minori rispetto a quelle calcolate dai dati di pmi e pme.

Non è ancora stato dimostrato quale delle due prove risulti più rappresentativa della realtà; teoricamente si potrebbe pensare che i valori dai dati di combustione siano più precisi, ma attualmente in Ferrari vengono utilizzati i numeri letti al freno perché questo permette di stimare esattamente le coppie perse quando il motore viene portato in *cut-off*. A motore acceso, anche se i valori di coppie perse sono leggermente sbagliati (20-30 Nm), questo non causa nessun problema perché l'errore viene annegato nella mappa di coppia massima, in modo che la coppia netta erogata sia sempre corretta.

Quello che può essere fatto è individuare un offset nei punti in aspirato tra le due modalità di calibrazione ed estendere questo andamento nei punti sovralimentati, così si partirebbe da una superficie sperimentale (data dalla mappa dei dati di pmi e pme) che verrebbe traslata per rispettare un possibile andamento dei dati a motore trascinato. Lo script che permette di elaborare automaticamente i dati presenti nei file Excel sfrutta lo stesso principio utilizzato per la calibrazione del modello polmone; allo script sono state aggiunte righe di codice che permettano di eseguire automaticamente la calibrazione dei dati di *cut-off*, dei dati *indicating* e di calcolare la differenza tra le due calibrazioni. Nelle seguenti figure, i pallini blu rappresentano i dati sperimentali mentre i cerchietti rossi sono i valori scritti nella mappa di centralina, ottenuti dall'interpolazione sulla superficie delle combinazioni dei breakpoint in x e in y.

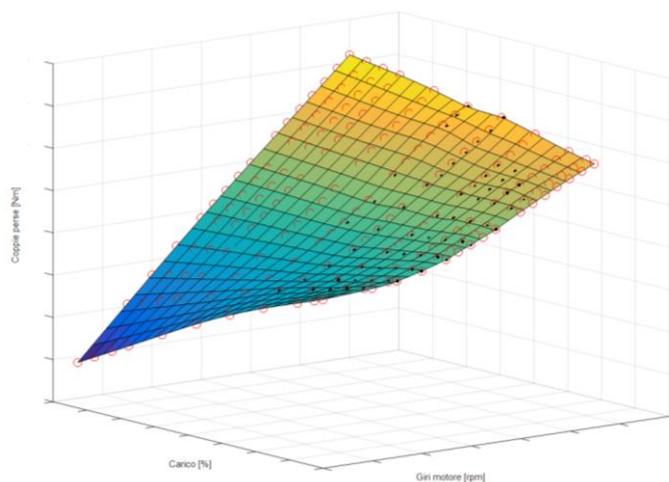


Figura 4.18 - Coppie perse a motore spento (*cut-off*)

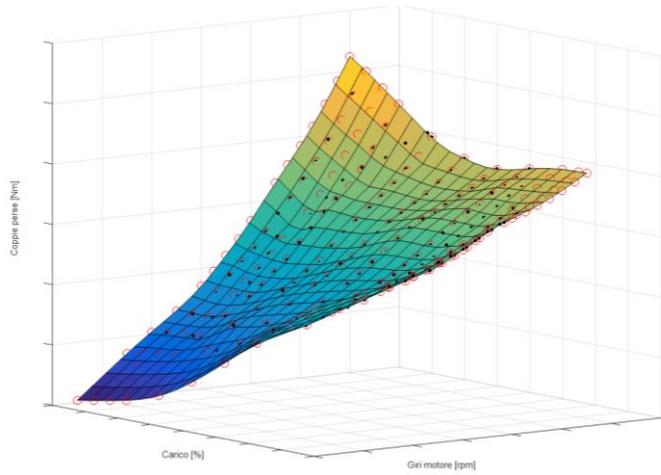


Figura 4.19 - Coppie perse a motore acceso (dati *indicating*)

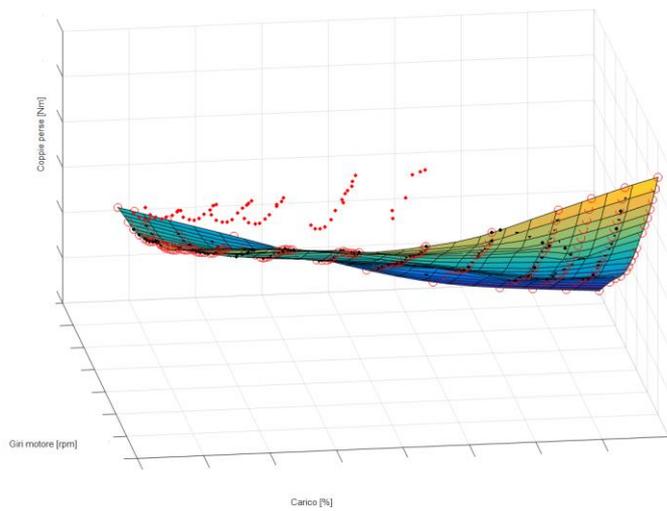


Figura 4.20 - Coppie perse a motore acceso (superficie) e punti di misura in *cut-off* (in rosso)

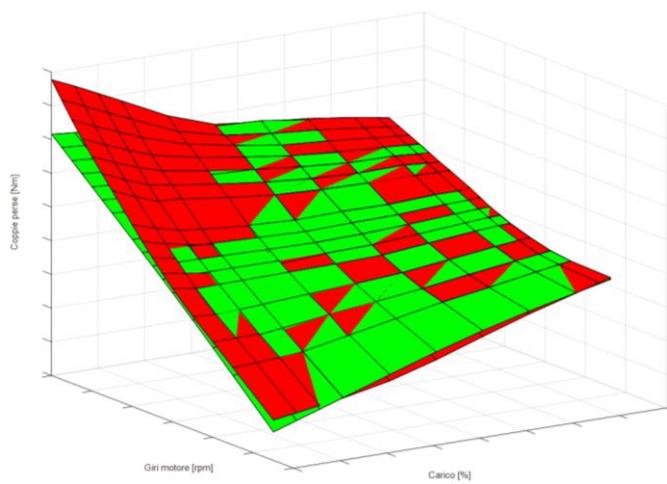


Figura 4.21 - Mappa di *cut-off* (verde) e mappa a motore acceso traslata (rossa)

4.2.5 Calibrazione delle mappe in funzione del lambda

Le prove di variazione del lambda vengono utilizzate per calibrare la mappa di variazione di coppia in funzione di lambda e la mappa di variazione di anticipo ottimo in funzione di lambda.

Per 9 punti motore, determinati da una coppia (giri, carico), è stata richiesta l'applicazione di 5 valori del rapporto aria/combustibile (0,85, 0,9, 1,0, 1,1, 1,15). Per ogni elemento del vettore devono essere testati diversi angoli di anticipo di accensione, partendo da quello base, anticipando ulteriormente di 3 e 6 gradi e infine degradando anticipo fino allo spegnimento del motore (o al raggiungimento di una condizione critica come indicato in specifica).

Grazie al *tool* Ferrari è possibile effettuare la calibrazione in modo automatico; in questo caso è essenziale fornire al calcolatore alcune delle mappe già calibrate (ad esempio quella delle coppie perse) perché serviranno durante la procedura di calcolo. Lo script, leggendo i dati di anticipo attuato, di coppia, di lambda e di anticipo base per ogni punto motore, individua l'angolo di anticipo ottimo e calcola quanto variano l'angolo di anticipo ottimo e l'efficienza (cioè il rapporto tra la coppia massima al lambda di riferimento e la coppia massima al lambda corrente) a diversi valori del rapporto aria/combustibile.

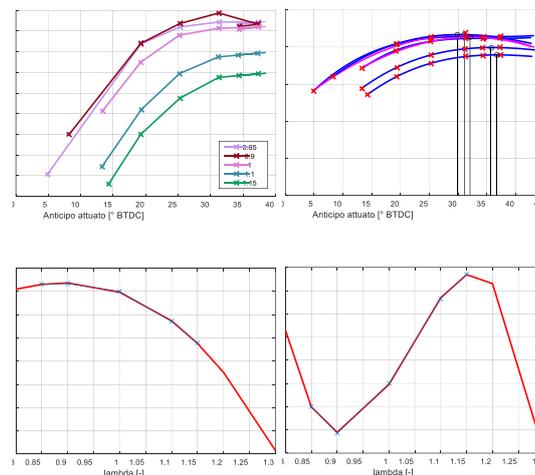


Figura 4.22 – Passaggio del *tool* di calibrazione delle mappe in funzione di lambda

Quello che ci si aspetta è che per valori di lambda di 0,9 l'angolo di anticipo ottimo sia minore rispetto a quello calibrato a lambda 1,1, perché per miscele ricche la velocità di combustione è maggiore e, per mantenere l'angolo MFB₅₀ centrato attorno a valori

di $8^{\circ}/12^{\circ}$ dopo il punto morto superiore, la combustione deve partire qualche istante dopo. Continuando ad ingrassare la miscela, la velocità di combustione viene rallentata nuovamente ma risulta comunque maggiore rispetto a quella di miscele magre. Il valore di anticipo deve essere invece aumentato per miscele magre, la cui velocità di combustione è minore rispetto a quella a λ 1,1.

La coppia erogata risulta invece massima per valori di miscela leggermente ricca, poiché a causa delle alte temperature dovute alla combustione che avviene in condizioni stechiometriche, sono presenti molecole di ossigeno dovute alla dissociazione dei prodotti di combustione e risulta quindi possibile bruciare più combustibile rispetto alla quantità stabilita dalla reazione chimica di combustione.

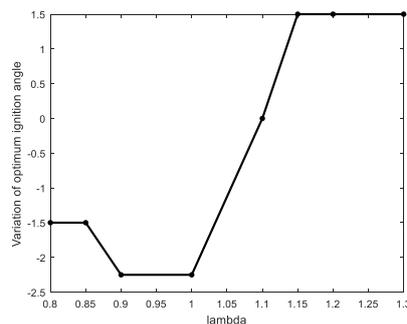


Figura 4.23 – Variazione di anticipo ottimo in funzione del lambda

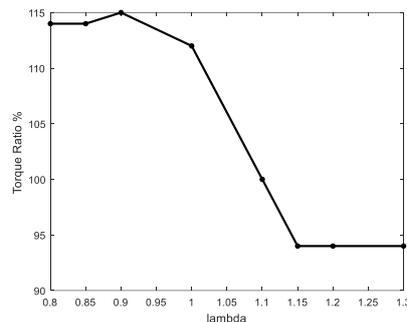


Figura 4.24 – Coefficiente di produzione della coppia in funzione del lambda

4.2.6 Calibrazione delle mappe dalle prove di variazione di anticipo

L'ultima serie di dati raccolti dalla sala prove consiste in variazioni di anticipo di accensione nel maggior numero di punti motore possibile. La combustione presenta efficienza massima in corrispondenza di un preciso valore di angolo di accensione, situato prima del punto morto superiore e tale per cui l'angolo MFB_{50} , che individua

il punto in cui la metà del combustibile iniettato è stato bruciato, si trova tra gli 8 e i 12 gradi dopo il punto morto superiore.

Le “spazzolate” di anticipo permettono di calibrare numerose mappe:

- Mappa di variazione di efficienza in funzione di una variazione di anticipo: è la curva che rappresenta la variazione di coppia erogata (a pari aria aspirata e combustibile iniettato) causata dalla variazione di anticipo di accensione;
- Mappa di variazione di angolo di anticipo in funzione di una variazione di efficienza: è l'inversa della mappa precedente ed è necessaria nel controllo in coppia in cui il sistema calcola un degrado di anticipo da applicare per soddisfare la richiesta di coppia del pilota garantendo la riserva di coppia;
- Mappa di anticipo ottimo: tabella che contiene l'angolo di anticipo ottimo di ogni punto motore. Spesso questo valore è ottenuto per estrapolazione della curva di efficienza di un dato punto motore, perché l'aumento dell'anticipo rispetto all'anticipo base può causare detonazione, condizione che si vuole evitare in sala prove;
- Mappa di coppia massima: valori di coppia massima (ottenuta attuando l'anticipo ottimo) per ogni punto motore. Da questa, moltiplicando il valore di un dato punto motore con l'efficienza che si ottiene attuando l'anticipo base, si ottiene la coppia base;
- Mappa di carico in funzione della coppia: è l'inversa della mappa di coppia massima e serve per il passaggio dalla struttura di coppia alle funzioni relative ai modelli di aspirazione, dato che permette di conoscere il valore di carico target per il soddisfacimento di una certa coppia;
- Mappa di anticipo minimo: è la calibrazione che contiene i valori di angolo di accensione più piccoli (cioè vicini o oltre il punto morto superiore) oltre ai quali le temperature allo scarico sarebbero troppo alte o il motore non riuscirebbe a rimanere acceso.

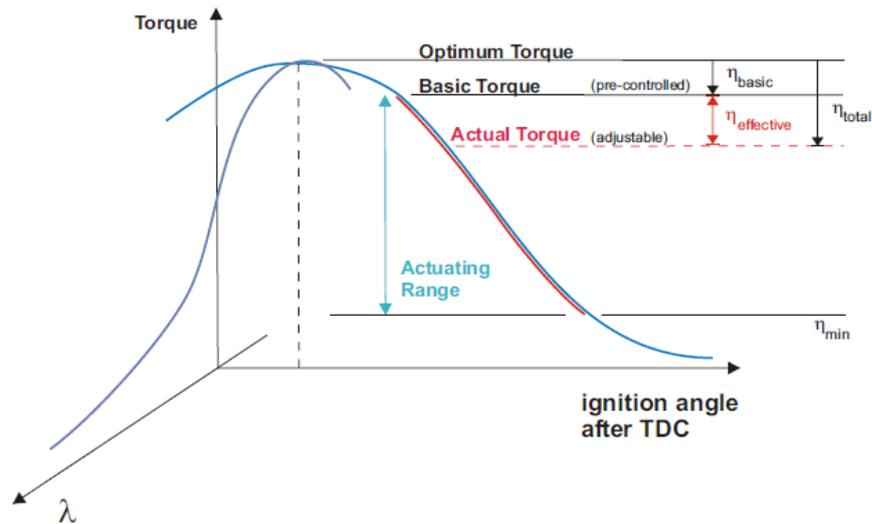


Figura 4.25 – Effetto del lambda e dell'anticipo sull'efficienza di combustione

L'elaborazione dei dati della prova di spazzolata di anticipo richiede uno sforzo computazionale particolarmente alto. Il *tool* che permette l'individuazione degli angoli di anticipo ottimo è di tipo iterativo e deve essere monitorato durante alcuni passaggi del calcolo. Il processo richiede circa 2 ore, al termine delle quali solitamente è necessario analizzare i risultati del calcolo, intervenire su alcuni punti di misura e rilanciare il software di calibrazione. L'obiettivo del programma è quello di individuare l'unica curva di efficienza in funzione dell'anticipo che verrà inserita in centralina e sarà utilizzata per tutti i punti motore. Per questo è essenziale che tale calibrazione approssimi correttamente il maggior numero possibile delle curve ottenute alle varie coppie (giri motore, carico) ed è per tale motivo che il *tool* esegue più iterazioni di calcolo.

Il programma esegue i seguenti passaggi:

1. Come per gli altri script, il primo passaggio consiste nella lettura delle acquisizioni di sala prove, delle calibrazioni già effettuate o non modificate e di alcune caratteristiche del sistema di controllo, come ad esempio il numero di centraline adibite al controllo del motore. Inoltre è necessario indicare i canali di misura di determinate grandezze, in questo caso della coppia letta al freno, dell'anticipo base, dell'anticipo attuato, della temperatura motore, del lambda, dei giri motore e del carico;
2. A questo punto è possibile lanciare la funzione per la calibrazione della mappa di anticipo ottimo e della curva di efficienza. Il primo risultato è un'immagine

nella quale sono raffigurati un primo abbozzo di curva di efficienza in funzione del delta anticipo e i vari punti di misura reali per cui ancora la curva non risulta valida. Per proseguire è necessario indicare il valore di efficienza del punto a efficienza minore tra quelli misurati, stabilire di quanto la curva di ogni punto motore possa essere tralata per provare a rappresentare la curva di efficienza di n-esimo tentativo e infine lanciare il processo iterativo di calcolo.

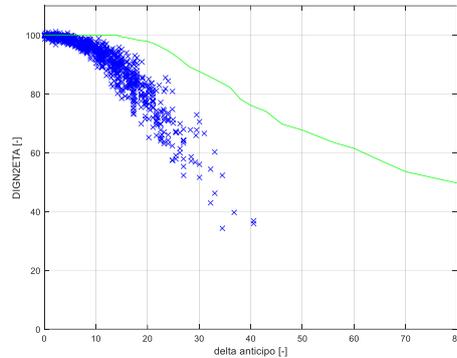


Figura 4.26 – Curva di efficienza di primo tentativo

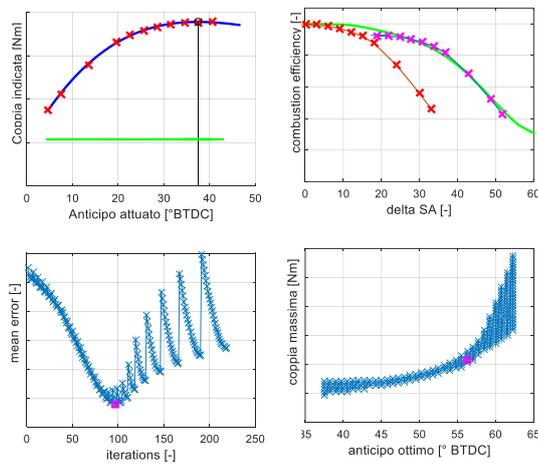


Figura 4.27 – Esempio di calcolo iterativo per la determinazione dell'anticipo ottimo

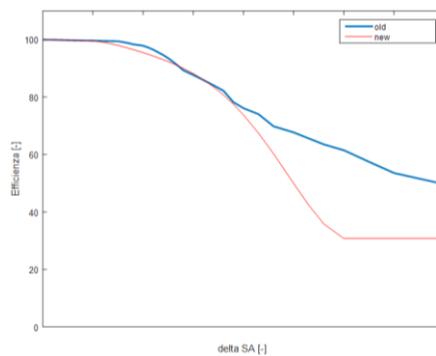


Figura 4.28 – Tentativi di calibrazione della curva di efficienza in funzione dell'anticipo

- Il punto 2 viene ripetuto finché la curva unica non rappresenta efficacemente il numero più alto possibile dei punti motore. Le mappe ottenute fino a questo momento sono la curva di efficienza, la mappa di anticipo ottimo e la mappa di coppia massima; nessuna di queste tre calibrazioni è però ancora completa. La mappa di efficienza in funzione della variazione di anticipo è infatti veritiera fino a valori di delta anticipo attorno ai 50° , perché dopo questo valore nessuna prova è stata eseguita per problemi di temperatura allo scarico. Con le funzioni di estrapolazione di Excel risulta immediato estendere i valori di efficienza fino a variazioni di angolo di anticipo di 70 gradi. Le altre due calibrazioni sono incomplete o contengono valori non plausibili a causa di imprecisioni nella estrapolazione. Anche queste mappe possono essere corrette punto per punto conoscendo gli andamenti generali delle variabili di interesse e analizzando singolarmente i dati della prova.

Una volta terminato il processo iterativo e dopo aver corretto manualmente le calibrazioni, è possibile determinare le inverse delle mappe appena ottenute e le mappe di anticipo minimo.

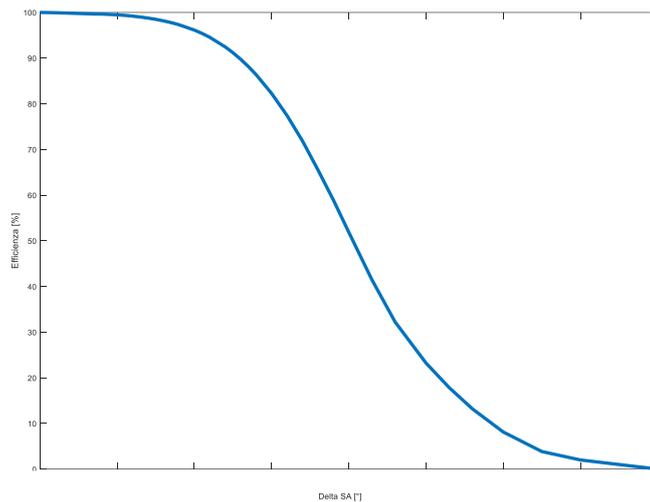


Figura 4.29 – Curva di efficienza in funzione della variazione di anticipo

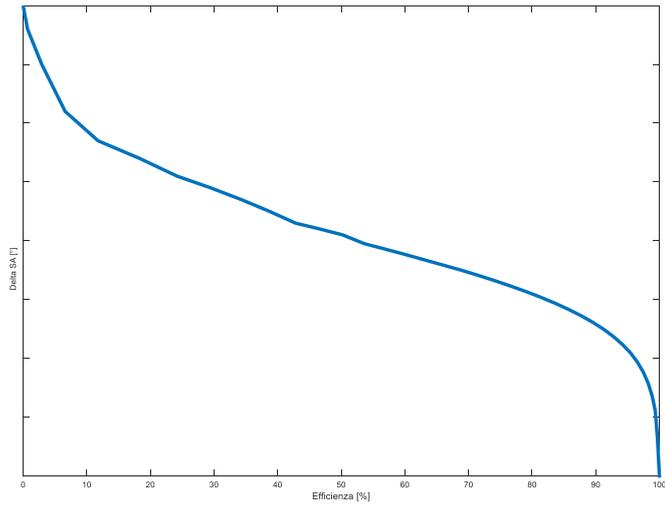


Figura 4.30 – Curva di variazione di anticipo in funzione dell'efficienza

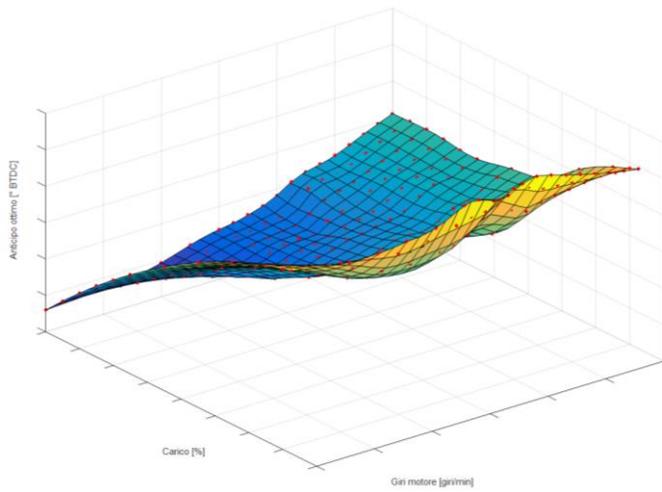


Figura 4.31 – Mappa di anticipo ottimo

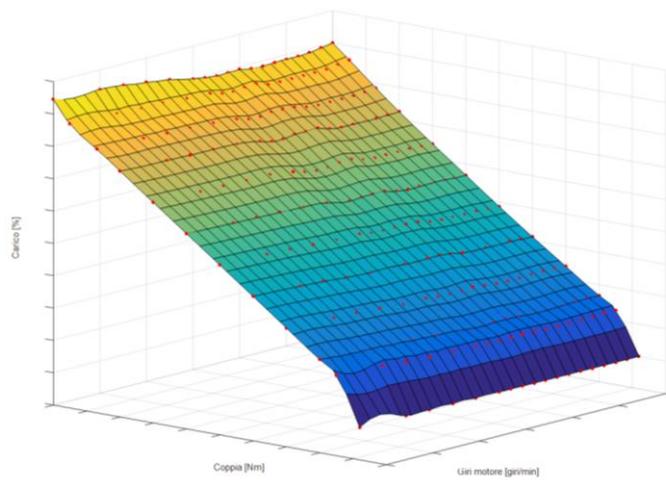


Figura 4.32 – Modello di coppia in funzione del carico

Nei sistemi di controllo solitamente vengono calibrate due diverse mappe di anticipo minimo. In un caso vengono inseriti i valori di anticipo attuando i quali il motore viene sottoposto a temperature limite allo scarico; questi anticipi, che sono stati testati sul motore a banco, possono essere attuati per un tempo virtualmente infinito senza incorrere in problemi. L'altra mappa invece contiene gli angoli di accensione per cui la curva di efficienza in quel punto motore si discosta dalla curva che è stata mappata in centralina. Con valori di anticipo più piccoli la combustione non sarebbe più stabile e il motore potrebbe spegnersi. Questi valori di anticipo causano combustioni a temperature ancora più alte e non garantiscono la salvaguardia dei pezzi meccanici presenti lungo la linea di scarico. Possono essere attuati per incrementare la riserva di coppia solo per pochi secondi, trascorsi i quali il motore deve riportarsi all'anticipo di sicurezza.

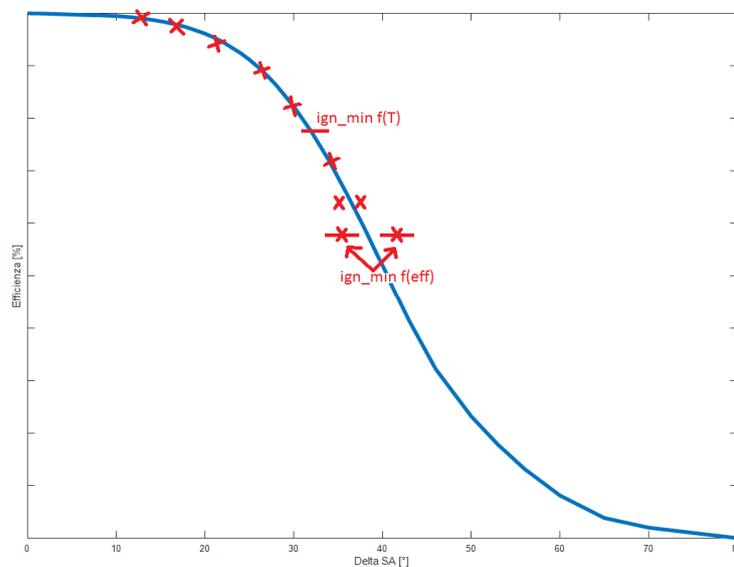


Figura 4.33 – Criteri di scelta dell'anticipo minimo

Nel caso del motore da competizione esiste una sola mappa di anticipo minimo: bisogna quindi stabilire con quale criterio calibrarla. Il *tool* di calibrazione Ferrari permette la determinazione del valore di anticipo minimo per cui o l'efficienza sperimentale si discosta dalla curva di efficienza oppure, in mancanza di questo dato, viene preso l'angolo di accensione per cui l'efficienza teorica (data dalla curva) sarebbe sotto a dei valori di riferimento (diversi a seconda del regime di rotazione). I passaggi del calcolo sono i seguenti:

1. Dopo aver caricato i dati della prova di variazione di anticipo e le calibrazioni aggiornate (comprese quelle di coppia massima e anticipo ottimo), come prima cosa bisogna indicare i valori di efficienza in corrispondenza dei quali individuare gli anticipi minimi;
2. Controllando che i punti motore siano stati assegnati ai breakpoint più vicini (come nelle operazioni di calibrazione già effettuate), è possibile lanciare il programma di calcolo che ha lo scopo di disegnare sulla curva di efficienza i punti (angolo di accensione, coppia normalizzata) per ogni punto motore del piano di prova. Questo può servire anche come verifica delle calibrazioni di coppia massima e anticipo ottimo, perché le coppie sperimentali vengono normalizzate rispetto al valore di mappa ed eventuali valori errati causerebbero una evidente differenza grafica tra la curva di efficienza calibrata e quella identificata dai punti sperimentali;
3. Gli anticipi minimi vengono così individuati dallo script e scritti in un foglio Excel. Per stabilire la mappa definitiva bisogna controllare che le immagini generate siano tutte plausibili ed eventualmente eliminare dalla mappa quei punti con immagini palesemente sbagliate. Infine è possibile riempire i buchi della tabella con i codici di estrapolazione, stando attenti che i valori finali siano coerenti con i dati sperimentali.

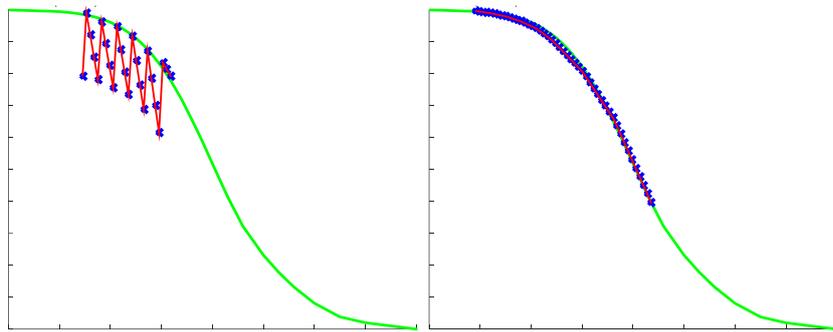


Figura 4.34 – Esempio di punto motore da eliminare (sinistra) e valido (destra)

Un'altra possibilità è quella di prendere i dati di sala prove e individuare gli angoli di accensione per cui le temperature allo scarico (uscita teste o ingresso turbina) risultano superiori o al limite delle temperature massime sopportabili dai componenti meccanici.

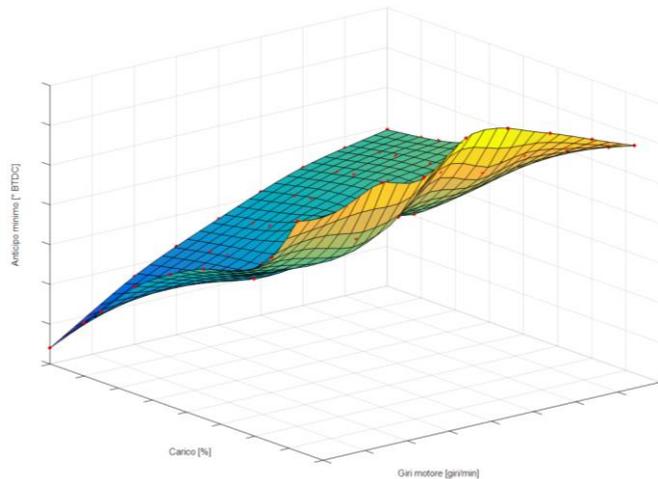


Figura 4.35 – Mappa di anticipo minimo

Confrontando questi anticipi con quelli generati dal *tool* di calibrazione, emergono differenze anche sostanziali (fino a 20 gradi di differenza). Questo non deve allarmare, perché al banco motore le prove spesso vengono effettuate con l'obiettivo fisso di non rompere il motore; i valori della mappa di anticipo minimo per garantire una certa efficienza sono valori estrapolati, che in sala prove difficilmente vengono testati. Una buona strategia potrebbe essere quella di verificare a banco i dati ottenuti attraverso il codice MATLAB, per analizzare le temperature raggiunte allo scarico e decidere se sia possibile o no attuare quei valori di anticipo in vettura.

4.3 Interfaccia di calibrazione

Durante la fase di calibrazione del sistema di controllo è stato utilizzato il *tool* scritto in linguaggio MATLAB dagli ingegneri di Ferrari per poter rendere ripetibile ed automatizzabile il calcolo delle varie tabelle. A causa dell'incompatibilità tra l'architettura dei software di riferimento per il *tool* e quella della Ferrari da competizione, è stato spesso necessario mettere mano ai vari codici per aggiornare i nomi delle variabili e delle calibrazioni, rimuovere piccoli errori di lettura dei file dei dati di acquisizione e in generale semplificare l'utilizzo dell'interfaccia grafica. Per raccogliere le funzioni utilizzate e renderle usufruibili anche in futuro, nel caso fosse necessario ripetere alcune calibrazioni, è stato deciso di creare una semplice interfaccia grafica MATLAB che permetta di importare i dati di una misura da un foglio Excel, disegnare grafici bidimensionali e tridimensionali utilizzando come variabili qualsiasi

segnale presente nell'acquisizione e lanciare una delle procedure di calibrazione tra quelle utilizzate nel corso di questo progetto. L'interfaccia è stata progettata con l'aiuto di GUIDE, una funzionalità del programma MATLAB che permette di aggiungere pulsanti, menu a tendina, barre di avanzamento alla propria interfaccia senza la necessità di dover scrivere a mano tutto il codice informatico necessario.

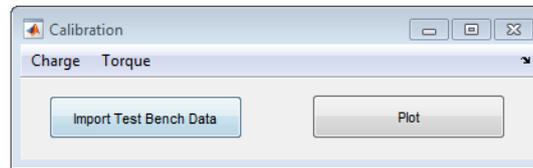


Figura 4.36 – Vista principale dell'interfaccia di calibrazione

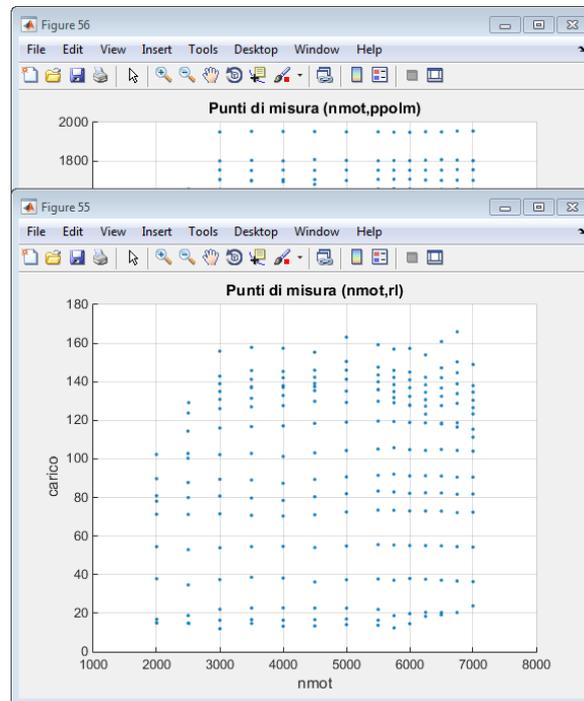


Figura 4.37 – Visualizzazione dei punti motore toccati nella prova selezionata

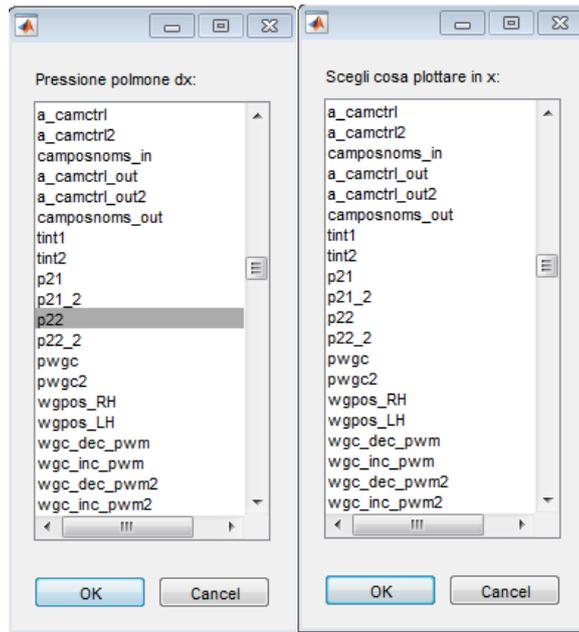


Figura 4.38 – Possibilità di scelta delle variabili per la calibrazione (sinistra) e la visualizzazione di grafici (destra)

Capitolo 5. Verifica e ultimazione delle calibrazioni

Terminate le calibrazioni a banco diventa finalmente possibile testare il funzionamento del sistema di controllo in coppia. Inizialmente questo viene fatto in sala prove, dove è possibile monitorare e ripetere con precisione i test e dove non c'è nessun pilota che corra il rischio di salire su una vettura malfunzionante. Successivamente il sistema di controllo viene provato su pista dove, grazie al feedback di piloti professionisti, sarà possibile calibrare le mappe di guidabilità, individuare eventuali difetti da correggere e migliorie da poter applicare e apprezzare i vantaggi dovuti all'introduzione del controllo in coppia.

5.1 Verifica a banco

La fase di verifica del sistema di controllo comincia in sala prove, dove il motore può essere sottoposto a diverse condizioni di funzionamento che simulino situazioni reali. Il primo obiettivo, cioè quello di controllare che con il nuovo controllo il motore funzioni regolarmente a vari regimi e carichi, è confermato dai primi test svolti, che non hanno mostrato alcun tipo di spegnimento del propulsore in nessuna zona di funzionamento.

Con prove in stazionario, con rampe e simulando giri di pista reali (ciclo dinamico), è possibile ora verificare se le richieste del guidatore (in questo caso sostituito dai comandi del banco motore) vengano rispettate. Questo viene ricercato nell'uguaglianza tra la coppia calcolata dal sistema di controllo e quella misurata dal torsionometro di sala prove e nella corrispondenza tra i valori target di centralina e quelli effettivamente attuati e misurati dai sensori.

Il primo problema incontrato è legato all'instabilità della valvola di apertura del condotto di aspirazione. Con delle semplici prove in stazionario si può vedere che con richiesta fissa di pedale la farfalla comincia a oscillare causando una forte irregolarità nelle pressioni del collettore di aspirazione e dopo l'intercooler. Questo è probabilmente dovuto alla modalità di gestione della *waste-gate*, il cui controllo non è stato modificato con l'introduzione del nuovo software. La funzione di controllo della sovralimentazione disponibile in centralina si interfaccia male con il controllo in

coppia, perché i parametri che regolano la *waste-gate* dipendono dalla posizione della farfalla. Dato che con il nuovo sistema il valore di farfalla è uno degli obiettivi finali di calcolo e dipende a sua volta dalla pressione di sovralimentazione, si genera un loop nel sistema che potrebbe causare oscillazioni alle attuazioni. Per ora questo problema non è ancora stato riscontrato ma è in cantiere una modifica alla funzione di regolazione del *boost*.

Un altro difetto individuato durante i test è la mancata corrispondenza tra la coppia richiesta a banco e la coppia netta all'albero erogata dal motore. Inizialmente il problema sembrava dovuto ad un'imprecisione nel vettore di efficienza di erogazione della coppia in funzione del lambda, in quanto il delta tra le due grandezze non era presente in pieno (quando il lambda è pari a 1,1 e il fattore di correzione pari a 1). Ai carichi parziali la differenza di coppia era più visibile; una calibrazione sbagliata del vettore in funzione del lambda ha effetto sulla correzione della coppia richiesta lato aria e quindi causa l'ingresso nei cilindri di una quantità d'aria diversa rispetto a quella necessaria per soddisfare la richiesta del pilota. Bisogna però tenere conto del fatto che in parzializzato la coppia lato aria comprende anche la riserva di coppia; un errore nella quantità di aria aspirata verrebbe comunque nascosto grazie al controllo in coppia con l'attuazione di un angolo di accensione opportuno, eccetto nella situazione in cui ci fosse più aria di quella target e l'anticipo fosse già al minimo. Non essendo questo il caso, sono state esaminate nuovamente le misure e ci si è accorti che traslando sull'asse del tempo la coppia al torsionmetro di circa 10 ms i due segnali coincidevano perfettamente; cercando informazioni riguardanti i protocolli di comunicazione della centralina verso il software INCA e tra il torsionmetro e l'acquisitore di banco si è scoperto che c'è uno sfasamento proprio di un centesimo di secondo tra questi due segnali e che quindi l'errore era solo un problema di visualizzazione.

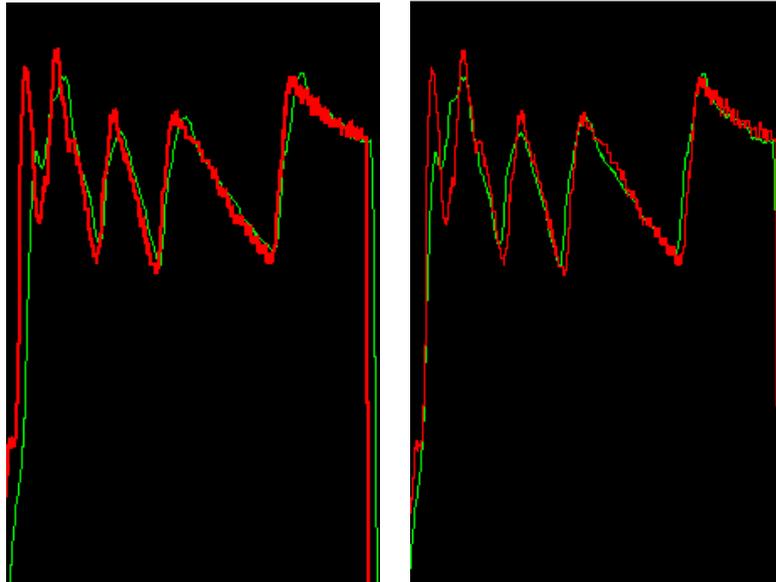


Figura 5.1 - Segnali sfasati (a sinistra) e sovrapposti (a destra)

Infine è stato notato che i target di carico e pressione non venivano raggiunti dalla pressione e dal carico effettivo, pur avendo il rispetto della coppia richiesta. Questo è visibile particolarmente in stazionario ai carichi parziali e in transitorio.

La catena di calcolo dalla coppia richiesta da banco fino alla coppia letta al torsionmetro è quella indicata in figura.

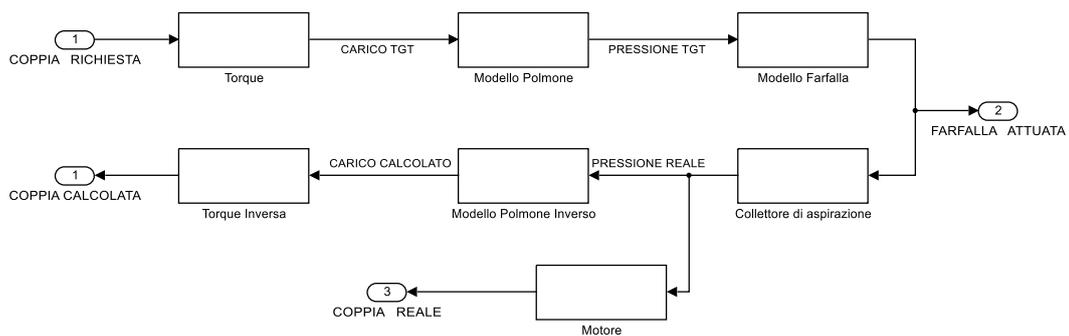


Figura 5.2 – Schema di attuazione della coppia richiesta

La causa del problema poteva quindi essere individuata in tre diverse mappature: quella che trasforma la coppia in carico, quella del modello polmone o quella del modello farfalla. Supponendo che fosse sbagliata una sola delle tre calibrazioni, il ragionamento è stato il seguente:

- se fosse il modello di trasformazione della coppia in carico ad essere errato, allora le coppie potrebbero comunque coincidere grazie al degrado di anticipo ma anche le grandezze target dovrebbero essere uguali a quelle reali;

- nel caso in cui il modello polmone fosse calibrato male, allora si avrebbe una pressione target (sbagliata) uguale alla pressione reale, il carico calcolato (attraverso il modello polmone inverso, che di conseguenza è calibrato male) probabilmente uguale al carico target mentre la coppia letta al torsiometro sarebbe diversa da quella calcolata da centralina. Questo perché l'angolo di anticipo da attuare dipende dalla coppia richiesta lato anticipo (ovvero la richiesta del guidatore) e dalla coppia massima erogabile dal motore, che a sua volta dipende dal valore di carico calcolato da centralina a partire dalla pressione nel collettore di aspirazione (per tenere conto del fatto che il motore possa aspirare più aria di quella richiesta per garantire la riserva di coppia). Il carico effettivo però a questo punto non sarebbe uguale a quello calcolato dalla centralina, e il degrado di anticipo attuato sarebbe o eccessivo o troppo piccolo. Un altro motivo per escludere questa possibilità è che la calibrazione di questa mappa è stata verificata accuratamente a banco prima di procedere con le prove di coppia e difficilmente potrebbe essere sbagliata;
- l'attenzione è quindi caduta sul modello farfalla, calibrato non con prove apposite ma utilizzando i dati della prova di calibrazione del modello polmone. Se questa mappa fosse sbagliata, la differenza tra pressione target e pressione reale e tra carico target e carico calcolato da centralina sarebbe giustificata da un'apertura non corretta della farfalla. Inoltre l'uguaglianza della coppia sarebbe dovuta al fatto che a causa della riserva di coppia il motore riusciva comunque ad aspirare una quantità d'aria sufficiente a erogare la quantità richiesta, applicando un anticipo più alto.

A questo punto è stato necessario eseguire dei nuovi test a banco specifici per la calibrazione della mappa del modello farfalla. Grazie ai dati ricevuti dalla sala prove è stato possibile correggere la mappatura; l'errore era dovuto a una sovrastima della portata d'aria in ingresso ai cilindri per una data apertura di farfalla e, una volta ricalibrato, il sistema di controllo ha funzionato correttamente.

Nelle figure seguenti, il segnale grigio rappresenta il target di pressione mentre il segnale arancione rappresenta la pressione misurata dal sensore.

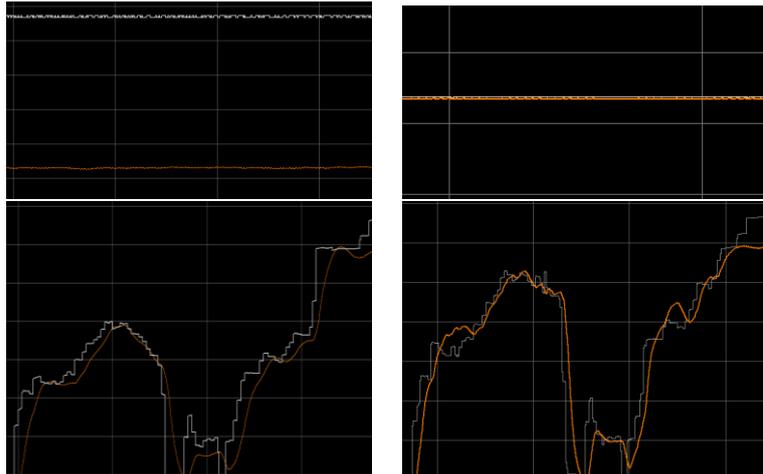


Figura 5.3 - Misure con la mappa sbagliata (sinistra) e corretta (destra)

In questa fase di verifica è stata inserita una modifica software riguardante il segnale di pressione monte farfalla utilizzato in centralina. Questa grandezza viene usata nel controllo in coppia per il calcolo del rapporto tra pressione valle/monte farfalla e del fattore correttivo in funzione della pressione. Come input del segnale però veniva utilizzata l'informazione proveniente dal sensore di pressione solo di una bancata ma tra i due condotti di aspirazione si è notata una differenza non trascurabile. Questo è dovuto all'assenza di un condotto di comunicazione tra le due bancate, utile per la compensazione delle pressioni e solitamente presente nei motori con più di un condotto di aspirazione. Per limitare il problema è stata allora implementata la possibilità di scegliere di utilizzare come segnale di pressione o il valore indicato da uno dei due sensori o la media tra i due.

5.2 Verifica su pista

Dopo la prima fase di validazione a banco è stato possibile testare il nuovo sistema di controllo direttamente su pista. La differenza sostanziale rispetto ai test in sala prove è la possibilità di confrontare le nuove prestazioni rispetto a quelle del vecchio software in termini di *feeling* del pilota e di tempi al giro. Ovviamente queste prove sono possibili solo dopo il lungo lavoro di simulazione e sperimentazione a banco, perché costano molto di più sia per quanto concerne il denaro che il tempo; effettuarle è però indispensabile, perché è grazie al *feedback* di guidatori professionisti che è possibile completare la messa a punto del sistema di controllo.

5.2.1 Prima sessione di prove

Il primo test con sistema di controllo in coppia implementato in centralina è stato effettuato per valutare le risposte del motore alla nuova strategia di controllo.

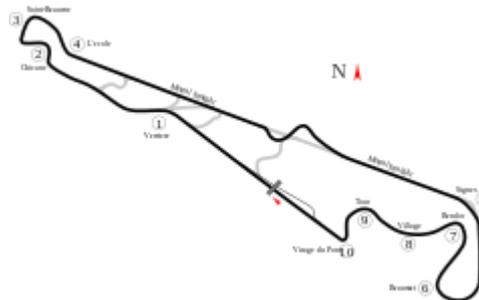


Figura 5.4 – Circuito

I primi riscontri sul sistema di controllo in coppia non sono stati completamente positivi; il lamentato più grave comunicato da parte dei piloti riguardava il cattivo comportamento del motore in fase di cambiata. Nel caso di scalata, che viene chiamata dal pilota a pedale rilasciato e quindi in condizione di *cut-off*, il motore deve erogare una certa coppia, tale da permettere la crescita della velocità di rotazione del motore in modo da rendere meno ruvida la transizione tra i due rapporti. Se nel software precedente la riaccensione del motore e l'erogazione della coppia erano garantite da un'attuazione della farfalla che bypassava il comportamento del pedale (e quindi veniva richiesta una coppia nominale non nulla), con il nuovo sistema di controllo questo comportamento è venuto a mancare perché in cambiata il pedale viene rilasciato, la coppia richiesta è nulla e quindi il valore che viene attribuito alla coppia richiesta lato anticipo sarà pari a zero, causando l'attuazione di angoli di anticipo molto ritardati (tendenti all'anticipo minimo). La soluzione a questo problema è immediata: è sufficiente inserire uno *switch* (che si innesca grazie al bit di attivazione della cambiata) che permetta di bypassare la coppia nulla richiesta dal pilota in modo da attribuire alla coppia richiesta lato anticipo il valore di coppia base.

Sempre per migliorare il comportamento del software in fase di cambiata sono state necessarie altre modifiche al codice di controllo. La prima consiste nell'aggiunta di due calibrazioni parallele al modello di trasformazione della richiesta di coppia in richiesta di carico. In fase di rilascio del pedale una delle esigenze dei piloti è quella di ricevere un aiuto da parte del motore nella frenata. Questo può essere realizzato

grazie alla richiesta di valori di carico molto bassi, che causano la chiusura della valvola a farfalla e garantiscono quindi un certo freno motore. Allo stesso tempo bisogna però garantire l'accensione del motore al minimo: per questo si introducono due diverse calibrazioni, una con valori di carico minimo misurati a banco che si attiva quando si accende lo stato di minimo, una con valori di carico minimo ancora più bassi (per forzare la frenata del motore) che si attiva quando si entra in condizioni di *cut-off*. La seconda modifica prevede la definizione di un nuovo segnale per identificare lo stato di minimo. Nel software precedente questo segnale veniva attivato in funzione sia del pedale sia della farfalla; quando entrambe le grandezze scendevano al di sotto di una certa soglia il motore riconosceva la richiesta di attivazione delle attuazioni per restare acceso al minimo. Con il controllo in coppia però pedale e farfalla vengono separati completamente e con l'introduzione della riserva di coppia la valvola di passaggio dell'aria fresca non risulta quasi mai totalmente chiusa. Nasce così l'esigenza di identificare la condizione di minimo solo in funzione del pedale; questo nuovo segnale viene utilizzato all'uscita delle mappe pedale per bypassare la richiesta del pilota ed evitare lo spegnimento al minimo.

Continuando ad analizzare le misure è stato riscontrato un altro aspetto negativo. Prima di parlarne bisogna però descrivere brevemente la struttura della centralina Bosch utilizzata in vettura e sulla quale è caricato il software di controllo. Il modello è il Bosch MS6, una centralina pensata per il mondo Motorsport e dotata di caratteristiche alto prestazionali e notevole flessibilità. Lo sviluppo dei software per questa unità di controllo è basato su MATLAB e Simulink, che sono ambienti di lavoro ben noti ai progettisti delle case automobilistiche e molto intuitivi. Il sistema di controllo già implementato da Bosch su questa centralina ha le seguenti caratteristiche:

- gestione di motori fino a 12 cilindri con possibilità di scegliere tra iniezione ad alta o bassa pressione;
- possibilità di calcolo separato della massa d'aria aspirata per motori a due bancate;
- funzioni all'avanguardia per il controllo del *cut-off*, del minimo e della detonazione già integrate;
- iniezione sequenziale possibile anche per iniezioni asimmetriche;

- presenza di diversi canali di comunicazione tra cui due porte Ethernet, una USB, 3 CAN e una porta RS232 che permette il trasferimento online di dati di telemetria.

Inoltre questo modello di centralina permette agli utenti di integrare autonomamente funzioni di controllo personalizzate in modo veloce e facile; questo è possibile grazie ad un altro strumento Bosch chiamato CCA (*Customer Code Area*), che non è altro che un'area del software dove poter implementare le funzioni scritte dai clienti. Queste funzioni girano in parallelo al software originale, che non viene quindi sostituito ma solo bypassato.

Analizzando le misure dei giri e mettendo a confronto le grandezze calcolate dal controllo in coppia e quelle calcolate dal sistema precedente, è stata riscontrata una piccola differenza tra i segnali del nuovo sistema rispetto ai segnali analoghi calcolati dal sistema Bosch. Da subito si è notato che i segnali sembravano leggermente traslati sull'asse dei tempi, come nel caso della coppia al torsionometro delle prove a banco, ma con tempi di ritardo dei nuovi segnali rispetto a quelli già presenti molto inferiori (1/2 ms). Le cause del problema sono state individuate nelle modalità di calcolo delle funzioni personalizzate aggiunte in centralina: i nuovi segnali vengono infatti calcolati teoricamente in parallelo alle funzioni base di centralina, ma in realtà viene stabilita una sorta di gerarchia in funzione del tempo di calcolo delle variabili. Infatti prima vengono calcolati i segnali con la frequenza di acquisizione più alta, dando precedenza alle variabili del software originale rispetto a quelle calcolate nella CCA: in questo modo gli input del controllo in coppia (FETC) sono aggiornati mentre quelli del sistema Bosch sono gli output del ciclo precedente.

Tempo [ms]	0	1	2	3	4	...	10	Legenda
Task	1	1	1	1	1		1	Bosch
	1	1	1	1	1		1	CCA
	2		2		2		2	FETC
	2		2		2		2	
	10						10	
	10						10	
	100							
	100							

Tabella 5 – Tempo di calcolo del software

5.2.2 Seconda sessione di prove

Il secondo test su pista si è svolto in un circuito di fama internazionale. L'obiettivo delle prove per quanto riguarda il motopropulsore era quello di giudicare le modifiche effettuate sul software, valutare ancora più a fondo l'efficacia del controllo in coppia e ricevere il parere di piloti professionisti.



Figura 5.5 – Circuito

Dai primi commenti giunti in modo ufficioso dalla pista sembrava che il sistema funzionasse relativamente bene, ma con pesanti peggioramenti sul fronte dei consumi, con valori fino a 10-15%. La nuova strategia effettivamente peggiora le efficienze, poiché in situazione di parzializzato la coppia viene controllata attuando un anticipo di accensione non ottima. In realtà difficilmente i consumi sarebbero potuti peggiorare a tal punto: la fase a pedale parzializzato incide in piccola percentuale sul giro completo, dove i consumi maggiori derivano dalle accelerazioni in rettilineo. Con il report ufficiale di pista si è scoperto infatti che i consumi peggiorano ma solo dello 0,38%: questo significa che sul bilancio globale della gara non c'è un peggioramento, considerando che solo la scelta del pilota può portare a cambiamenti nei consumi fino allo 0,5%. In seguito si è anche scoperto che i primi valori di consumo erano così alti perché si erano analizzati solo i valori di tempi di iniezione senza considerare la pressione del *rail*.

Un altro problema emerso è sempre legato alla definizione della *condition* di *cut-off*. Essa dipende infatti dalla vecchia modalità di definizione del minimo, che a sua volta è legata alla posizione del pedale e della farfalla. Nel nuovo sistema, in seguito al

rilascio del pedale, la farfalla non sempre scende al di sotto della soglia di attivazione dello stato di minimo, perché può essere richiesta una certa riserva di coppia in funzione della coppia richiesta (la quale in fase di *cut-off* va a zero) che potrebbe spingere la valvola ad aprirsi. Anche nel caso di *cut-off* attivo, il controllo rischia di uscire in modo casuale da questa fase per l'apertura eccessiva della farfalla. Per risolvere questo problema ci sono due possibili soluzioni. La strada formalmente corretta sarebbe quella di modificare il modo in cui è definito il segnale che individua lo stato di *cut-off* nel software Bosch, andando a eliminare la dipendenza dalla farfalla. Siccome questa ipotesi richiede comunque l'intervento dei progettisti dell'azienda tedesca, mentre le modifiche in CCA possono essere svolte autonomamente, si è deciso di inserire uno *switch* sulla scrittura della riserva di coppia, che va a zero nel caso la condizione di rilascio pedale sia attiva. In questo modo è possibile evitare di dover scrivere il primo valore della curva di riserva di coppia pari a zero e il problema viene in un certo modo tamponato. Alternativamente bisognerebbe imporre la mappa di riserva di coppia pari a zero fino al valore di coppia richiesta pari al valore massimo di coppia al minimo. Questo perché al momento del rilascio del pedale, nel caso di valori di riserva di coppia molto alti, il motore potrebbe non entrare in *cut-off*, dato che lo spegnimento del motore dipende ancora dalla posizione del pedale ma anche della farfalla.

L'ultima modifica riguarda la gestione del freno motore. Con l'introduzione della curva di carico da utilizzare in fase di *cut-off*, il *feeling* del pilota in frenata è notevolmente migliorato. Una piccola accortezza che si è voluta aggiungere è l'utilizzo non di una singola curva di carico minimo in *cut-off*, ma di più curve da scegliere tramite il manettino del freno motore.

5.2.3 Terza sessione di prove

La terza prova con il controllo in coppia su vettura è stata svolta con l'obiettivo di permettere ai piloti di prendere confidenza con il nuovo sistema e allo stesso tempo poter calibrare su misura le mappe di guidabilità (mappa pedale, mappa di riserva di coppia).

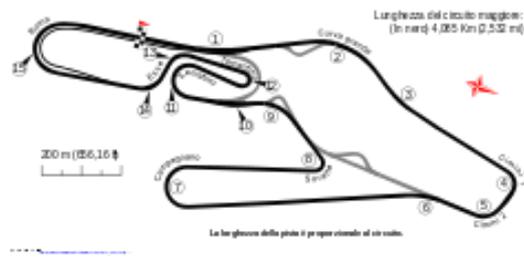


Figura 5.6 – Circuito

Durante i test sono stati riscontrati alcuni problemi. In primo luogo il pilota ha lamentato un comportamento troppo brusco della macchina al momento del rilascio pedale. Questo è dovuto alla calibrazione della mappa pedale: dato che con il controllo in coppia la richiesta del guidatore si traduce direttamente in richiesta di coppia, una riduzione repentina dell'angolo del pedale corrisponde ad un taglio immediato della coppia erogata dal motore. Il problema di base è che il pilota non è abituato a una risposta così veloce e precisa del motore e ha impostato il proprio stile di guida sul controllo precedente. L'ideale sarebbe che imparasse a guidare con il nuovo sistema di controllo, che risulterebbe più preciso e performante nel soddisfare le sue richieste. Nell'attesa, una possibile soluzione sarebbe quella di saturare le mappe a valori di pedale relativamente basso (cioè garantire la massima erogazione di coppia già per pedali del 60%) in modo tale da evitare un taglio eccessivo di coppia per rilasci del pedale limitati. In questo modo però il motore sarebbe troppo aggressivo, perché consentirebbe l'erogazione di coppie molto alte in seguito a pressioni limitate sull'acceleratore.

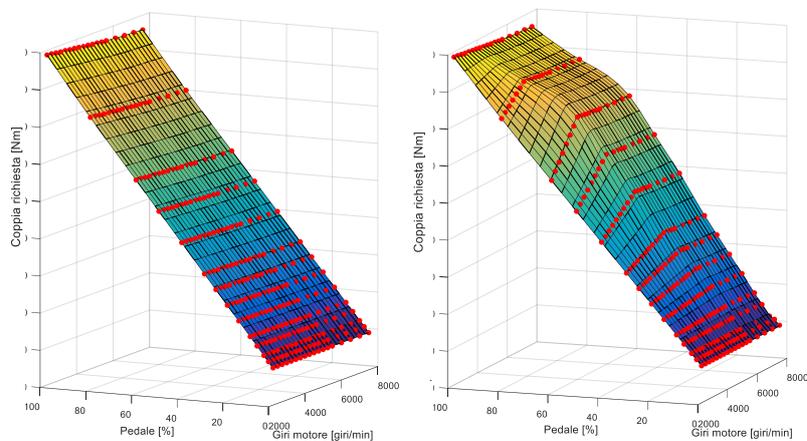


Figura 5.7 – Due possibili configurazioni della mappa pedale

Per trovare un rimedio a entrambi i problemi si è pensato di introdurre nel sistema di controllo il concetto di filtri di guidabilità. L'idea è quella di rallentare la richiesta in fase di rilascio pedale per non rendere il taglio di coppia eccessivamente brusco. Questo può essere fatto con un filtro passa-basso, che viene attivato nel caso in cui la differenza tra la coppia richiesta dal pilota e quella attuata nell'iterazione precedente sia inferiore a una certa soglia, cioè nel caso in cui il gradiente di coppia richiesta sia particolarmente grande. Il tempo caratteristico del filtro viene stabilito da una calibrazione in funzione della velocità di rotazione del motore e della marcia inserita; con il manettino è possibile anche scegliere con quale intensità filtrare il rilascio del pedale. La mappa pedale può quindi essere calibrata in modo lineare per garantire un'erogazione di coppia continuativa durante l'incremento di pressione sul pedale e allo stesso tempo poter disporre dell'effetto diminuzione graduale della coppia in fase di rilascio.

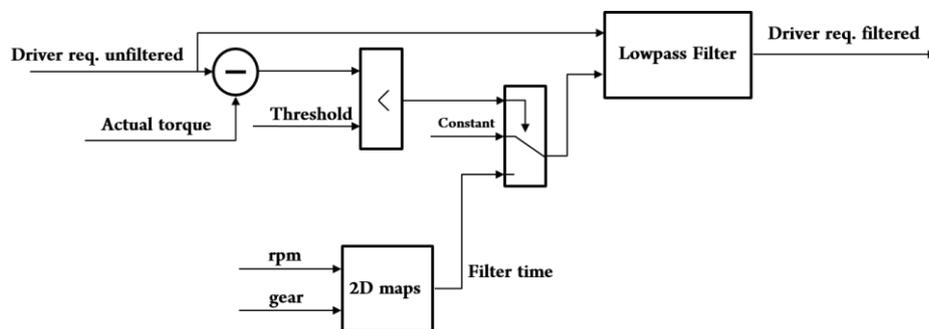


Figura 5.8 – Filtro nel calcolo della coppia richiesta



Figura 5.9 – Effetto del filtro

Altri problemi individuati durante i test ma di rapida correzione sono stati:

- incapacità di mantenere il motore acceso al minimo: la causa era dovuta al fatto che non si era tenuto conto di una calibrazione del vecchio software in cui veniva garantito un offset di apertura farfalla al minimo e che non erano state calibrate le mappe adibite al controllo del minimo presenti nel controllo in coppia;
- instabilità del *traction control*: il sistema di controllo del *traction control* non si interfaccia bene con l'introduzione del controllo in coppia. L'idea è quella di aggiornare le funzioni del controllo di trazione perché allo stato attuale la limitazione di coppia viene calcolata in riferimento alla coppia all'anticipo base, che non è quella che il motore eroga nel caso di riserva di coppia;
- implementazione del calcolo dell'anticipo nominale: fino a questo momento il valore di anticipo nominale era calcolato nel software Bosch. Questo causava un ritardo tra i segnali di coppia nominale calcolati nel software Bosch e nella CCA;
- valori di anticipo nominale troppo bassi: nonostante l'introduzione del calcolo dell'anticipo nominale nella CCA, i valori ottenuti risultavano troppo bassi. La causa di questo problema è stata individuata in una cattiva calibrazione di un *codeword* che era stato introdotto per bypassare la richiesta del pilota in fase di scalata ma che non risultava attivo. In questo modo la coppia nominale lato anticipo era nulla e l'angolo di anticipo attuato cercava di soddisfare questa condizione.

5.2.4 Quarta sessione di prove

Il secondo test nello stesso circuito è stato svolto con l'obiettivo di riuscire a girare con continuità utilizzando unicamente il sistema di controllo in coppia. Questa possibilità permetterebbe ai piloti di prendere confidenza con la nuova strategia, di imparare a guidare seguendo uno stile diverso rispetto a prima e di dare importanti consigli per miglioramenti e calibrazioni.

Il sistema di controllo in coppia è stato utilizzato fin dalle prime prove al posto di quello Bosch. Questo è stato un ottimo risultato per il progetto: si può dire infatti che il sistema sia stabile e che eventuali modifiche future saranno volte solo al suo

miglioramento e non al funzionamento. Oltre al successo dal punto di vista ingegneristico, anche da parte dei piloti è emersa una certa soddisfazione nei confronti del nuovo sistema. È stato così possibile capire cosa ancora possa essere migliorato a livello di architettura del software e delle calibrazioni.

I primi test sono serviti per analizzare il funzionamento del filtro del pedale. Il contributo di questo nuovo sistema non era infatti particolarmente sentito dal pilota in seguito al rilascio dell'acceleratore. La causa di questo problema era dovuta al fatto che la funzione di guidabilità calcola il gradiente di coppia prendendo la richiesta attuale e la coppia attuata 10 ms prima. Nel caso del motore da competizione invece i calcoli vengono eseguiti ogni 2 ms per qualsiasi variabile: la soglia del gradiente dovrebbe quindi essere 5 volte più piccola, altrimenti il filtro difficilmente si attiverebbe. Una volta sistemato questo piccolo errore, i piloti hanno iniziato ad apprezzare maggiormente il filtro sul pedale, testandolo anche per rilasci parziali dell'acceleratore.

Un altro aspetto che doveva essere analizzato è quello riguardante la possibilità di incrementare la quantità di riserva di coppia per aumentare l'accelerazione immediata della macchina in uscita dalle curve. L'aumento della quantità d'aria aspirata dal motore per erogare una quantità di coppia costante deve coincidere con il degrado dell'angolo di anticipo; il limite inferiore dell'anticipo, che stabilisce quindi la massima riserva di coppia ottenibile, è dato dall'anticipo minimo. L'angolo di anticipo minimo viene calcolato attraverso una calibrazione in funzione dei giri e del carico; per determinare questa calibrazione si utilizzano i dati della prova di variazione dell'angolo di anticipo.

La prova su pista è stata svolta per portare la combustione ai limiti della stabilità e trovare un buon compromesso tra una grande riserva di coppia e un'accettabile efficienza di combustione. È stato riscontrato che incrementare eccessivamente la quantità aggiuntiva di coppia richiesta lato aria, e quindi adottare angoli di accensione molto piccoli, causa un peggioramento nelle prestazioni del motore, perché la stabilità della combustione risulta essere troppo precaria. Si è deciso quindi di non richiedere la massima riserva di coppia possibile ma di limitare tale richiesta, ottenendo comunque risultati ottimi a livello di accelerazione in uscita dalla curva.

Un altro problema individuato riguarda il fenomeno di *overboost*. Il regolamento impone un limite massimo di pressione del polmone; il limite viene definito dalla moltiplicazione tra la pressione ambiente, sempre indicata dal regolamento e stabilita gara per gara, e un fattore che dipende dalla velocità di rotazione del motore. Se durante la gara il sensore di pressione, posizionato a valle della farfalla e monitorato dai giudici, segnalasse il superamento della soglia limite, la vettura potrebbe andare incontro a penalizzazioni che vanno dal *drive through* alla squalifica. Nelle prove effettuate con il sistema di controllo in coppia, gli eventi di *overboost* sono aumentati rispetto alla tendenza registrata con le prove con il controllo della scorsa stagione.

Per evitare questo fenomeno la prima idea potrebbe essere quella di limitare l'apertura della farfalla nel caso la pressione dopo il compressore si avvicinasse eccessivamente a quella limite. Questa soluzione potrebbe anche risolvere il problema, ma non sarebbe l'opzione formalmente più corretta. Il problema di base è infatti la cattiva progettazione del sistema di controllo del *boost*, che ha come obiettivo quello di soddisfare una certa pressione a valle della farfalla. Con la strategia di controllo in coppia però l'apertura della farfalla dipende dalla pressione di sovralimentazione; il controllo del turbocompressore deve quindi garantire delle condizioni stabili per non generare delle fastidiosi oscillazioni nel sistema di aspirazione. L'aggiornamento delle funzioni di controllo del *boost* è una dei possibili sviluppi futuri di miglioramento del software.

Infine, nel corso della seconda mattinata di test, è stato riscontrato un comportamento anomalo del motore da parte del pilota. Analizzando a posteriori i dati è stato individuato un punto della pista, in particolare in ingresso a curva 5, nel quale il motore potrebbe aver manifestato un *misfire*. Questo comportamento è particolarmente visibile grazie a due variabili: il rapporto aria/combustibile (segnale viola) e l'accelerazione longitudinale del veicolo (segnale giallo).



Figura 5.10 – Individuazione del problema

Il primo segnale evidenzia il fatto che uno o più eventi di combustione non si sono verificati e l'iniezione non sia avvenuta, perché il valore di lambda presenta un picco fino al valore di 1,7 (contro il valore target di 1,1). In aggiunta, si vede che il veicolo subisce una brusca decelerazione, non dovuta ad altri interventi.

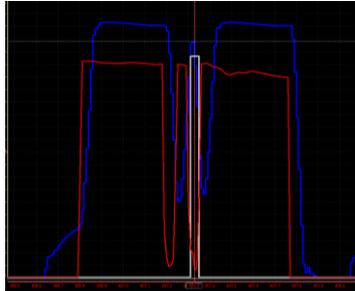


Figura 5.11 – Analisi delle cause del misfire

Inizialmente la causa di questo evento è stata attribuita ad un malfunzionamento delle attuazioni del sistema motopropulsore (ad esempio l'iniettore). In realtà il motivo di questo comportamento anomalo è stato l'attivazione di un segnale di errore nella funzione di controllo della farfalla a controllo elettronico. Il problema è dovuto al fatto che la valvola segnala errore in seguito a dinamiche di apertura e chiusura consecutive troppo rapide. Questo però si traduce nell'annullamento della fase di combustione solo se la lettura del segnale da parte della centralina avviene nella finestra temporale giusta. Il bit di disattivazione della combustione viene calcolato una volta al secondo e non è detto che l'evento di lettura dell'errore avvenga quando il gradiente di farfalla è oltre soglia. Per evitare di incorrere in fenomeni di mancata combustione in gara, è necessario modificare il valore massimo consentito per la differenza tra farfalla attuata e farfalla target; inoltre è consigliabile anche aumentare il *debounce time* dell'errore, cioè il tempo per il quale la condizione di superamento del limite può essere verificata senza attivare effettivamente il bit di errore.

Conclusioni

Al termine di questo progetto è possibile affermare che sono stati raggiunti gli obiettivi prefissati.

Come prima cosa, ho compreso il funzionamento di un sistema di controllo in coppia di un motore da competizione. Le funzioni sono state analizzate approfonditamente e integrate in un modello virtuale semplificato di dinamica del veicolo; in questo modo è stato possibile simularne il comportamento ed apprezzarne i possibili vantaggi rispetto al sistema di controllo precedente.

In secondo luogo ho calibrato molti dei parametri che servono per adattare il software di controllo al motore della Ferrari da competizione in questione. Le calibrazioni che sono state aggiornate con prove a banco sono 19; quelle modificate in seguito a prove successive e altre considerazioni sono più di 50. Grazie alle verifiche a banco e alle prove su pista è possibile affermare che le calibrazioni effettuate risultano affidabili.

Infine, grazie ai test eseguiti presso alcuni circuiti, il nuovo sistema di controllo è stato fatto provare a piloti professionisti. Questi professionisti hanno contribuito fortemente al rafforzamento del sistema di controllo in coppia; grazie ai loro pareri è stato possibile implementare nuove funzioni (filtri di rilascio pedale, freno motore) e perfezionare alcune calibrazioni (riserva di coppia, mappe pedale). I loro giudizi sono stati molto positivi e hanno evidenziato un notevole miglioramento delle prestazioni dovuto alla riduzione del *turbo-lag*. L'altro aspetto vantaggioso del nuovo sistema riguarda la maggiore controllabilità del motore, che risponde in modo più preciso ai comandi del pilota. Questo è molto importante se si pensa che nel campionato possono gareggiare anche piloti non professionisti.

Non si può dire però che il software di controllo non possa essere ulteriormente migliorato. La prima modifica da effettuare riguarda alcune delle funzioni secondarie quali il *boost control* o il *traction control*. Quest'ultima è già stata sviluppata in modo diverso rispetto al sistema Bosch e testata su pista, ma deve essere interfacciata in modo perfetto con il sistema di controllo in coppia. La funzione di controllo della sovralimentazione non è ancora stata modificata; è essenziale intervenire per poter garantire il corretto funzionamento del sistema di controllo in tutti i suoi aspetti.

Un'altra importante opportunità è la possibilità di utilizzare alcuni sistemi di *Software-In-the-Loop* (SIL). Ferrari dispone già dei modelli del motore da competizione trattato all'interno di questa tesi, e la precisione con la quale si possono simulare i fenomeni fisici reali è molto alta. Alcune prove, come quella di calibrazione del modello polmone o del modello farfalla, potrebbero essere facilmente eseguite grazie al software GT-POWER; inoltre, grazie all'interfacciamento con Simulink, sarebbe anche possibile inserire il codice di controllo in coppia e simulare il comportamento del sistema di controllo. Un altro strumento molto potente che può essere utilizzato con vari scopi è il simulatore di guida, che consiste in un abitacolo che rispecchia la struttura di una Ferrari e dispone di volante, pedali e dei vari pulsanti e manettini presenti in una vettura da competizione. Con questo oggetto, montato su una piattaforma che "galleggia" a pochi millimetri dal suolo all'interno di una stanza molto grande, è possibile simulare il moto di un veicolo e registrare dati più o meno vicini alla realtà di alcuni parametri della vettura e del motore. Con il simulatore è possibile eseguire una pre-calibrazione di alcune mappe che di solito vengono regolate in pista, come ad esempio la mappa pedale.

L'ultimo obiettivo, ma senz'altro quello più importante, è quello di utilizzare il sistema di controllo in coppia durante le gare del campionato. Questo significherebbe essere riusciti ad aumentare ulteriormente le prestazioni, l'affidabilità e la guidabilità di una macchina già ai vertici della propria categoria.

Bibliografia e sitografia

[1]. *Bosch Automotive Handbook*, 9th Edition, 2014.

[2]. L. Guzzella, e C. H. Onder, *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*, Springer, 2009.

[3]. J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Education, 1988.

[4]. Ferrari

http://www.ferrari.com/it_it/

[5]. Ferrari Auto

http://auto.ferrari.com/it_IT/

Ringraziamenti

Aver concluso la mia carriera universitaria con uno stage presso il reparto Applicazione Motopropulsore di Ferrari rappresenta per me un motivo di grande orgoglio e soddisfazione. Per questa straordinaria opportunità devo ringraziare il professor Cavina, per la sua disponibilità e per l'incredibile impegno con il quale spinge i propri studenti a misurarsi con ambienti professionali di alto livello, ma anche Christian e Giovanni, che hanno reso possibile il mio ingresso in Azienda. Un sentito grazie va a Daniele, che in questi 6 mesi mi ha insegnato tanto ed è stato sempre più che disponibile e paziente nei miei confronti. Grazie a Paolo, Marco e a tutti gli altri ragazzi del reparto che sono stati sempre gentili e disposti ad aiutarmi nelle varie fasi del progetto.

Il raggiungimento di risultati così prestigiosi non sarebbe stato tuttavia possibile senza l'aiuto di molte altre persone.

Un immenso grazie va ai miei genitori, che hanno sempre fatto di tutto per rendermi felice e mi hanno sempre incoraggiato a dare il massimo, e a mia sorella, a cui voglio tantissimo bene anche se non sempre sono riuscito a dimostrarlo.

Grazie a Isabella, che mi è sempre accanto e che è l'unica che riesce a strapparmi un sorriso anche quando tutto sembra andare per il verso sbagliato.

Grazie infine a tutti i miei amici, persone incredibili senza i quali la vita sarebbe stata più grigia: gli amici di sempre Alberto R., Filippo, Andrea, Michele, Alberto B., Alberto F., Marco, Mirko e Simone; i colleghi dell'Università, in particolare Francesco, con cui ho condiviso ore e ore di studio, e Lorenzo, che ha reso meno noiose le serate a Maranello.