

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA

Ingegneria delle Macchine e dei Sistemi Energetici - XXI ciclo

ING-IND/08

**SVILUPPO DI ALGORITMI AVANZATI DI ANALISI
E DIAGNOSI COMBUSTIONE IN TEMPO REALE
PER MOTORI ENDOTERMICI ALTERNATIVI**

Luca Solieri

Coordinatore Dottorato

Chiar.mo Prof. Ing. Davide Moro

Relatore

Chiar.mo Prof. Ing. Davide Moro

Esame finale anno 2009

A Eleonora e Anna

Abstract

Increasingly stringent exhaust emission limits and higher fuel economy are the main drivers of the engine development process. As a consequence, the complexity of the propulsion units and its subsystems increase, due to the extensive use of sensors and actuators needed to obtain a precise control over the combustion phase. Since engine calibration process consumes most of the development time, new tools and methodologies are needed to shorten the development time and increase the performance attainable. Real time combustion analysis, based on the in-cylinder pressure signal, can significantly improve the calibration of the engine control strategies and the development of new algorithms, giving instantaneous feedback on the engine behavior. A complete combustion analysis and diagnosis system has been developed, capable of evaluating the most important indicators about the combustion process, such as indicated mean effective pressure, heat release, mass fraction burned and knock indexes. Such a tool is built on top of a flexible, modular and affordable hardware platform, capable of satisfying the requirements needed for accuracy and precision, but also enabling the use directly on-board the vehicle, due to its small form factor.

Indice

1	La scelta della piattaforma hardware e software	19
1.1	Modularità e fattori di forma	23
1.1.1	La piattaforma PXI	23
1.1.2	La piattaforma CompactRIO	26
1.1.3	Il computer Host	27
1.2	L'ambiente di sviluppo	28
2	Il campionamento dei segnali	31
2.1	Acquisizione basata su encoder ottico incrementale	31
2.2	Acquisizione a frequenza costante	33
2.3	Determinazione dei riferimenti angolari	36
2.4	Il numero di riferimenti angolari	38
2.5	Compensazione dei ritardi	40
2.5.1	I trasduttori di misura della posizione angolare	42
2.5.2	Il circuito di interfaccia	47
2.5.3	Il condizionamento del segnale di pressione	49
2.5.4	Algoritmo di compensazione	51
3	Diagnosi detonazione in tempo reale	55
3.1	Descrizione del fenomeno	55
3.2	Il filtraggio del segnale	57
3.3	Descrizione degli indici di detonazione	63
3.3.1	MAPO (Maximum Amplitude of Pressure Oscillation)	63
3.3.2	KINT (Knock Integral)	65

4	Analisi indicating in tempo reale	67
4.1	Il recupero della componente media del segnale di pressione	67
4.2	Il calcolo della pressione media indicata	70
4.3	Il rilascio di calore	71
4.4	Indici derivati	74
4.4.1	Picco di pressione	74
4.4.2	Gradiente di pressione	74
4.4.3	PMI di pompaggio e di combustione	75
4.4.4	Frazione di massa bruciata	75
4.4.5	Indicatori di misfire	76
5	Potenzialità di calcolo avanzato offline	79
5.1	Il salvataggio dei dati	79
5.2	Algoritmi avanzati	82
5.2.1	Algoritmi di stima della posizione del punto morto superiore	82
5.2.2	Modelli avanzati per la valutazione della legge di rilascio di calore	95
6	Implementazione	99
6.1	Architettura generale	99
6.2	FPGA	100
6.2.1	Il modulo di rilevamento della posizione angolare (EPS)	101
6.2.2	Il modulo di campionamento del segnale di pressione (SAMPLING)	102
6.2.3	Blocco di conversione dal dominio temporale a dominio angolare (TAC)	104
6.2.3.1	Calcolo indici detonazione (KNOCK)	106
6.2.3.2	Calcolo grandezze indicate (INDICATING)	107
6.2.4	Invio dei dati al livello RT (SENDRES)	110
6.2.5	Gestione della configurazione (CONF)	110
6.3	RT	111
6.3.1	Gestione delle connessioni di rete con la parte HOST (CON)	111

6.3.2	Data logger ad alta frequenza (HFLOG)	112
6.3.3	Gestione della configurazione (CONF)	113
6.3.4	Ricezione risultati da FPGA (GETFPGARES) .	113
6.3.5	Completamento dell'analisi combustione (FLOAT-CAL)	113
6.4	HOST	114
6.4.1	Gestione delle connessioni di rete con la sezione RT (CON)	114
6.4.2	Gestione della configurazione (CONF)	115
6.4.3	Oscilloscopio (SCOPE)	115
6.4.4	Implementazione analisi statistica (GETRTRES)	116
6.4.5	Interfaccia utente (GUI)	117

7 Conclusioni **121**

Elenco delle figure

1.1	Schema dell'architettura hardware	22
1.2	Esempio di sistemi PXI	24
1.3	Scheda dotata di processore Real Time	25
1.4	Scheda FPGA	25
1.5	Sistema CompactRIO	27
1.6	Ambiente di sviluppo LabView	29
1.7	Esempio di pannello frontale	30
1.8	Esempio di diagramma a blocchi	30
2.1	Encoder ottico incrementale	32
2.2	Successione di riferimenti angolari e campioni di pressione	37
2.3	Determinazione della posizione dei singoli campioni . . .	37
2.4	Andamento velocità di rotazione simulato	39
2.5	Andamento velocità di rotazione ricostruito	40
2.6	Errore di posizione nel ciclo	41
2.7	Andamento del massimo errore di posizione in funzione della fluttuazione di RPM e della risoluzione angolare dei riferimenti	41
2.8	Sensore a riluttanza variabile	43
2.9	Sensore ad effetto Hall	45
2.10	Schematizzazione di un sensore ad effetto Hall	46
2.11	Progetto CAD dei circuiti stampati	49
2.12	Esempio di caratteristica ingresso-uscita di un filtro passa- basso digitale	52
2.13	Effetto dei ritardi sui segnali acquisiti	52
3.1	Confronto tra un ciclo motore detonante e uno regolare .	56

3.2	Algoritmo di valutazione indice detonazione	57
3.3	Confronto tra combustione detonante e regolare	58
3.4	Spettro del segnale di pressione in camera al variare dell'anticipo	59
3.5	Effetti del filtraggio sullo spettro del segnale di pressione (HP Butterworth)	60
3.6	Effetti del filtraggio sullo spettro del segnale di pressione (HP Chebyshev)	61
3.7	Cicli di pressione filtrati a confronto	62
3.8	Esempio di rumore di chiusura valvole	62
3.9	Effetti del rumore di chiusura valvole sul segnale filtrato	63
3.10	Calcolo del MAPO	64
3.11	Variazione del SNR al variare della finestra di analisi	66
4.1	Confronto tra i metodi per il recupero della componente media	70
4.2	Evoluzione della PMI in un ciclo motore	71
4.3	Rilascio di calore netto integrale	73
4.4	Andamento della frazione di massa bruciata durante la combustione	76
4.5	Grandezze derivate dalla frazione di massa bruciata	77
5.1	Il loss angle.	84
5.2	Curve di compressione ed espansione nel diagramma T-s	87
5.3	Dettaglio della fine della fase di compressione	88
5.4	Forma del diagramma T-s in presenza di errore PMS	90
5.5	Andamento delle quantità $\frac{\delta V}{V}$ e $\frac{\delta p}{p}$	91
5.6	Andamento della <i>loss function</i>	92
5.7	Andamento della <i>loss function</i> in funzione degli errori di posizione	93
5.8	Sensibilità all'incertezza di Rc	94
5.9	Sensibilità all'incertezza sulla pressione	95
5.10	Andamenti di Q_{net} e Q_{tot}	97
5.11	Modelli di K	98
5.12	Effetto dei modelli di K sul calore rilasciato netto	98

6.1	Architettura del software	99
6.2	Schema a blocchi del codice FPGA	100
6.3	Schema a blocchi del modulo di determinazione posizione angolare	101
6.4	Schema a blocchi del modulo di campionamento ad alta frequenza	103
6.5	Diagramma a blocchi del codice di attribuzione etichette angolari ai campioni	105
6.6	Schema a blocchi del codice di diagnosi detonazione . . .	107
6.7	Struttura del blocco INDICATING	108
6.8	Struttura del livello RT	112
6.9	Struttura sezione HOST	115
6.10	Interfaccia operatore	117
6.11	Esempio di visualizzazione analisi statistica	118
6.12	Analisi statistica detonazione	118
6.13	Struttura dei menù di configurazione	119

Introduzione

L'ottimizzazione delle prestazioni dei motori endotermici alternativi manifesta una tendenza verso una sempre maggiore complessità. I limiti sempre più stringenti sulle emissioni inquinanti e sulla produzione di CO_2 , da un lato, e la complessità delle strategie di controllo motore che ne derivano, dall'altro, rendono lungo e costoso il processo di calibrazione del sistema di controllo del motore. Tipicamente la sua messa a punto prevede una serie di test specifici al banco prova, seguiti da una fase di analisi dati, effettuata a posteriori, per sintetizzare gli algoritmi di controllo appropriati. Questa metodologia però sta raggiungendo un punto critico, oltre il quale diventa impraticabile. Il numero sempre maggiore di parametri di controllo della combustione, sorti come conseguenza della maggior complessità meccanica del motore stesso, causa un aumento esponenziale delle prove da eseguire per caratterizzare l'intero sistema. Di conseguenza la mole di dati da analizzare diventa notevole e risulta difficile ottenere dei risultati in tempi ragionevoli. Se prendiamo per esempio l'architettura di un motore diesel sovralimentato EURO2, i componenti principali erano un sistema di alimentazione a singola iniettata a bassa pressione, un turbocompressore a gas di scarico a geometria fissa e un catalizzatore ossidante. Un moderno motore diesel per auto omologato EURO5 è notevolmente più complesso; una configurazione tipo prevede: un sistema di iniezione con iniettate multiple ad alta pressione, uno o più gruppi turbocompressori a gas di scarico a geometria variabile, un sistema di ricircolo dei gas di scarico, una valvola parzializzatrice dell'aria aspirata, un catalizzatore trivalente e una trappola antiparticolato. La conseguenza immediata di tale cambiamento è la necessità di identificare il comportamento di un maggior numero di sistemi strettamente

interconnessi e questo porta a un inevitabile aumento del numero di test sperimentali necessari per la corretta calibrazione del motopropulsore.

Il periodo di tempo in cui si è verificato questo cambiamento è stato molto breve, meno di un decennio, e ciò non ha consentito un adeguamento di pari entità sul fronte delle tecnologie impiegate nella sperimentazione sui motori. La struttura di una sala prove non è cambiata molto in dieci anni: gli strumenti hanno avuto uno sviluppo limitato, nonostante la tecnologia dei semiconduttori e dell'informatica nello stesso lasso di tempo abbiano mostrato novità significative, tra cui i microprocessori multi-core e i dispositivi FPGA (Field Programmable Gate Array).

Una risposta alla necessità di abbreviare i tempi e i costi della sperimentazione sui motopropulsori sarebbe possibile riducendo la necessità di effettuare analisi a posteriori, su dati precedentemente acquisiti, a fronte di una maggior quantità di calcoli effettuati in tempo reale. Ciò permetterebbe di avere informazioni sull'esito di un determinato test, durante l'esecuzione del test stesso, consentendo di adattare i parametri di prova in funzione del comportamento del sistema sotto esame. Un'altra possibilità derivante dall'avere un sistema di analisi combustione in tempo reale sarebbe la possibilità di automatizzare le prove, definendo funzioni obiettivo da ottimizzare rispettando determinati vincoli. Un esempio di tale procedura è la determinazione della mappa di anticipo accensione ottimale in un motore a benzina: potendo disporre della PMI e di un indice di detonazione, calcolati in tempo reale, sarebbe possibile automatizzare la prova facendo variare l'anticipo fino a determinare il valore di coppia massima (oppure minimo consumo, o altro ancora) e al tempo stesso mantenere il livello di detonazione entro limiti di sicurezza.

La strumentazione tipica di una sala prove, tuttavia, non si presta facilmente a un approccio di quel tipo. Essendo infatti costituita da dispositivi eterogenei (oscilloscopio, sistema di controllo banco, strumento di analisi combustione), ciascuno specificamente progettato per svolgere una gamma limitata di funzioni, risulta difficile sfruttare in modo organico le informazioni prodotte da ciascuno strumento. I protocolli di scambio dati, quando presenti, sono spesso incompatibili e le informazioni disponibili sono limitate e non modificabili.

Un altro limite che affligge l'attuale tecnologia impiegata nel campo della sperimentazione sui motori è l'impossibilità di effettuare test a bordo veicolo. La strumentazione è progettata per utilizzi da banco: è difficile convertirla per un uso in vettura e ancora di più per l'uso su mezzi di dimensioni ancora più ridotte (motocicli, autovetture da corsa).

L'attività svolta nel triennio di dottorato di ricerca, è stata imperniata principalmente sullo sviluppo e l'implementazione di algoritmi di analisi combustione basati sul segnale di pressione in camera di combustione, specificamente progettati per essere eseguiti in tempo reale. Particolare attenzione è stata posta sulla scelta dell'hardware su cui implementare gli algoritmi di analisi. Esso infatti non è specifico per uso automotive, ma si è scelto di usare una piattaforma per usi generali (industriali, medici, militari, ecc...) avente particolari caratteristiche: deve essere aperto, modulare e aggiornabile.

Il termine aperto si riferisce a diverse proprietà. Una piattaforma aperta deve permettere l'implementazione di codice generico, senza particolari vincoli o restrizioni e deve essere programmabile in diversi linguaggi.

La modularità riguarda la possibilità di adattare la complessità dell'hardware, quindi anche il costo, ai requisiti dell'applicazione che deve essere implementata. Questo in termini di capacità di calcolo, numero di canali di acquisizione dati, dimensione e tipo di alimentazione. Questi due ultimi aspetti riguardano in maniera specifica la possibilità di realizzare un sistema utilizzabile a bordo veicolo (dimensioni e pesi ridotti e alimentazione a 12V).

L'aggiornabilità garantisce la possibilità di mantenere al massimo livello tecnologico la piattaforma di calcolo, allontanandone l'obsolescenza e i costi di sostituzione. Questa proprietà si traduce nella necessità di mantenere la compatibilità tra hardware e software di generazioni differenti, rendendo possibile la sostituzione di quei componenti che limitano le prestazioni senza riprogettare il software.

Tutte queste caratteristiche, a tutt'oggi, non sono presenti in nessuna piattaforma specifica di tipo automotive, ma sono disponibili in alcune piattaforme generiche che, grazie ai volumi di produzione molto maggio-

ri, possono seguire da vicino lo sviluppo della tecnologia informatica ed elettronica di massa e sfruttarne le elevate prestazioni.

Alla base di tutto, la piattaforma di sviluppo deve soddisfare un altro requisito, più importante di quelli sopracitati: la semplicità. Chi ha avuto il compito di svolgere il presente lavoro, e chi ne porterà avanti lo sviluppo in futuro, non è uno specialista nella programmazione di sistemi informatici e nemmeno un esperto di elettronica, pertanto l'ambiente di sviluppo deve consentire di mantenere a fuoco l'obiettivo principale, ovvero l'analisi combustione, senza distogliere troppe risorse in attività di secondaria importanza, quali possono essere l'ottimizzazione del software o lo sviluppo di hardware dedicato.

L'attività svolta ha portato alla realizzazione di un sistema integrato di analisi combustione in tempo reale attualmente operativo nella sala prove dell'Università di Bologna.

Per dovere di sintesi, nella descrizione del lavoro svolto, si danno per scontate tutte quelle nozioni di carattere generale sui motori a combustione interna e sulla combustione, mentre saranno approfonditi gli argomenti più specifici affrontati.

Capitolo 1

La scelta della piattaforma hardware e software

Prima di affrontare la stesura degli algoritmi di calcolo per implementare un sistema di analisi combustione è stato ritenuto opportuno effettuare la scelta della piattaforma hardware che avrebbe dovuto eseguire tali calcoli. Questo permette di sviluppare gli algoritmi avendo già chiaro ciò che è possibile fare e ciò che non è consentito per via di vincoli strutturali dipendenti dall'hardware. In questo modo è possibile ottimizzare gli algoritmi per una specifica struttura di calcolo e ottenere fin da subito un buon livello di prestazioni, anziché ragionare in termini generali e dover poi modificare profondamente il codice per garantire i requisiti sulla piattaforma scelta. Queste considerazioni valgono principalmente per l'hardware, tuttavia, dato che ogni sistema di calcolo dispone di strumenti di sviluppo dedicati, si riflette anche sull'ambiente software.

I requisiti principali che l'hardware e il software debbono garantire sono i seguenti:

1. Capacità di eseguire calcoli di basso livello campione per campione, quindi a frequenze molto più elevate di quella di combustione;
2. Capacità di eseguire calcoli complessi con frequenza di ciclo;
3. Capacità di eseguire calcoli statistici relativi a un numero di cicli motore ampio e di visualizzare su un'interfaccia operatore tutte le grandezze di interesse;

4. Garantire l'esecuzione in tempo reale e il calcolo delle grandezze derivanti dall'analisi della combustione entro il ciclo motore successivo a quello di calcolo;
5. Essere modulare ed espandibile;
6. Avere diversi fattori di forma per potersi meglio adattare ai diversi ambiti operativi, per esempio essere imbarcabile a bordo veicolo;
7. Essere aggiornabile con l'evolversi della tecnologia mantenendo la compatibilità col software preesistente;
8. Consentire il riutilizzo di codice già sviluppato in linguaggi di programmazione diversi, per esempio Matlab e Simulink;
9. Avere costi contenuti, sia come hardware che come strumenti di sviluppo;
10. Non richiedere conoscenze di programmazione di basso livello.

I requisiti sopracitati sono di carattere generale ma sono comunque difficili di soddisfare tutti contemporaneamente. Tuttavia la conoscenza pregressa dei sistemi di acquisizione dati e controllo di National Instruments ha facilitato la ricerca. Il requisiti più difficili da realizzare sono il primo e il quarto, ovvero di poter manipolare ciascun dato di pressione alla frequenza di acquisizione e di produrre risultati in tempo utile per essere usati, eventualmente, per retroazionare il sistema di controllo motore. Tali requisiti sono strettamente collegati, in quanto impediscono di fatto la possibilità di eseguire i calcoli su pacchetti di dati relativi a diversi cicli motore, ma impongono l'esecuzione ciclo per ciclo. Una possibile soluzione sarebbe di usare dispositivi DSP (Digital Signal Processing), tuttavia ciò sarebbe in conflitto con alcuni requisiti, in particolare il numero 10. I DSP infatti sono normalmente programmati con linguaggi di programmazione testuali come il "C" e richiederebbero una conoscenza specifica del particolare dispositivo usato.

La tecnologia dei semiconduttori ha recentemente portato allo sviluppo di una nuova classe di dispositivi programmabili, gli FPGA, acronimo

di Field Programmable Gate Array. Questi circuiti integrati si differenziano da tutti quelli sviluppati precedentemente perché permettono l'esecuzione di algoritmi definiti dall'utente che vengono implementati in hardware, anziché in software. E' un concetto nuovo e di comprensione non immediata, ma un paragone con un microprocessore può aiutare a chiarirne le peculiarità. Un microprocessore dispone di una unità di calcolo e di una serie di istruzioni che può eseguire. Queste istruzioni sono eseguite sequenzialmente e ogni unità di calcolo può eseguire tipicamente una sola istruzione per volta. Qualora sia necessario eseguire calcoli paralleli un sistema operativo real-time si occupa di rendere seriali tali operazioni e di garantire i requisiti temporali imposti, in modo trasparente all'utente. Un chip FPGA non dispone di unità di calcolo e di un set limitato di istruzioni che può svolgere, ma è costituito da milioni di celle elementari capaci di implementare semplici logiche combinatorie. Il modo in cui vengono interconnesse le unità elementari definisce l'algoritmo implementato. Questo elimina il vincolo di esecuzione seriale su un'unica unità di calcolo, ma permette l'esecuzione parallela e distribuita dei calcoli, garantendo che ogni blocco di codice non interferirà sugli altri. Questo rappresenta un enorme vantaggio e garanzia nell'implementazione di sistemi real-time, che devono rispettare determinati requisiti temporali.

Il problema di questa soluzione è ancora una volta il linguaggio di programmazione, il VHDL (VeryHighSpeedIntegratedCircuits Hardware Description Language), che è di basso livello e di difficile apprendimento. Recentemente National Instruments ha messo sul mercato una serie di schede di acquisizione dati basate su FPGA, compatibili con il linguaggio di programmazione LabView, un ambiente di sviluppo grafico ad alto livello che non richiede conoscenze specifiche di linguaggi di programmazione testuali. La disponibilità di tale classe di schede è stata determinante nella scelta di adottare hardware e software prodotti da National Instruments.

Per assolvere al meglio tutti i compiti ai vari livelli, campione per campione, su base combustione e interfaccia operatore, si è scelto un architettura multilivello, composta da sistemi hardware specifici per ogni

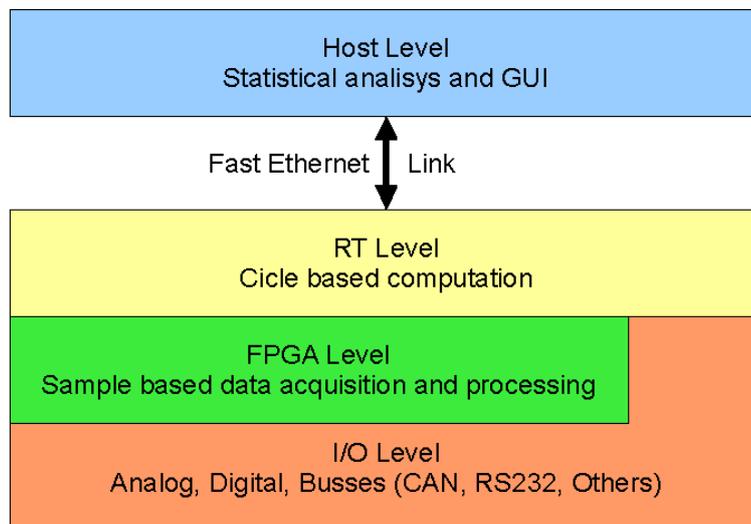


Figura 1.1 - Schema dell'architettura hardware

ambito. Come anticipato, al più basso livello è presente hardware basato su FPGA, che si occupa di elaborare i dati man mano che vengono acquisiti. Il livello intermedio, che deve produrre risultati ad ogni ciclo motore, deterministicamente, è affidato ad hardware real-time, ovvero composto da un microprocessore unito ad un sistema operativo certificato per esecuzione in tempo reale, ovvero in grado di garantire il completamento dei calcoli entro determinate finestre temporali. L'ultimo livello, il più alto, dedicato all'elaborazione sulle statistiche e alla visualizzazione dei risultati in modo grafico, ha necessità di svolgere una notevole mole di calcoli, senza però avere scadenze temporali stringenti. Può quindi essere affidato ad un normale personal computer, dotato di processori di ultima generazione e sistema operativo Microsoft Windows.

Nello schema in figura 1.1 è visibile un altro livello, relativo all'interfacciamento con il mondo esterno. Esso è connesso sia alla parte FPGA che alla parte RT, ciò riflette la possibilità da parte dei diversi livelli di accedere alle risorse di acquisizione e generazione dati. Il livello più alto non è fisicamente connesso con alcun segnale proveniente dal sistema sotto osservazione, i.e. il motore, ma comunica attraverso un'interfaccia Fast Ethernet con il processore RT scambiando tutte le informazioni di cui necessita.

1.1 Modularità e fattori di forma

I requisiti 5, 6 e 7, fanno riferimento alla modularità, all'espandibilità e all'aggiornabilità del sistema in funzione delle diverse esigenze. Queste caratteristiche, se implementate, permettono di adottare sempre la miglior configurazione hardware per assolvere il tipo di analisi richiesta. Si potrebbe pensare di usare una configurazione capace di assolvere ai requisiti più stringenti, in termini di prestazioni, numero di canali, espandibilità, tuttavia questa sarebbe sovrabbondante nella maggior parte dei casi, con conseguenti maggiori costi e maggior complessità. Si è cercato invece di utilizzare una classe di dispositivi, caratterizzati da prestazioni diverse, capaci di eseguire gli stessi algoritmi software senza necessità di adattamenti particolari.

1.1.1 La piattaforma PXI

L'architettura PXI è concettualmente simile a quella di un PC da tavolo, composta da uno chassis, da una scheda madre che ospita il processore e da una serie di schede di espansione. Tuttavia il PXI è uno standard industriale, caratterizzato da elevata robustezza e tolleranza a condizioni ambientali estese, che lo rende più adatto all'ambiente di sala prova rispetto a un normale PC. Non è uno standard proprietario di NI, pertanto sono disponibili soluzioni compatibili da diversi produttori.

Gli chassis sono disponibili in diversi fattori di forma, in funzione del numero di slot di espansione disponibile, variabili da 4 a 12. Inoltre, sono diversificati in base ai limiti di temperatura operativa e in base alla rumorosità emessa dal sistema di raffreddamento. Lo chassis ha anche il delicato compito di garantire la sincronizzazione di tutti i moduli inseriti. Questo compito è svolto da una serie di connessioni che propagano un segnale di clock a 10MHz tra le schede presenti. Le prestazioni garantite sono di accuratezza di 25ppm (parti per milione), fluttuazione inferiore a 5ps e sfasamento tra gli slot inferiore a 250ps.

Ogni chassis ospita un processore real-time con sistema operativo Vx-Works certificato. Il processore si occupa della comunicazioni con tutte le schede installate e con l'interfaccia operatore tramite una connessione



Figura 1.2 – Esempio di sistemi PXI

Ethernet. Sono disponibili moduli RT con diversi livelli di prestazioni, fino alla più recente tecnologia multicore, sia Intel che AMD, che garantisce prestazioni eccellenti e capacità di calcolo parallelo. Il sistema operativo implementa un sistema di priorità che consentono di privilegiare l'esecuzione di certe sezioni di codice a scapito di altre meno importanti. Ogni modulo RT dispone di connessione di rete, USB, RS232 e GPIB.

Per quanto riguarda il livello FPGA, una configurazione su bus PXI garantisce la massima varietà di opzioni. Una scheda FPGA si differenzia per numero di unità logiche e numero di connessioni di I/O. Il numero di unità elementari vincola la complessità dell'algoritmo implementabile, maggiore sarà il numero di celle logiche disponibili, maggiore sarà la complessità del codice che il chip può eseguire. Il numero di porte di ingresso/uscita limita il numero di canali disponibili per l'acquisizione dei segnali e quindi il numero di cilindri del motore sotto test. Sono disponibili schede con 4 oppure 8 ingressi analogici a 200kHz, adatti al campionamento del segnale di pressione, con risoluzione di 16bit. Se i requisiti lo richiedono è sempre possibile installare più di una scheda FPGA all'interno di uno chassis PXI e moltiplicare la potenza di calcolo e di campionamento. I moduli FPGA di National Instruments sono in grado di eseguire cicli di calcolo alla frequenza di 40MHz.



Figura 1.3 – Scheda dotata di processore Real Time

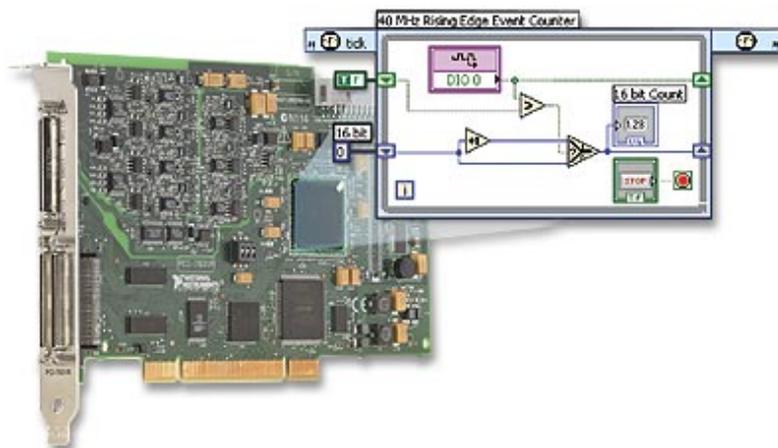


Figura 1.4 – Scheda FPGA

In una struttura basata su bus PXI è possibile inserire altre schede di comunicazione o acquisizione dati fino all'occupazione di tutti gli slot disponibili. Le necessità più comuni sono quella di implementare un'interfaccia CAN-Bus, comune nel mondo automotive, acquisire segnali a bassa frequenza. Diversi produttori mettono a disposizione centinaia di tipologie di schede di acquisizione e interfaccia che permettono di assolvere senza problemi ai requisiti del presente progetto.

Per via delle dimensioni, l'architettura PXI trova la sua collocazione privilegiata nella sala prova motori di un centro di ricerca, in cui i requisiti prioritari sono di prestazioni ed espandibilità, mentre l'imbarcabilità e i costi hanno minor peso.

1.1.2 La piattaforma CompactRIO

La piattaforma CompactRIO ha molte analogie con la controparte PXI, però in un fattore di forma assai ridotto e con standard di affidabilità ancora maggiori, che la rendono ideale per applicazioni a bordo veicolo. Tuttavia è più limitato in termini di potenza di calcolo ed espandibilità. Il costo è generalmente inferiore a un sistema equivalente su bus PXI.

Un sistema CompactRIO dispone di un processore real time con sistema operativo VxWorks certificato. L'unità di calcolo è di classe PowerPC con frequenze di clock fino a 600MHz, pertanto non garantisce lo stesso livello di prestazioni della controparte in versione PXI. Il processore RT comunica con i moduli di I/O tramite il chip FPGA presente nello chassis. Sono presenti interfacce Ethernet, USB e RS232.

Lo chassis in un sistema CompactRIO svolge le stesse funzioni della versione PXI, ovvero rende disponibili una serie di slot di espansione, ma include al suo interno un dispositivo FPGA. Tale dispositivo comunica con tutti i moduli di acquisizione e generazione dati e con il processore tramite una veloce interfaccia DMA (Direct Memory Access). Anche in questo caso, esso lavora alla frequenza di clock di 40MHz. Gli chassis si differenziano per numero di slot di I/O e per la dimensione del chip FPGA presente.

La disponibilità di moduli di I/O è abbastanza vasta, anche se non raggiunge i livelli presenti in un'architettura PXI, e permette di assolvere



Figura 1.5 – Sistema CompactRIO

ai requisiti del presente progetto. Dal punto di vista dell'acquisizione del segnale di pressione, sono disponibili moduli a 4 canali a campionamento simultaneo a 100KHz, con risoluzione di 16bit.

I sistemi CompactRIO, per le loro ridotte dimensioni e robustezza, sono all'uso in applicazioni a bordo veicolo, ma sono indicati anche per installazioni fisse in sala prova.

1.1.3 Il computer Host

I livelli FPGA e RT hanno il compito di eseguire i calcoli delle grandezze relative alla combustione entro il ciclo motore successivo, questo per poter eventualmente utilizzare tali informazioni per scopi di controllo. Il compito dell'interfaccia utente ha finalità molto diverse. Essa deve visualizzare tutti i dati raccolti, sintetizzarli tramite analisi statistiche e memorizzarli su un supporto di memorizzazione per successive rielaborazioni. Questi compiti non devono necessariamente essere eseguiti ciclo per ciclo, possono essere eseguiti con frequenza più bassa, l'importante è che tutti i dati vengano elaborati nel tempo a disposizione, senza accumulare coda. Per questo non sono imposti requisiti temporali stringenti, ma è richiesta una grande capacità di calcolo per processare la mole di dati generata dai livelli sottostanti.

Privilegiando quindi la potenza di calcolo, la scelta della piattaforma hardware da dedicare al compito di interfaccia utente ricade su computer fissi o portatili di ultima generazione, dotati di processori multicore ad elevata frequenza e con ampia capacità di memorizzazione dati. La connessione con il livello RT avviene tramite interfaccia Fast Ethernet, comunemente presente in tutti i computer.

1.2 L'ambiente di sviluppo

L'ultimo requisito citato all'inizio del capitolo, il numero 10, è forse quello più importante ai fini della possibile realizzazione del presente progetto. E' infatti necessario potersi concentrare sullo sviluppo degli algoritmi senza doversi preoccupare troppo degli aspetti tecnici della scrittura del codice. Questo sarebbe impossibile usando strumenti di sviluppo tradizionali, come i linguaggi di programmazione testuali a basso e medio livello, come il "C". E' importante dedicare la maggior parte del tempo alla ricerca nell'ambito dell'analisi combustione in tempo reale, piuttosto che alle modalità con cui scrivere il codice da fare eseguire all'elaboratore.

E' altresì importante poter lavorare in un ambiente di sviluppo comune, in grado di gestire i livelli FPGA, RT e Host allo stesso modo, piuttosto che dover apprendere l'uso di strumenti di sviluppo dedicati.

Fortunatamente l'ambiente LabView soddisfa in gran parte tali requisiti, rendendo possibile la programmazione di alto livello di tutti i componenti hardware, con la stessa sintassi, seppur con alcune limitazioni.

Come si vede nella figura 1.6, le parti di codice relative ai diversi livelli dell'applicazione, sono raggruppati all'interno di un "progetto". In questo modo è possibile lavorare sugli algoritmi mantenendo sempre uno sguardo d'insieme e correggendo eventuali incoerenze rapidamente.

LabView è definito un linguaggio di programmazione grafico, dato che non è necessario scrivere linee di codice, salvo in casi molto particolari. Gli algoritmi sono implementati come diagrammi costituiti da blocchi interconnessi. Ogni blocco rappresenta una funzione, mentre le connessioni rappresentano il flusso delle informazioni. Ogni pezzo di codice è chia-

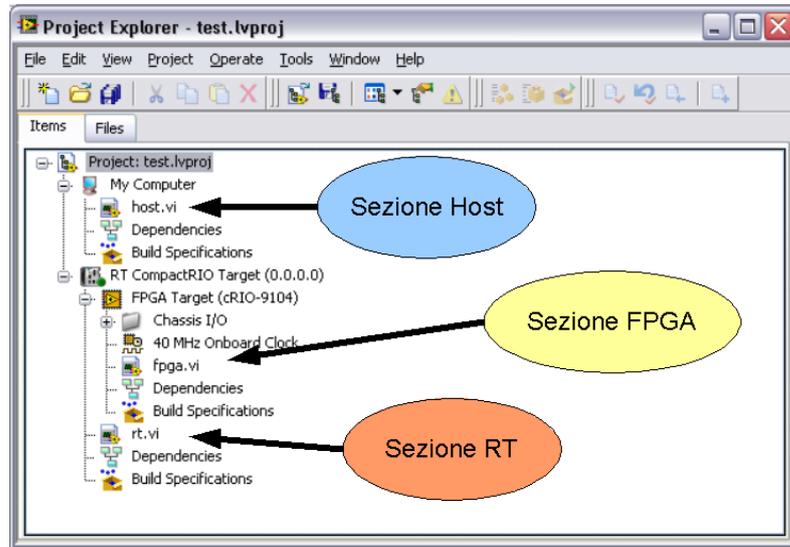


Figura 1.6 – Ambiente di sviluppo LabView

mato VI (Virtuale Instrument) ed è costituito da due parti fondamentali: il pannello frontale e il diagramma a blocchi.

Il pannello frontale, rappresenta l'interfaccia di quel particolare elemento di programma con l'utente, oppure con altre parti del programma. Le informazioni sono rappresentate in modo grafico con indicatori numerici, analogici, tabelle, grafici e altro.

Il diagramma a blocchi invece rappresenta il codice vero e proprio. Gli elementi presenti sul pannello frontale sono visibili come variabili di ingresso e uscita. Nell'esempio riportato nelle figure 1.7 e 1.8, i controlli "Amplitude" e "Cycles" sono ingressi della funzione "Sine Pattern", mentre il grafico "Sinusoidal Pattern" ne rappresenta l'uscita.

La parte interessante è che la stessa sintassi si applica indipendentemente dall'hardware su cui il software dovrà essere eseguito. E' quindi necessario apprendere un solo strumento di sviluppo per poter interagire in ambiente Windows, RT e FPGA. Alcune limitazioni sono tuttavia presenti e dipendono dall'hardware di esecuzione. La più vincolante riguarda l'ambito FPGA che è limitato all'esecuzione di calcoli in aritmetica intera o a virgola fissa.

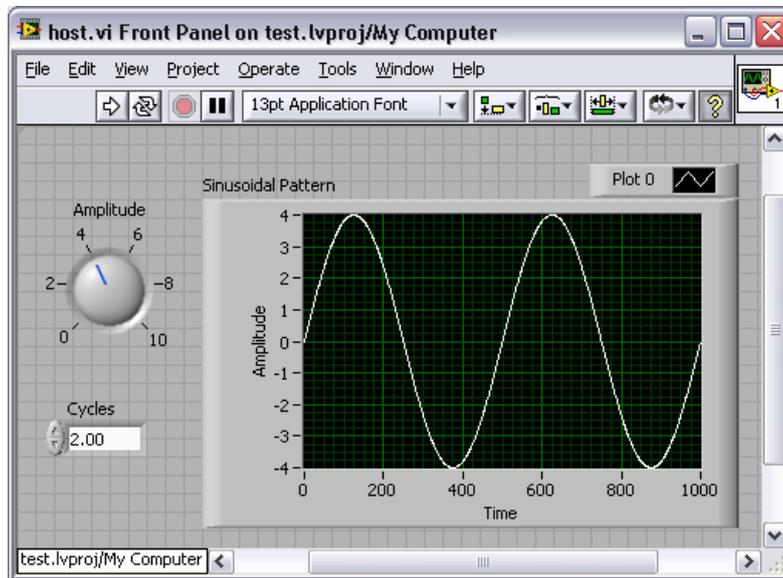


Figura 1.7 – Esempio di pannello frontale

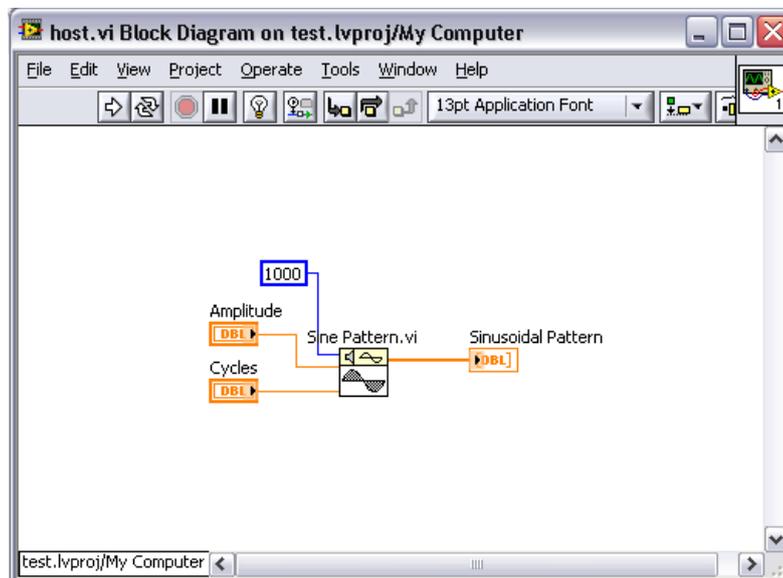


Figura 1.8 – Esempio di diagramma a blocchi

Capitolo 2

Il campionamento dei segnali

2.1 Acquisizione basata su encoder ottico incrementale

Come riportato nell'introduzione la totalità dei sistemi commerciali di analisi combustione si basano sul campionamento del segnale di pressione in camera di combustione a passo angolare costante. Il riferimento angolare, in inglese trigger, usato dal sistema di acquisizione è normalmente fornito da un encoder ottico montato solidalmente all'albero motore. La risoluzione dell'encoder, ovvero la distanza angolare tra i riferimenti, determina il numero di campioni di pressione che saranno acquisiti ad ogni giro di albero. Per ottenere un riferimento assoluto è presente un segnale di riferimento giro, che serve appunto per rendere assolute le posizioni angolari fornite dal sensore. Questo tipo di sensori ha ottime caratteristiche:

- il principio di misura è ottico, pertanto ha una intrinseca elevata immunità ai disturbi di tipo elettrico;
- la dinamica è ottima, con tempi di ritardo inferiori al μs , indipendentemente dal regime di rotazione;
- la risoluzione fisica è fino a 0.5° , moltiplicabile elettronicamente fino a 0.025° mediante un'estrapolazione attuata dalla centralina di condizionamento e conversione segnale.

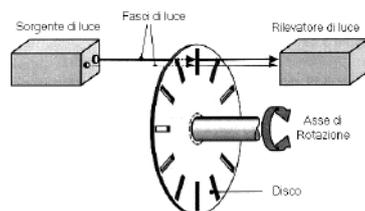


Figura 2.1 - Encoder ottico incrementale

I maggiori difetti sono:

- costo elevato, dato che è composto da un disco ottico di altissima precisione, un fotoemettitore/ricevitore veloce e una centralina di conversione del segnale da ottico ad elettrico;
- difficoltà di installazione, dato che occorre predisporre una flangia direttamente sull'albero motore, operazione difficile e a volte impossibile, come nelle applicazioni a bordo veicolo;
- elevata fragilità, specialmente in applicazioni caratterizzate da un elevato livello di vibrazioni e/o elevati regimi di rotazione.

Le suddette caratteristiche rendono l'encoder adatto all'uso solamente in ambienti di ricerca caratterizzati da un'elevata disponibilità economica, limitatamente all'uso in sala prove. Le dimensioni e la tipologia di installazione ne precludono l'uso a bordo veicolo.

Tuttavia esiste un fattore di carattere metodologico che rende le misure di pressione effettuate su base encoder, quindi con campionamento a passo angolare costante, inadatte all'uso all'interno di un sistema completo di analisi e diagnosi combustione. Dato che per diagnosi e analisi combustione non si intende solamente l'analisi del ciclo indicato, ma anche la valutazione del livello di detonazione e rumorosità di combustione, appare evidente l'inadeguatezza di una misura su base angolare. Essendo infatti i fenomeni della detonazione e del rumore di combustione dipendenti principalmente dalle caratteristiche geometriche della camera di combustione, questo si traduce in un'eccitazione di determinate frequenze caratteristiche nel segnale di pressione. Risulta quindi preferibile

un'acquisizione su base tempo che rende molto più facile il passaggio al dominio delle frequenze, essendo il periodo di campionamento costante e noto.

La scelta di effettuare il campionamento a frequenza fissa pone in essere un altro problema, ovvero quello di conoscere la posizione angolare di ciascun campione per poter ricostruire il ciclo indicato e poter quindi valutare tutte le grandezze derivate, come la PMI, la curva di rilascio di calore e i relativi indici sintetici. Occorre anche stabilire quale sia la frequenza di campionamento minima, necessaria per effettuare valutazioni accurate.

2.2 Acquisizione a frequenza costante

Per determinare quale sia la minima frequenza di campionamento necessaria per ottenere informazioni accurate occorre esaminarne singolarmente l'impatto su ogni famiglia di grandezze: detonazione, PMI e rilascio di calore.

Le frequenze eccitate dalla detonazione sono strettamente correlate con le dimensioni e la forma della camera di combustione e con il posizionamento del sensore di pressione. A seconda delle diverse tipologie di motori, le frequenze di interesse sono generalmente comprese tra i 5kHz e i 25kHz, considerando le prime due armoniche. Per acquisire l'intera dello spettro interessato dal fenomeno occorre quindi considerare una frequenza minima pari al doppio della massima frequenza osservabile (Teorema di Nyquist-Shannon), nell'ipotesi ideale che non esistano componenti nel segnale al di sopra dei 25kHz. Nella realtà il segnale di pressione presenta componenti armoniche fino alla frequenza di risonanza del sensore stesso, intorno ai 100kHz. Per evitare di incorrere negli effetti dell'aliasing è preferibile campionare ad una frequenza superiore a quella di Nyquist avendo cura di inserire nella catena di misura, a monte del campionamento, un filtro anti-aliasing. Nello specifico, volendo salvaguardare le informazioni contenute al di sotto dei 25kHz e considerando di avere a che fare con segnali e filtri reali è ipotizzabile effettuare un filtraggio passa-basso intorno ai 30kHz e campionare a frequenza superiore

a 60kHz (in funzione della pendenza della curva di roll-off del filtro) il segnale di pressione. In questa configurazione non sono da sottovalutare gli effetti del filtro in termini di ritardo e sfasamento del segnale.

Per quanto riguarda la PMI, sono presenti in letteratura[6] ricerche che dimostrano che, per essere valutata correttamente, sono necessarie un numero di rilevazioni della pressione sufficienti a ricostruire la seconda e quarta armonica di combustione. Per un motore a quattro cilindri in linea con combustioni equispaziate questo si traduce nella necessità di effettuare il campionamento quattro volte al giro, ovvero ogni 90° di rotazione dell'albero di manovella, dato che la combustione eccita l'armonica numero 2. Tale requisito però risulta essere troppo stringente, perché la presenza di armoniche superiori di ampiezza non nulla, porterebbe ad aliasing. Inoltre, è applicabile a curve di pressione in cui non siano presenti né disturbi elettrici né disturbi dovuti a fenomeni d'onda localizzati (e.g. oscillazioni di pressione dovute alla chiusura delle valvole). Dato che il segnale di pressione verrebbe campionato poche volte al ciclo, l'inquinamento di uno solo dei campioni avrebbe effetti macroscopici sul risultato. D'altro canto non è realistico pensare di poter avere a disposizione un segnale esente da rumore. Anche in questo caso risulta efficace filtrare il segnale per eliminare le componenti con frequenza superiore a quelle caratteristiche di combustione. Considerando un motore con combustioni equispaziate, è possibile definire la frequenza di combustione come

$$f_{comb} = \frac{RPM}{60} \cdot \frac{2n}{\tau}$$

con n pari al numero di cilindri e τ il numero di corse per ciclo. Per valutare la frequenza di taglio del filtro, occorre considerare la necessità di conservare le informazioni relative a un certo numero di armoniche superiori a quella base, f_{comb} . Considerando quindi come obiettivo, la valutazione della PMI in un motore da competizione di categoria F1, caratterizzato dall'avere 8 cilindri a V di 90° con un regime di rotazione massimo di 18000RPM, si ottiene

$$f_{comb} = \frac{18000}{60} \cdot \frac{16}{4} = 1200 [Hz]$$

Volendo conservare le prime 4 armoniche di combustione, occorre impostare un filtro passa-basso con frequenza di taglio di poco superiore ai 4800Hz a seconda dell'attenuazione. In questo modo si eliminano effettivamente gran parte delle componenti spurie dovute sia al rumore elettrico che alle oscillazioni di pressione e sarebbe quindi applicabile la metodologia descritta all'inizio del paragrafo.

Per la valutazione della curva di rilascio di calore si possono fare considerazioni analoghe a quelle fatte per la PMI, per ciò che riguarda il filtraggio passa-basso del segnale, tuttavia non è sufficiente effettuare poche rilevazioni per ciclo. Questo perché occorre descrivere la curva di rilascio di calore con una risoluzione angolare elevata. Dalla curva di rilascio di calore andranno ricavati indicatori, come la posizione del 50% della frazione di massa bruciata, con precisione nell'ordine di 0.1°. Anche considerando la possibilità di interpolare la curva di rilascio di calore, è comunque necessaria una risoluzione nell'ordine di un grado, valore adottato comunemente per valutazioni su base encoder. Per valutare la frequenza minima di campionamento derivante dalla suddetta ipotesi, occorre stabilire la velocità di rotazione del motore. Prendendo come obiettivo ancora un motore tipo F1, la frequenza associata ad una risoluzione angolare di un grado di albero di manovella è

$$f_{camp} = \frac{RPM}{60} \cdot \frac{360}{res} = \frac{18000}{60} \cdot 360 = 108000 [Hz]$$

Effettuando la sintesi dei requisiti per analisi detonazione, valutazione PMI e rilascio di calore, occorre effettuare il campionamento almeno alla frequenza più alta richiesta da ogni caso preso singolarmente. I valori erano: 60kHz per la detonazione, inferiori a 4800Hz per la PMI e 108kHz per la determinazione della curva di rilascio di calore. Il valore minimo necessario risulta essere quindi di poco superiore ai 100kHz, nell'ipotesi ambiziosa di dover effettuare valutazioni su motori al massimo livello di prestazioni come quelli di F1. Per motori meno estremi i requisiti diventano meno stringenti, soprattutto quello relativo al rilascio di calore, direttamente collegato alla massima velocità di rotazione del motore. Il valore della frequenza di campionamento va comunque armonizzato con la disponibilità di hardware capace di soddisfare tale requisito. Per ra-

gioni derivanti anche dalla disponibilità di dispositivi di campionamento adeguati, si è scelto di adottare una frequenza di acquisizione di 100kHz per il segnale di pressione in camera di combustione.

2.3 Determinazione dei riferimenti angolari

Nel paragrafo precedente è stato affrontato il problema della determinazione della corretta frequenza di campionamento del segnale di pressione, la conoscenza dell'andamento del segnale di pressione nel tempo non è sufficiente a effettuare alcuna valutazione sulla combustione, non essendo possibile determinare la posizione del segnale relativamente all'albero motore. Ad esempio, per determinare il diagramma di indicatore occorre la conoscenza di pressione e volume. Essendo il volume funzione solo della geometria e dell'angolo di manovella, il problema diventa l'assegnazione della corretta posizione angolare a ciascun campione. Per effettuare questa operazione occorre acquisire, con un sensore opportuno, l'informazione sulla posizione angolare dell'albero a gomiti e metterla in relazione con il segnale di pressione campionato a frequenza costante. Appare evidente il carattere asincrono della determinazione della posizione angolare rispetto al campionamento a periodo costante.

La soluzione proposta si basa sulla misura precisa del ritardo temporale tra ogni singolo campione e l'istante di passaggio di un certo numero di marcatori angolari rispetto a un riferimento comune. Conoscendo la posizione dei riferimenti e la locazione temporale di ogni campione compreso tra due riferimenti consecutivi, è possibile determinare la posizione del singolo campione per interpolazione.

Nella figura è rappresentato un esempio di successione di riferimenti angolare e campioni di pressioni, nel caso in cui come sensore di posizione angolare si usi una ruota fonica a 60 denti, tipica nel mondo dell'auto. In blu sono indicati gli istanti di passaggio dei riferimenti angolari; in rosso i campioni di pressione acquisiti 100kHz.

Osservando nel dettaglio l'intervallo tra due marcatori angolari successivi, si comprende come sia possibile attribuire ad ogni campione una determinata posizione angolare. Esaminando la situazione riportata in

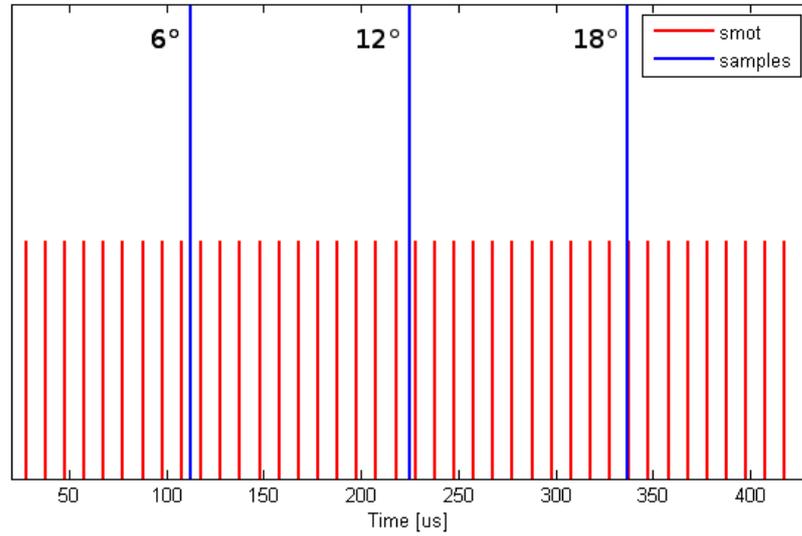


Figura 2.2 - Successione di riferimenti angolari e campioni di pressione

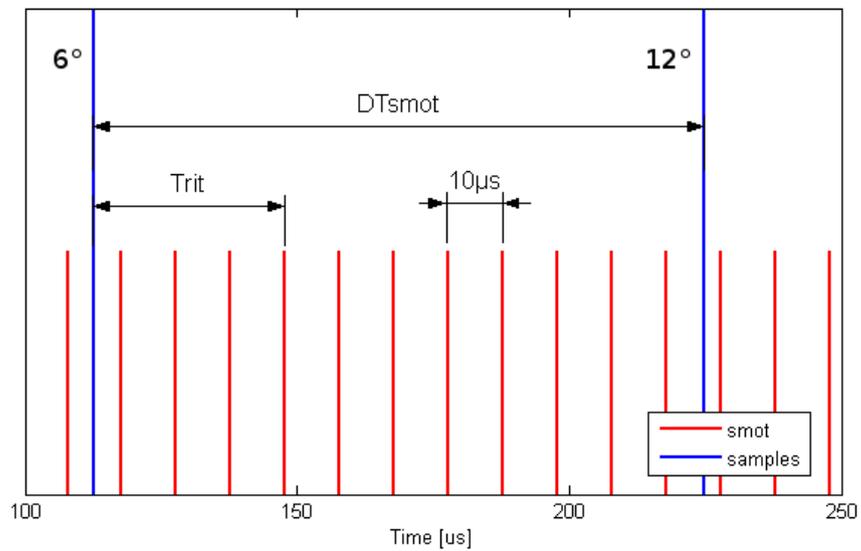


Figura 2.3 - Determinazione della posizione dei singoli campioni

figura 2.3, si può ricavare la posizione angolare del quarto campione dopo il primo riferimento angolare mediante interpolazione. Nell'ipotesi di velocità angolare costante tra due riferimenti successivi, la posizione angolare del campione i –esimo è calcolabile come

$$\vartheta_i = \vartheta_{smot_{k-1}} + (\vartheta_{smot_k} - \vartheta_{smot_{k-1}}) \cdot \frac{Trit_i}{DTsmot_k} \quad (2.1)$$

dove ϑ_{r1} e ϑ_{r2} rappresentano le posizioni angolari dei riferimenti in cui è contenuto il campione i -esimo, $Trit_i$ indica il tempo di ritardo tra il campionamento del campione i -esimo e il passaggio del marcatore angolare precedente e $DTsmot$ rappresenta l'intervallo trascorso tra i riferimenti angolari precedente e successivo.

Occorre soffermarsi sull'impatto delle ipotesi che stanno alla base della metodologia proposta. La prima è quella di considerare costante la velocità di rotazione nell'intervallo compreso tra due riferimenti angolari. L'errore commesso sarà dipendente dal numero di riferimenti angolari e dal livello di oscillazione del regime di rotazione del motore. Un altro aspetto non meno importante è la necessità di conoscere con la migliore accuratezza possibile il tempo di ritardo tra i campioni e i marcatori angolari. Su questo aspetto influisce la granularità della base dei tempi usata che, essendo la piattaforma hardware di tipo digitale, dipenderà dalla frequenza di clock usata dal timer. Inoltre, come accennato in precedenza, la presenza di filtri nella catena di misura della pressione e la dinamica non infinita del sensore di posizione angolare, rendono necessaria la caratterizzazione e la compensazione dei ritardi derivanti dai sistemi di condizionamento del segnale.

2.4 Il numero di riferimenti angolari

Per definire un requisito riguardo al numero minimo di riferimenti angolari, occorre valutare l'incidenza di tale parametro sulla ricostruzione della posizione sull'intero ciclo motore. Per fare ciò, è stato simulato l'andamento di velocità angolare di un ciclo motore caratterizzato da un certo livello di oscillazioni rispetto al valore medio.

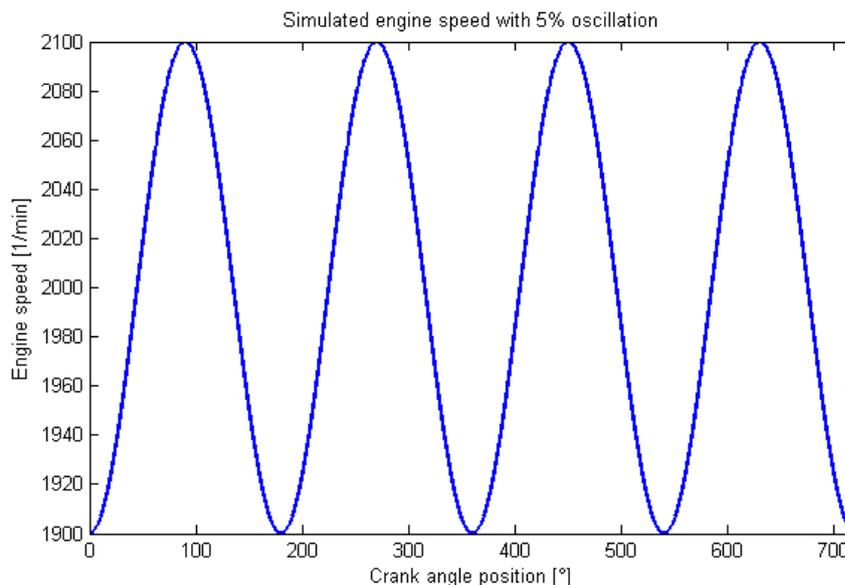


Figura 2.4 – Andamento velocità di rotazione simulato

L'immagine rappresenta l'andamento della velocità di un ciclo motore in funzione dell'angolo di manovella, avente un valore medio di 2000RPM con un'oscillazione sinusoidale del $\pm 5\%$ e periodo 180° . Sono stati presi in considerazione diversi casi al variare della spaziatura angolare dei riferimenti e al variare dell'entità dell'oscillazione. L'andamento della velocità di rotazione, ricostruito in base alla presenza di un insieme limitato di marcatori angolari è rappresentato nella figura seguente.

Risulta evidente come il progressivo calo di risoluzione angolare porti a errori di linearizzazione via via crescenti. L'esempio con riferimenti angolari spazati di 45° può sembrare estremo e poco realistico, ma è riscontrabile nel caso di motori da competizione con elevate velocità rotazionali. I casi di maggior interesse sono quelli con spaziatura angolare pari a 1° , tipico di encoder, e 6° , valore derivante dall'uso di ruote foniche a 60 denti per giro, comunemente presente nei motori da auto prodotte su larga scala. Per avere una valutazione quantitativa di come tale discretizzazione si rifletta sull'errore di posizione è stata ricostruito l'andamento dell'angolo di manovella in funzione del tempo, ottenuto dall'integrazione della velocità di rotazione. E' stato quindi possibile valutare l'errore di posizione angolare rispetto al valore esatto, ottenuto dall'integrazione

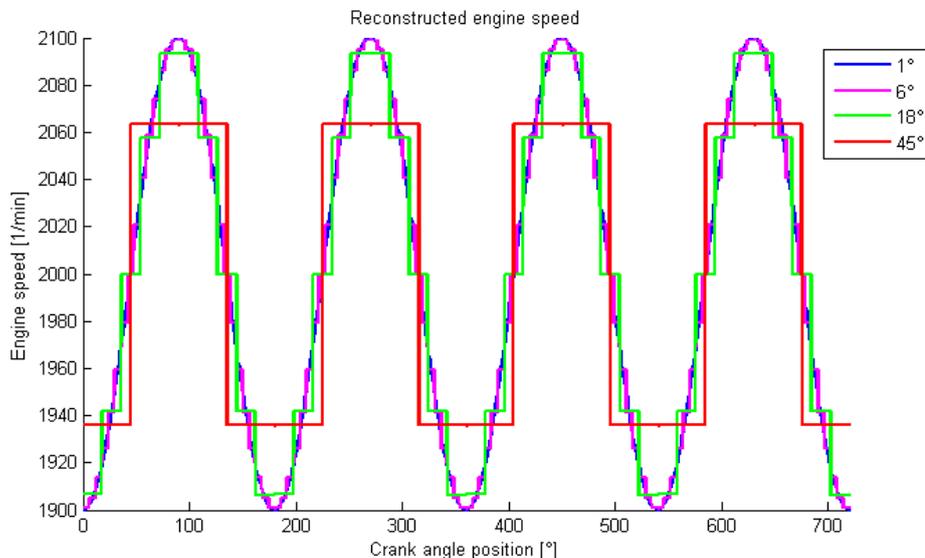


Figura 2.5 – Andamento velocità di rotazione ricostruito

dell'andamento di figura 2.4.

La simulazione è stata ripetuta per diversi valori di oscillazione di RPM, compresi tra 1% e 10%. L'incremento dell'errore di posizione angolare si è dimostrato sostanzialmente lineare con l'entità dell'oscillazione, mentre risulta incrementare esponenzialmente con il ridursi della risoluzione angolare dei riferimenti. L'errore massimo riscontrato nei diversi casi è riportato di seguito.

I risultati sono confortanti riguardo alla possibilità di usare sensori di posizione standard e non costosi e delicati encoder, a patto di non ridurre troppo la risoluzione angolare delle ruote foniche.

2.5 Compensazione dei ritardi

Come già accennato, per poter attribuire la corretta posizione angolare dei campioni di pressioni è necessario poter misurare con precisione il tempo che separa un determinato riferimento angolare e ciascun campione. Per motivi diversi i segnali hanno bisogno di essere trattati prima di essere acquisiti, tanto quelli di posizione quanto quelli di pressione. Ciò prova l'inevitabile introduzione di ritardi nella catena di misura.

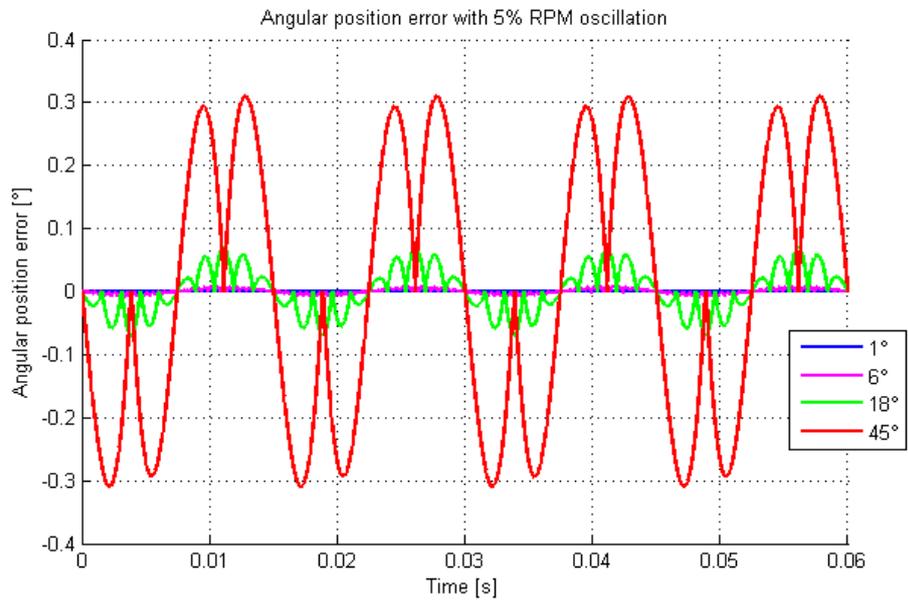


Figura 2.6 – Errore di posizione nel ciclo

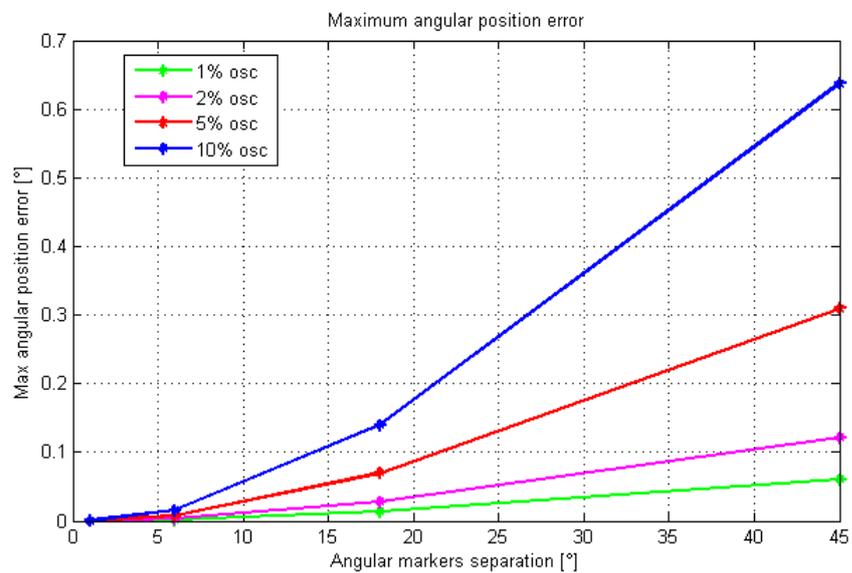


Figura 2.7 – Andamento del massimo errore di posizione in funzione della fluttuazione di RPM e della risoluzione angolare dei riferimenti

2.5.1 I trasduttori di misura della posizione angolare

Il condizionamento dei segnali di posizione è necessario per renderne compatibile l'acquisizione con sistemi digitali e dipende dal tipo di sensore usato. I più comuni sono raggruppabili in tre categorie: ottici, a riluttanza variabile oppure ad effetto Hall.

I sensori ottici Un trasduttore per la misura della posizione ottico è composto da due parti, un emettitore e un ricevitore. Un LED (Light Emitting Diode), tipicamente a luce infrarossa, genera un fascio luminoso orientato verso il disco encoder, parallelamente al suo asse di rotazione. Dalla parte opposta un fotodiode converte in segnale elettrico la radiazione infrarossa incidente. L'alternanza di fessure e materiale opaco, genera una corrente di intensità variabile attraverso il fotodiode, che un opportuno circuito elettronico converte in un segnale in tensione a forma d'onda quadra in uscita dal trasduttore. Le caratteristiche dinamiche del sensore dipendono dal tempo di reazione del LED e del fotodiode, tipicamente inferiori al μs . Questo ritardo non dipende dalle condizioni operative e può essere considerato costante. Il trasduttore richiede alimentazione elettrica a bassa tensione e la sua uscita è di tipo TTL (Transistor-Transistor Logic), pertanto è direttamente interfacciabile con dispositivi di acquisizione digitale.

I sensori magnetici a riluttanza variabile Storicamente i sensori a riluttanza variabile, abbreviato in VRS (Variable Reluctance Sensor), sono stati i primi ad essere impiegati dall'industria automobilistica e tuttora sono i più diffusi. Sono sensori passivi e quindi non richiedono alimentazione esterna per funzionare.

Come si vede nella figura 2.8, è composto da un rotore e da uno statore. La parte rotorica, solidale all'albero motore, è tipicamente una ruota fonica realizzata di materiale ferromagnetico. La parte statorica, il sensore vero e proprio, è un magnete permanente a forma cilindrica, sulla cui parte superiore, vicina alla ruota, poggia un nucleo di materiale ferromagnetico, circondato da un avvolgimento elettrico che forma una bobina. Il movimento della ruota fonica, crea un susseguirsi di denti

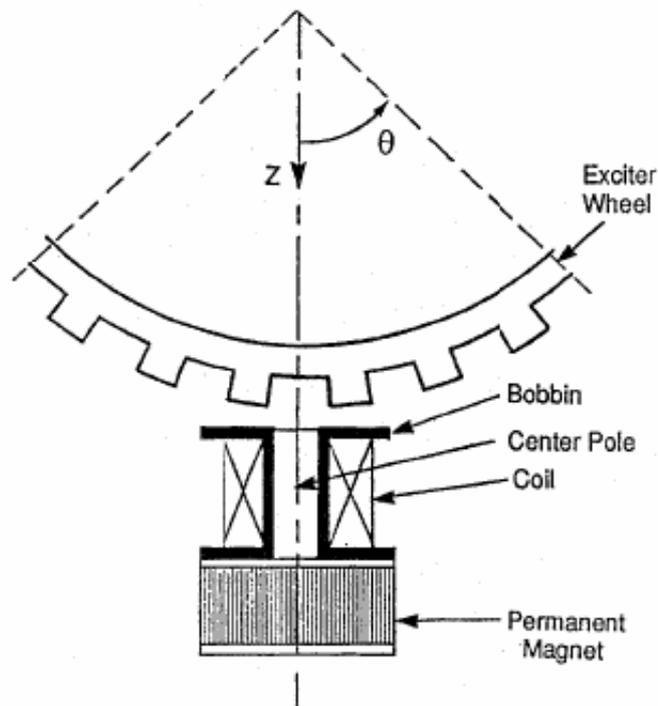


Figura 2.8 - Sensore a riluttanza variabile

e vani che si affacciano al sensore, che si traduce in una variazione di traferro con conseguente variazione della permeabilità magnetica. La permeabilità magnetica può essere espressa come funziona periodica di θ , $\mu(\theta)$, dove l'angolo θ rappresenta la posizione di un riferimento scelto sulla ruota rispetto alla mezzeria del polo del sensore. La permeabilità diventa massima quando il sensore è affacciato a uno dei denti e diventa minima quando si affaccia a un vano. La variazione di permeabilità comporta la variazione della riluttanza del circuito magnetico, cui segue una variazione del flusso magnetico ϕ , secondo la relazione:

$$\phi = \frac{F_m}{\mathfrak{R}} \quad (2.2)$$

dove F_m è la forza magnetomotrice del magnete permanente e \mathfrak{R} la riluttanza magnetica, pertanto ϕ è a sua volta una funzione periodica di θ . Il segnale prodotto da un sensore VRS è la tensione $e(t)$ generata nell'avvolgimento dalla variazione del flusso concatenato globale ψ che,

secondo la legge di Faraday, è esprimibile come:

$$e(t) = \frac{d\psi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\sum_{i=1}^N \phi_i \right] \quad (2.3)$$

in cui ϕ_i indica il flusso concatenato ad ogni singola spira della bobina, pari alla somma del flusso disperso e di quello che attraversa il traferro. I VRS sono progettati appositamente per funzionare con ampi traferri consentendo di allentare le tolleranze di lavorazione.

L'equazione 2.3 mostra la dipendenza della tensione in uscita da $\frac{d\phi}{dt}$ ma:

$$\frac{d\phi}{dt} \propto \frac{d\theta}{dt} \propto \omega$$

si deduce quindi che la tensione in uscita sarà funzione della velocità di rotazione. Non è inusuale raggiungere tensioni picco-picco superiori ai 100V. Questa caratteristica rende necessario l'utilizzo di sistemi di condizionamento del segnale per permetterne l'acquisizione con un sistema digitale.

Per quanto riguarda le caratteristiche dinamiche del sensore, in particolare il ritardo, è stato necessario effettuare prove sperimentali, dato che nessun costruttore fornisce tali informazioni nei datasheet. Questa verifica è molto semplice, se si dispone di un encoder ottico da usare come riferimento. Supponendo noto il ritardo del sensore ottico, in genere è fornito a corredo, ed effettuando misure di posizione angolare a diversi regimi di rotazione, è possibile misurare l'errore di posizione tra il sensore in esame e quello di riferimento. Lo sfasamento angolare è facilmente correlabile con il ritardo del sensore tramite un fattore funzione solamente della velocità rotazionale:

$$Delay \propto \frac{d\theta}{RPM}$$

tipicamente i valori di $d\theta$ si dispongono su una retta a coefficiente angolare positivo, a testimonianza della presenza di un ritardo temporale costante. I valori misurati con diverse tipologie di sensori VRS, variano tra i $10\mu s$ e i $40\mu s$.

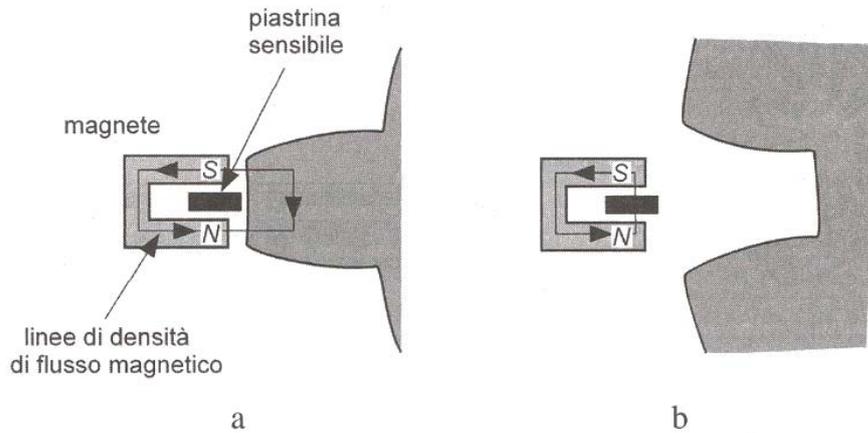


Figura 2.9 - Sensore ad effetto Hall

I sensori ad effetto Hall I dispositivi ad effetto Hall comunemente utilizzati come sensori incrementali di posizione e velocità di un MCI sono del tipo rappresentato in figura 2.9. Il sensore è costituito da un magnete permanente, che porta fra i poli l'elemento sensibile, disposto in prossimità di una ruota fonica, la quale rotazione modula il campo magnetico sviluppato dallo stesso magnete.

L'effetto Hall fu osservato per la prima volta da Eduard H. Hall nel 1879. Secondo questo fenomeno le proprietà elettriche di alcuni materiali dipendono dal campo magnetico al quale sono esposte. Si consideri a tal proposito una lamina, composta da un conduttore, o da un semiconduttore, attraversata da una corrente, i , immersa in un campo magnetico, generato dalla induzione magnetica B , come rappresentato in figura 2.10.

La lamina ha una larghezza D , uno spessore S , e un'altezza L ; la corrente, i , che l'attraversa, è generata da una forza elettromotrice e_y . Le cariche, q , attraversando il campo magnetico, \vec{B} , con una velocità \vec{c}_y , sono soggette alla forza di Lorentz:

$$\vec{F}_B = q \cdot \vec{c}_y \wedge \vec{B}_z$$

Se i vettori \vec{c}_y e \vec{B} sono fra loro ortogonali, la forza \vec{F}_B , per la regola della mano destra, ha la direzione dell'asse x (con riferimento alla figura 2.10) e il verso opposto, per cui le cariche elettriche positive si adden-

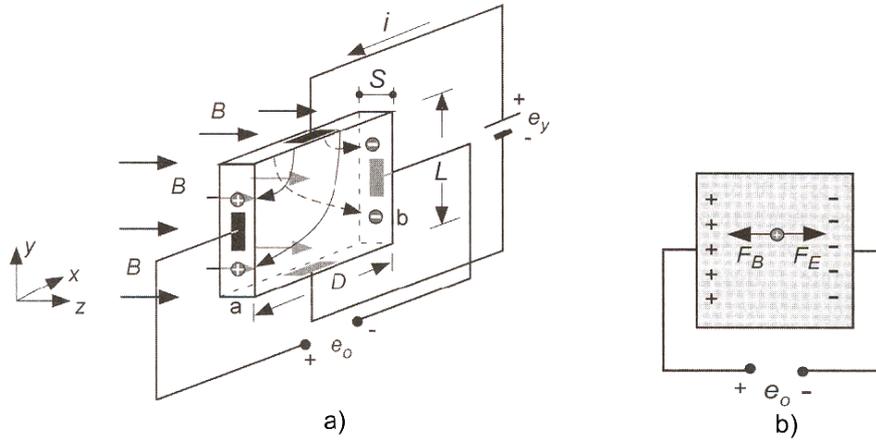


Figura 2.10 – Schematizzazione di un sensore ad effetto Hall

sano sulla faccia *a* della lamina, mentre quelle negative sulla faccia *b*, come mostrato in figura. Questo addensamento di cariche sulle due facce opposte genera all'interno della lamina un campo elettrico, \vec{E}_x , di intensità crescente, man mano che le cariche elettriche si accumulano. Questo campo elettrico esercita su queste cariche una forza, \vec{F}_E , che si oppone a quella prodotta dal campo magnetico. Il fenomeno dell'addensamento delle cariche termina, quando l'intensità della forza elettrica uguaglia quella magnetica, cioè

$$\vec{F}_E = \vec{F}_B \Rightarrow q \cdot E_x = q \cdot c_y \cdot B$$

Tenendo conto della relazione che lega la velocità, \vec{c}_y , delle cariche alla mobilità, μ , delle cariche stesse:

$$\mu = \frac{c_y}{E_y}$$

e delle relazioni che legano il campo elettrico alle dimensioni della lamina:

$$E_y = \frac{e_y}{L} \quad E_x = \frac{e_0}{D}$$

Si ottiene

$$e_0 = \left(\mu \cdot \frac{e_y}{L} \cdot D \right) \cdot B = k \cdot B \quad (2.4)$$

La costante, k , dipende dalla mobilità delle cariche elettriche e dato che questa grandezza è molto maggiore nei semiconduttori, rispetto ai conduttori, nei sensori ad effetto Hall si utilizzano semiconduttori. E' un sensore che necessita di alimentazione e che, per sua intrinseca natura, si interfaccia molto bene con dispositivi elettronici. Il segnale in uscita infatti, ha forma d'onda quadra con tensione compatibile TTL.

Anche per questa tipologia di sensori occorre caratterizzare il ritardo di trasmissione dell'informazione. La metodologia è la stessa indicata nella sezione precedente. La tecnologia costruttiva di questi trasduttori in genere consente prestazioni dinamiche migliori rispetto ai VRS, con ritardi che oscillano tra i $5\mu s$ e i $30\mu s$.

2.5.2 Il circuito di interfaccia

Nel paragrafo precedente sono state messe in luce le principali caratteristiche dei sensori di posizione più diffusi. Prendendo in considerazione il solo aspetto dell'interfaccia con il sistema di acquisizione digitale, occorre ricordare che quelli ottici e quelli ad effetto Hall sono compatibili e quindi interfacciabili direttamente, mentre i VRS, per via della tensione in uscita molto elevata, necessitano di un sistema di condizionamento. Occorre però fare delle considerazioni tenendo conto dell'ambiente all'interno del quale i trasduttori si troveranno ad operare. Sia esso una sala prove da laboratorio, oppure il vano motore in un'auto, non è possibile trascurare l'impatto del rumore elettromagnetico che inevitabilmente avrà un effetto negativo sui segnali. Alcune fonti di disturbo elettromagnetico sono:

- le bobine di accensione nei motori a benzina;
- il sistema di iniezione ad alta pressione nei diesel di ultima generazione;
- il sistema frenante nelle installazioni al banco prova (dinamico o a correnti parassite);

- organi ausiliari (alternatori, ventole, ecc...).

Per evitare che il rumore elettrico possa sovrapporsi al segnale utile e generare false transizioni che verrebbero lette come riferimenti angolari, è opportuno inserire nella catena di misura, anche nel caso di sensori Hall o ottici, dei filtri passa-basso.

Sono stati sviluppati due circuiti elettronici specifici per il condizionamento dei sensori VRS e a effetto Hall. Il primo deve trasformare un'onda di tensione quasi-sinusoidale con ampiezza variabile fino a 100Vpp e media nulla in un'onda quadra 0-5V, compatibile con un sistema di acquisizione digitale. Questa operazione deve essere fatta in modo trasparente a ciò che sta a monte del modulo di condizionamento, per non interferire con altri apparati (e.g. la centralina di controllo motore) che dovessero usare il segnale proveniente dal sensore di posizione. Il circuito prevede un stadio di disaccoppiamento resistivo a impedenza variabile, sia sul segnale che sulla relativa massa. Successivamente un circuito integrato (IC) dedicato esegue la conversione in onda quadra a bassa tensione. Questo IC rileva il passaggio per lo zero del segnale in ingresso e attiva un transistor che porta a massa il segnale in uscita. A questo punto il segnale VRS è stato convertito in un'onda quadra con fase invertita; occorre quindi raddrizzare il segnale. Questo compito è implementato da un fotoaccoppiatore veloce che assolve anche a una funzione di protezione da eventuali sovratensioni degli apparati elettronici a valle. Il circuito di condizionamento garantisce una risposta dinamica elevata, introducendo un tempo di ritardo inferiore a $1\mu s$.

Per quando riguarda il segnale Hall, che si presenta come un'onda quadra a bassa tensione, in genere 0-5V oppure 0-12V, occorre implementare uno stadio di disaccoppiamento e filtraggio con eventuale protezione elettrica per le apparecchiature poste a valle. Il primo compito è realizzato mediante un filtro passa-basso passivo del primo ordine, seguito da un buffer invertente CMOS che rigenera il segnale. Un IC fotoaccoppiatore veloce esegue, anche in questo caso, il raddrizzamento del segnale in uscita, realizzando al contempo una funzione di protezione dalle sovratensioni potenzialmente pericolose. La frequenza di taglio dello stadio di filtraggio è regolabile, tramite una resistenza variabile. Tuttavia, occorre

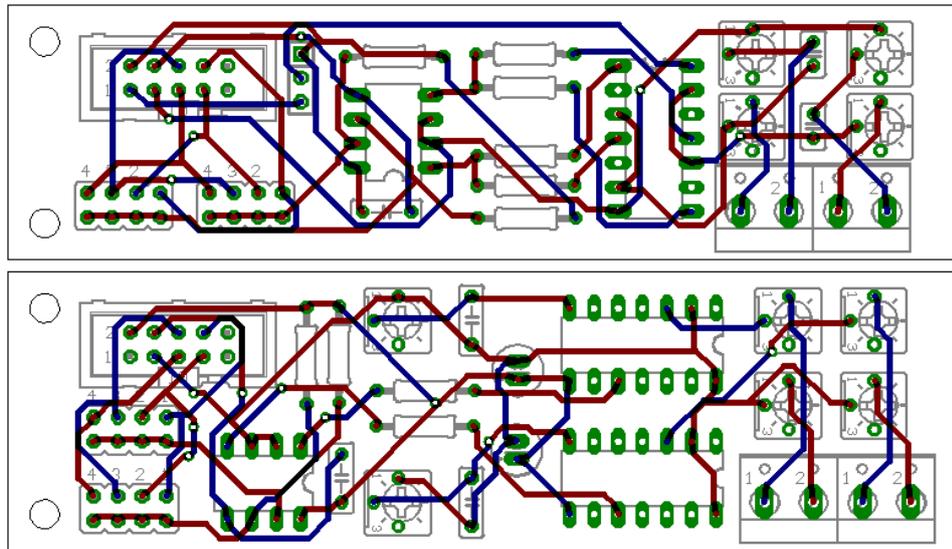


Figura 2.11 – Progetto CAD dei circuiti stampati

considerare che la riduzione della banda passante, oltre ad aumentare l'immunità ai disturbi, accresce il tempo di ritardo di tutto il circuito.

Dal progetto dello schema si è passati alla scelta dei componenti più adatti e alla progettazione del circuito stampato tramite un software di CAD specifico per la realizzazione di circuiti elettronici.

2.5.3 Il condizionamento del segnale di pressione

Finora è stata approfondita la catena di misura della posizione angolare; è possibile fare considerazioni analoghe sul segnale di pressione in camera di combustione. E' stato già anticipato che è indispensabile utilizzare filtri di vario tipo per estrarre al meglio le informazioni contenute nel segnale. Riassumendo i requisiti che tali filtri debbono assolvere sono sostanzialmente tre:

- antialias
- estrarre le frequenze correlate con la detonazione
- isolare le informazioni a bassa frequenza dovute al solo processo di combustione

E' possibile usare approcci diversi per la soluzione del problema, ma occorre scegliere il più efficiente e quello che preserva meglio la qualità delle informazioni. Si potrebbe, per esempio, usare filtri analogici posti a monte dell'acquisitore. Tale soluzione però ha diversi aspetti negativi:

- difficoltà nel cambiare la configurazione dei filtri, in termini di frequenza di taglio, tipo e ordine, in quanto oggetti implementati in hardware;
- necessità di acquisire con un numero di canali doppio, per le basse e le alte frequenze;
- maggior rumore elettrico e distorsione del segnale a cause del maggior numero di apparati nella catena di misura.

La soluzione adottata prevede un solo filtro analogico esterno, di tipo passa-basso con frequenza di taglio fissata a un valore di 30kHz. Questo risolve i problemi derivanti dall'aliasing all'atto del campionamento. E' opportuno selezionare un tipo di filtro che abbia una risposta in fase lineare, ovvero un group delay costante. Tale proprietà assicura che tutte le bande di frequenza subiscano un ritardo costante, in modo da non distorcere il segnale e poter compensare l'effetto del ritardo sulla valutazione delle grandezze di interesse. I filtri che hanno una risposta in fase lineare, almeno nella banda passante, sono quelli del tipo Bessel e Butterworth. A causa della miglior attenuazione, la scelta è caduta su un filtro dell'ultimo tipo. Non è raro trovarsi nella situazione di non dover nemmeno usare un filtro aggiuntivo, dato che molti amplificatori di carica lo prevedono al loro interno.

Le altre funzioni, necessarie per isolare l'informazione sulla detonazione e sulla combustione, vengono meglio implementate con filtri software, che godono di diversi vantaggi rispetto a quelli analogici:

- completamente configurabili, come ordine, tipo e frequenza di taglio;
- la configurazione è modificabile in qualsiasi momento a costo zero;
- non introducono rumore elettrico aggiuntivo;

- limitano l'uso dei canali di acquisizione analogica a uno per sensore e rendono possibile la memorizzazione del dato di pressione grezzo, prima di ogni filtraggio (a parte il filtro di antialias).

Avendo definito la configurazione della catena di misura dei segnali di pressione, occorre caratterizzarla in termini di ritardo introdotto. Per quanto riguarda il filtro antialias analogico il ritardo, ovvero il group delay, è determinabile analiticamente oppure con strumenti numerici, se si conoscono le caratteristiche del filtro: tipo, ordine e frequenza di taglio. La caratterizzazione del ritardo dei filtri digitali, occorre invece considerare anche la natura dell'algoritmo di calcolo, caratterizzata dalla presenza di segnali campionati e dall'uso di matematica in virgola fissa, pertanto soggetta ad errori di troncamento rilevanti. Risulta quindi difficile prevedere il comportamento del filtro a priori ed è preferibile una caratterizzazione sperimentale. Il metodo usato consiste nell'eseguire l'algoritmo su un segnale noto, per esempio una sinusoide, e valutare il ritardo della forma d'onda in uscita, rispetto a quella in ingresso. Questo procedimento è estremamente semplice e può essere eseguito automaticamente ogni volta che vengono modificati i parametri del filtro, i.e.. tipo, ordine, frequenze di taglio e frequenza di campionamento.

2.5.4 Algoritmo di compensazione

Avendo fin qui considerato e caratterizzato le varie cause dell'introduzione dei ritardi, è ora possibile compensarli e annullare quindi gli effetti di tali sfasamenti sull'attribuzione della corretta posizione angolare ai campioni di pressione. Facendo riferimento alla figura 2.3, vediamo come cambia l'algoritmo di assegnazione della posizione angolare.

Nell'equazione 2.1, si nota come la determinazione dell'angolo θ dipenda dalla corretta identificazione del tempo di ritardo tra l'istante di acquisizione del campione i –esimo e il riferimento angolare immediatamente precedente. La figura 2.13 mostra come il tempo di ritardo misurato sia diverso dal tempo di ritardo reale, a causa dei ritardi presenti nella catena di misura. Occorre quindi poter determinare il tempo di ritardo vero. Con la notazione della figura:

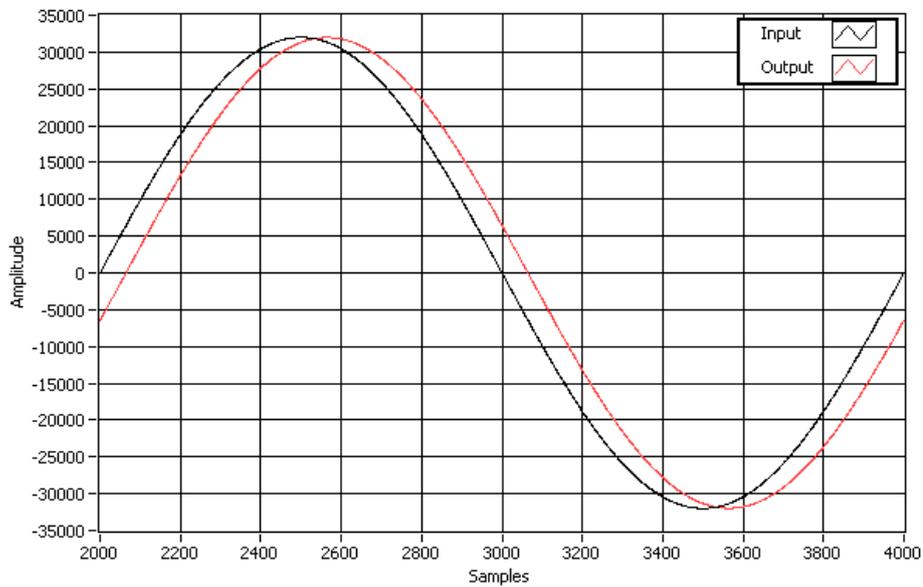


Figura 2.12 - Esempio di caratteristica ingresso-uscita di un filtro passa-basso digitale

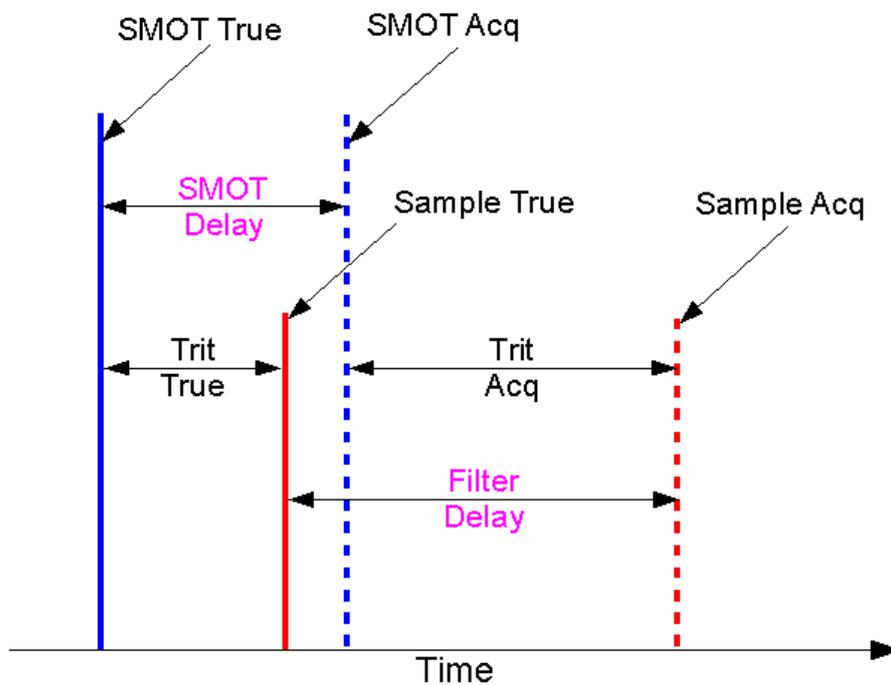


Figura 2.13 - Effetto dei ritardi sui segnali acquisiti

$$Trit_{TRUE} = Trit_{acq} + SMOTDelay - FilterDelay$$

e l'espressione 2.1, si trasforma di conseguenza in:

$$\vartheta_i = \vartheta_{smot_{k-1}} + (\vartheta_{smot_k} - \vartheta_{smot_{k-1}}) \cdot \frac{Trit_{TRUE}_i}{DT_{smot_k}} \quad (2.5)$$

Capitolo 3

Diagnosi detonazione in tempo reale

3.1 Descrizione del fenomeno

La detonazione è un fenomeno caratteristico dei motori ad accensione comandata. Può essere descritto brevemente come l'autoaccensione di una parte della carica accumulata all'interno della camera di combustione prima che sia giunto in fronte di fiamma innescato dalla scintilla. Lo sviluppo di energia che ne consegue è molto più rapido rispetto ad una combustione normale e il conseguente gradiente di pressione è potenzialmente dannoso per il motopropulsore. Le variabili che hanno maggior influenza sull'entità della detonazione sono la temperatura delle pareti della camera di combustione, la velocità di combustione, l'anticipo di accensione, il tipo di combustibile e la pressione in camera. Alcune di queste dipendono a loro volta da altri fattori; la velocità di combustione, per esempio, può considerarsi funzione della turbolenza della carica e del tipo di combustibile usato, mentre la pressione in camera dipende dalla pressione di aspirazione e dal rapporto di compressione. Nell'immagine 3.1 sono rappresentati due cicli di pressione in camera di combustione a parità di condizioni operative, fatta eccezione per l'anticipo di accensione. E' evidente la presenza di un'oscillazione ad alta frequenza nel segnale relativo al ciclo con anticipo maggiore, sintomo del fenomeno detonante.

Tuttavia, contrariamente a quello che si può pensare, la detonazione

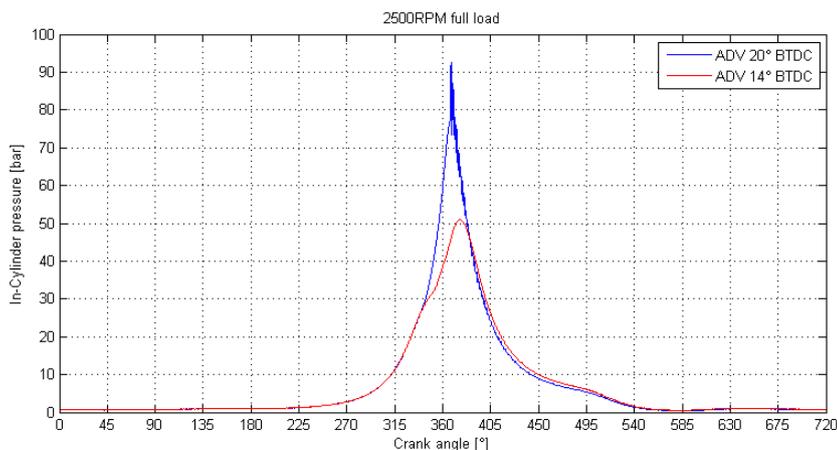


Figura 3.1 – Confronto tra un ciclo motore detonante e uno regolare

non è un fenomeno da evitare a priori, ma piuttosto una condizione da controllare. Spesso accade infatti che la condizione di massima coppia in un determinato punto operativo presenti un certo livello di detonazione. Voler eliminare completamente la detonazione significherebbe rinunciare a una gran parte dell'energia potenzialmente disponibile. Chi ha il compito di effettuare la calibrazione di un motore deve quindi poter valutare la detonazione in maniera quantitativa e fissare una soglia considerata accettabile e tale da non pregiudicare la vita del motore stesso.

Questa parte di analisi combustione ha come scopo principale quello di elaborare uno o più indici quantitativi correlati al fenomeno detonante in tempo reale, per ottimizzare e rendere più veloce il processo di calibrazione di un motore a combustione interna.

La bibliografia è molto vasta su questo argomento, sono stati valutati sperimentalmente anche indici innovativi di validità generale [?, ?, ?], ovvero che non necessitassero di calibrazione per ogni motore a cui dovesse essere applicato. Tuttavia nessuno di tali metodi è stato valutato sufficientemente robusto, pertanto sono stati implementati due degli indici accreditati di maggior robustezza e sensibilità al fenomeno. Uno è l'indice MAPO (Maximum Amplitude of Pressure Oscillation), l'altro è un indice integrale (in seguito KINT). Questi indici sono applicabili a diversi segnali recanti informazioni sulla combustione, come il segnale di

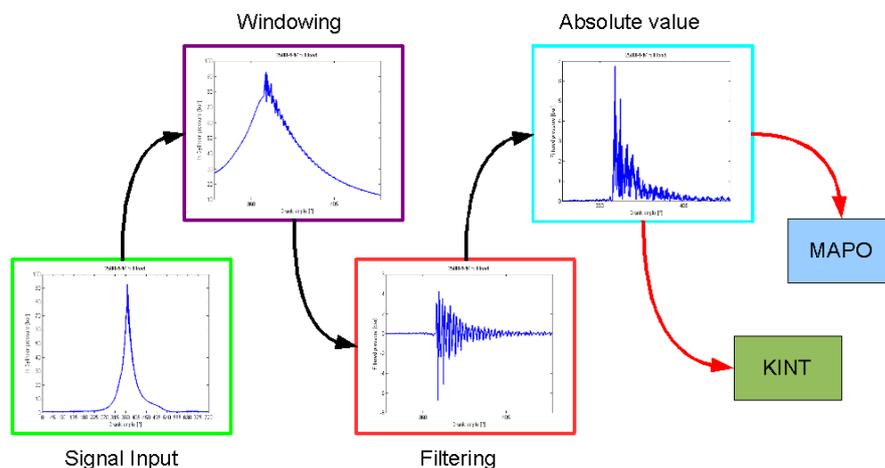


Figura 3.2 – Algoritmo di valutazione indice detonazione

pressione in camera, un segnale accelerometrico o altri come la corrente di ionizzazione.

Uno dei motivi che ha portato a selezionare tali indici è che gli algoritmi di calcolo hanno diverse parti in comune: entrambi prevedono un filtraggio, l'isolamento di una parte dei dati e la valutazione dell'indice.

3.2 Il filtraggio del segnale

Nella figura 3.3 è rappresentata una porzione di cicli di pressione a diversi anticipi di accensione, mantenendo invariate le condizioni di carico e regime di rotazione. Osservandoli si intuisce che la parte di segnale correlata al fenomeno detonante è caratterizzata da un'oscillazione ad alta frequenza. Occorre però poter identificare con precisione le componenti armoniche caratteristiche di un segnale detonante e calibrare un filtro in grado di isolarle. Le considerazioni che vengono fatte in seguito hanno carattere generale e valgono non solo per segnali di pressione in camera, ma anche per segnali provenienti da accelerometri montati sul motore oppure per segnali di corrente di ionizzazione.

Facendo un'analisi in frequenza dei segnali di pressione di una serie di cicli nelle due condizioni riportate in figura 3.3, è possibile apprezzare

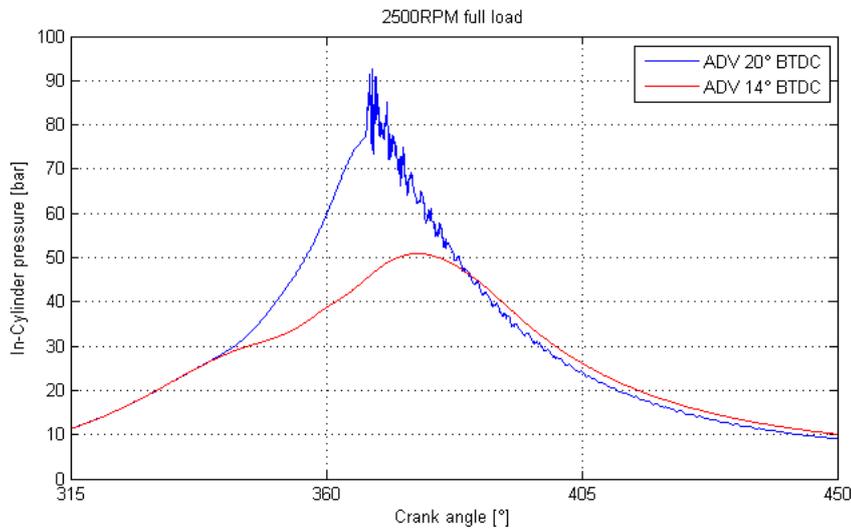


Figura 3.3 – Confronto tra combustione detonante e regolare

come alcune bande di frequenza vengano eccitate solo nelle prove ad elevato anticipo di accensione.

Nell'esempio riportato in figura 3.4 si possono notare diverse armoniche eccitate dalla detonazione intorno a 7kHz, 9kHz, 14kHz e 18kHz. Tutto ciò che è al di sotto dei 5kHz si può considerare dovuto al normale processo di combustione, infatti anche lo spettro della prova a basso anticipo mostra un netto aumento delle ampiezze verso le basse frequenze.

Ricordando lo schema della catena di misura presentato nel capitolo precedente, composto da un filtro analogico passa-basso a 30kHz e da un filtro digitale configurabile, occorre definire il tipo di filtro e la frequenza di taglio di quest'ultimo. Essendo il filtro digitale progettato come IIR, occorre scegliere una tipologia compatibile con tale architettura. La tabella seguente mostra un confronto qualitativo tra i vari tipi di filtri IIR.

Nel caso della detonazione il requisito principale del filtro è quello di avere la massima attenuazione possibile per eliminare tutta la parte di segnale non derivante dalla detonazione. La linearità della fase non è così importante, in quanto non è necessario conoscere con elevata precisione la posizione di ogni campione all'interno del ciclo. Come sarà mostrato in seguito, sarà necessario poter isolare una porzione del ciclo motore senza

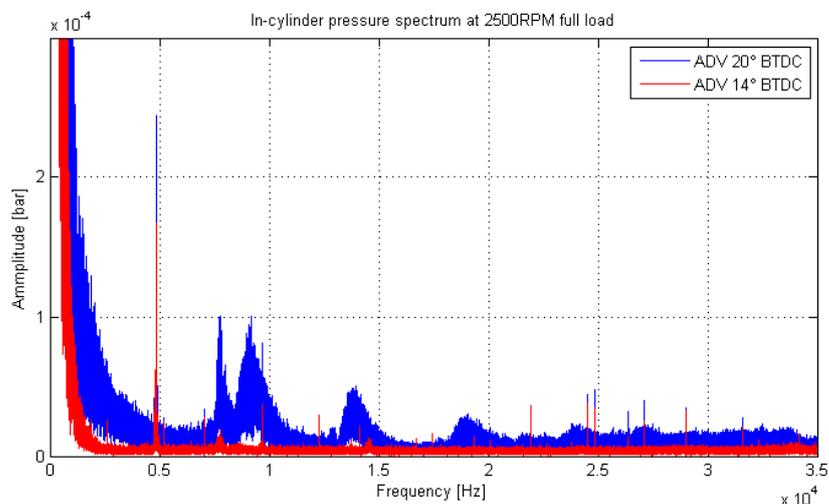


Figura 3.4 – Spettro del segnale di pressione in camera al variare dell'anticipo

Tipo	Risposta in ampiezza	Linearità di fase	Attenuazione	Stabilità numerica
Bessel	Monotona	Ottima	Molto bassa	Ottima
Butterworth	Monotona	Buona	Bassa	Buona
Chebyshev tipo 1	Oscillante nella banda passante - monotona nella banda attenuata	Discreta	Buona	Discreta
Chebyshev tipo 2	Monotona nella banda passante - oscillante nella banda attenuata	Discreta	Buona	Discreta
Ellittico (Cauer)	Oscillante	Bassa	Ottima	Bassa

Tabella 3.1 – Caratteristiche dei filtri IIR

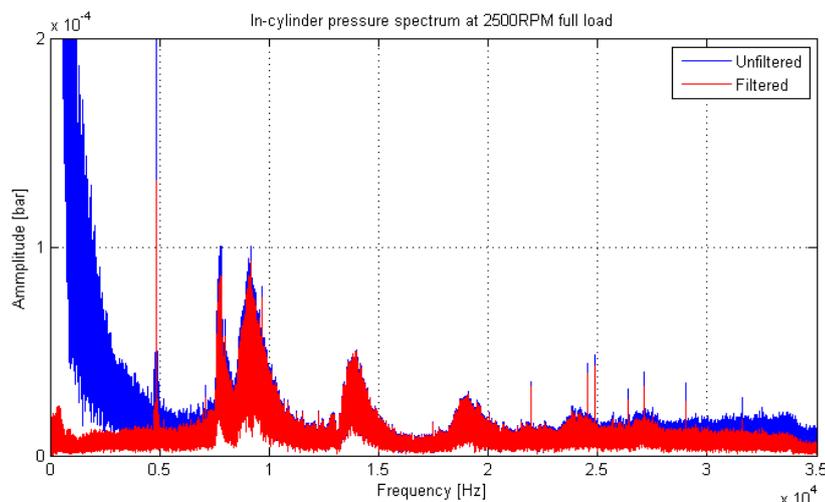


Figura 3.5 – Effetti del filtraggio sullo spettro del segnale di pressione (HP Butterworth)

grande precisione. Una caratteristica che invece è importante, in questo particolare progetto, è la stabilità numerica. Occorre ricordare che i filtri sono implementati in logica FPGA, pertanto non è possibile utilizzare aritmetica in virgola mobile. Ciò impone maggior attenzione agli aspetti numerici, in particolare agli errori di troncamento e alla perdita di cifre significative. Tra tutte le tipologie di filtri presentati, la scelta più logica è quella di adottare l'architettura di Butterworth oppure Chebyshev, che sono un buon compromesso tra attenuazione e stabilità numerica. Questa scelta non è comunque definitiva, dato che l'implementazione del filtro passa-alto e puramente software, sarà possibile modificarne il tipo semplicemente cambiando un parametro di configurazione. La frequenza di taglio andrà calibrata in funzione del tipo di motore, del tipo di segnale e delle modalità di installazione dei sensori. Volendo usare come esempio i dati presentati nella figura 3.4, un valore di primo tentativo della frequenza di taglio può essere di 6kHz. Nella figure seguenti sono visualizzati gli spettri del segnale di pressioni prima e dopo il filtraggio con passa-basso analogico a 30kHz e passa-alto digitale a 2 poli Butterworth a 6kHz in un caso e Chebyshev a 7kHz nell'altro.

Gli effetti delle due metodologie sono simili, anche se si nota un lieve vantaggio a favore del filtro di Chebyshev. Nonostante la frequenza di

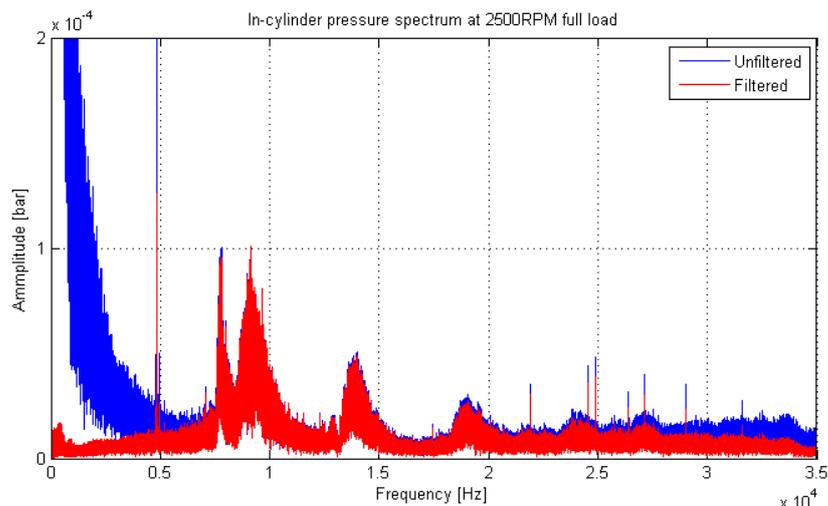


Figura 3.6 – Effetti del filtraggio sullo spettro del segnale di pressione (HP Chebyshev)

taglio più alta (7kHz invece di 6kHz) riesce a preservare meglio le informazioni della prima frequenza di risonanza e ad ottenere una miglior attenuazione. In entrambi i casi comunque si ottiene l'effetto di enfatizzare le bande di frequenza di interesse ai fini della diagnosi detonazione. In figura 3.7 sono rappresentati due cicli di pressione filtrati; risulta evidente la capacità del processo di filtraggio di enfatizzare gli effetti della detonazione, rendendone possibile una valutazione quantitativa.

Dopo aver effettuato il filtraggio del segnale occorre selezionare la porzione su cui applicare il calcolo degli indici di detonazione. Questo passo non è strettamente necessario, ma contribuisce ad aumentare il rapporto segnale rumore in quei casi in cui sono presenti forti perturbazioni al di fuori della zona di combustione vera e propria. Questi fenomeni sono generalmente dovuti alla chiusura delle valvole di aspirazione e scarico, che generano onde di pressione che si propagano all'interno della camera di scoppio. Specialmente nei motori da competizione, caratterizzati da elevati regimi di rotazione, questi disturbi possono assumere ampiezze notevoli, in grado di rendere qualsiasi indice assolutamente insensibile al fenomeno detonante, se applicato a tutto il ciclo. Un esempio di questa condizione è riportato nelle figura 3.8.

Intorno ai 180° prima del PMS di combustione è visibile un disturbo

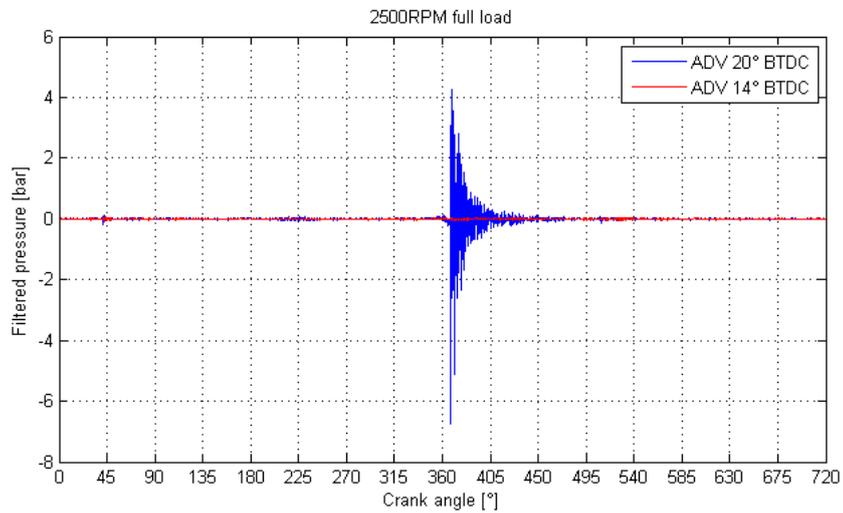


Figura 3.7 - Cicli di pressione filtrati a confronto

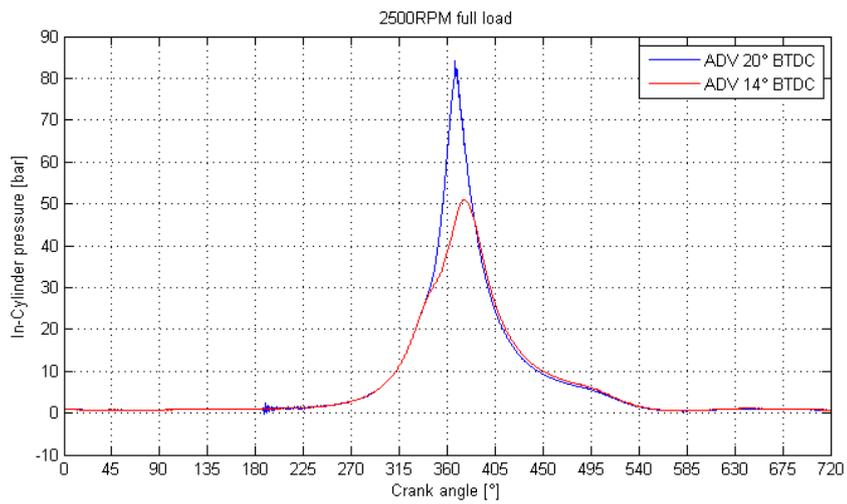


Figura 3.8 - Esempio di rumore di chiusura valvole

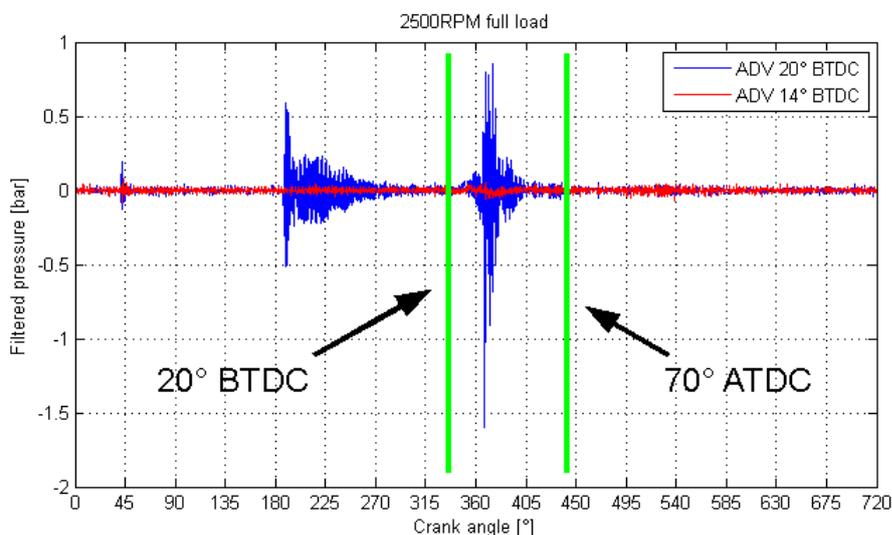


Figura 3.9 – Effetti del rumore di chiusura valvole sul segnale filtrato

sul segnale di pressione. Può sembrare di lieve entità, rispetto all'ampiezza del segnale di pressione, però occorre valutarne il peso rispetto al segnale filtrato.

Il disturbo risulta avere un'ampiezza paragonabile a quella del contributo dovuto alla combustione e renderebbe difficile effettuare valutazioni sulla detonazione incipiente. E' comunque sufficiente prendere in considerazione solo una porzione del segnale di pressione filtrato, contenente solo la fase di combustione, per isolare il problema mantenendo elevato il rapporto segnale rumore. In figura 3.9 è evidenziata una banda che inizia 20° prima del PMS e finisce 70° dopo, in grado di isolare le informazioni necessarie alla valutazione degli indici di detonazione.

3.3 Descrizione degli indici di detonazione

3.3.1 MAPO (Maximum Amplitude of Pressure Oscillation)

L'indice MAPO è quello maggiormente diffuso e accettato sia in ambito accademico che industriale ed è spesso usato come riferimento qualora sia

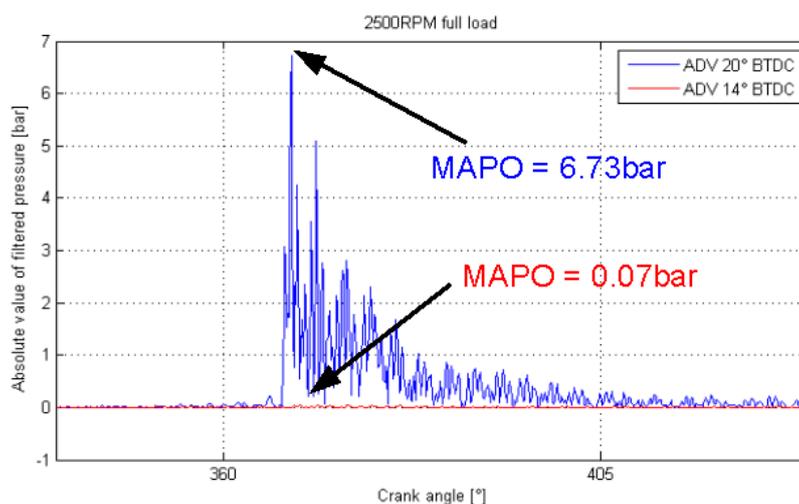


Figura 3.10 – Calcolo del MAPO

necessario confrontare il comportamento di diversi motori in termini di detonazione. E' definito come il massimo del valore assoluto del segnale di pressione filtrato, valutato all'interno di una finestra che comprenda la combustione.

$$MAPO = \max(\text{abs}(P_{\text{filt}}))$$

La figura 3.10 mostra i risultati dell'applicazione dell'algoritmo ai dati rappresentati in figura 3.3.

La natura puntuale dell'indice MAPO impone che il segnale di base sia sufficientemente pulito e privo di picchi dovuti al rumore elettrico. Un singolo impulso elettrico all'interno della finestra di combustione non sarebbe eliminato completamente dai filtri e porterebbe ad una possibile falsa diagnosi. Una possibile fonte di rumore capace di alterare la valutazione del MAPO è la scarica della candela di accensione, qualora i cablaggi non fossero accuratamente schermati. Quando applicato a segnali di buona qualità, come il segnale di pressione in camera di combustione, tipicamente ha un ottimo rapporto segnale rumore e quindi una buona sensibilità al fenomeno (Vedi figura 3.11).

3.3.2 KINT (Knock Integral)

Il secondo indice implementato è di tipo integrale; a differenza del MAPO non è costituito da un solo valore puntuale ma deriva dall'integrazione di una porzione del segnale. E' definito come l'integrale su una determinata finestra angolare contenente la combustione del valore assoluto del segnale filtrato. Ovvero:

$$KINT = \frac{\sum_{StartW}^{EndW} abs(Pfilt)}{NC}$$

Essendo implementato in forma tempo-discreta, l'integrale assume la forma di una sommatoria. Inoltre nell'espressione di KINT è presente una divisione per il numero di campioni presenti nella finestra definita dalle due posizioni angolari $StartW$ e $EndW$, che ha lo scopo di normalizzare il valore dell'indice. La normalizzazione è necessaria perché al variare del regime di rotazione, varia il numero di campioni racchiusi nella finestra di calcolo, essendo il campionamento a frequenza costante.

Questo indice è più robusto del MAPO per quanto riguarda l'immunità ai disturbi elettromagnetici che potrebbero sovrapporsi al segnale, dato che, per sua natura, l'operatore integrale è sensibile al valor medio delle ampiezze. Però, al contrario del MAPO, la scelta della finestra angolare su cui effettuare il calcolo assume maggiore importanza. Per illustrare l'effetto dell'ampiezza e della posizione angolare della finestra di osservazione sul rapporto segnale rumore sono stati eseguiti i calcoli di KINT con diverse configurazioni della finestra di calcolo. Per ogni configurazione è stato valutato il rapporto segnale rumore definito come:

$$SNR = \frac{KINT_{knock}}{KINT_{norm}}$$

dove con $KINT_{knock}$ si è indicato l'indice integrale relativo ad una prova ad anticipo elevato e con $KINT_{norm}$ l'indice di una prova senza detonazione. I dati presentati nella figura seguente sono relativi a 100 cicli, acquisiti nella sala prove dell'Università di Bologna su un motore Fire 1.2L a 2500RPM a pieno carico, con anticipo accensione di 14° e 20°.

Risulta evidente come un'errata calibrazione della finestra di anali-

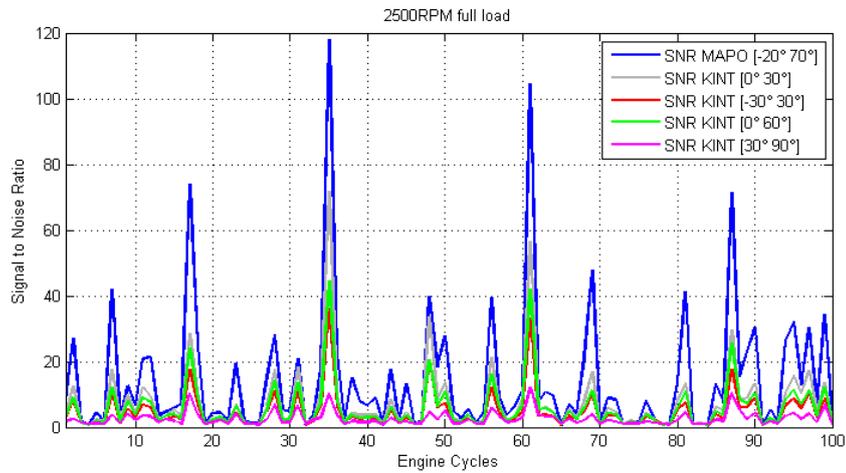


Figura 3.11 – Variazione del SNR al variare della finestra di analisi

si possa compromettere l'efficienza dell'algoritmo. Ciò rappresenta una criticità in più rispetto al MAPO, che oltretutto dimostra un miglior rapporto segnale rumore su tutta la prova. L'indice KINT è comunque preferibile in presenza di segnali rumorosi come sono in generale quelli provenienti da sensori accelerometrici usati in campo automotive.

Capitolo 4

Analisi indicating in tempo reale

4.1 Il recupero della componente media del segnale di pressione

L'analisi della combustione che si è scelto di implementare è basata sul segnale di pressione in camera di combustione, dato che possiede un elevato contenuto informativo. I sensori di pressione tipicamente usati nell'ambito della ricerca sono di tipo piezoelettrico e necessitano di un amplificatore di carica per poter funzionare. Il segnale in uscita dall'amplificatore ha la caratteristica di essere a media nulla, viene quindi perduta una parte dell'informazione: il valore medio. La maggior parte delle metodologie di analisi combustione sono basate sulla valutazione del ciclo indicato, pertanto è necessario conoscere il valore assoluto della pressione in ogni punto del ciclo. Esistono diversi modi per recuperare il valore medio del segnale di pressione; quelli sviluppati e implementati sono i seguenti: pressure referencing a valore fisso, pressure referencing con MAP (Manifold Pressure) e il metodo della politropica.

Il metodo del pressure referencing a valore fisso consiste nell'imporre che la pressione misurata dal sensore in un certo punto del ciclo assuma un valore predefinito. La base teorica che supporta questo metodo è che in quella parte di ciclo che si svolge a valvole aperte, di aspirazione o

di scarico, la pressione in camera sia molto simile a quella dell'ambiente esterno alla camera di combustione. E' un metodo pratico, usato soprattutto nei motori aspirati, ma è intrinsecamente approssimativo, in quanto il valore della pressione regnante all'esterno della camera non è misurato ma è considerato costante pari a un valore stabilito a priori. Solitamente si fissa come valore di riferimento la pressione di 1 bar alla fine della corsa di aspirazione, ovvero 180° prima del PMS di combustione. Questa ipotesi è ragionevole in caso di prove a pieno carico nei motori a benzina, oppure per motori diesel aspirati senza ostruzioni nel condotto di aspirazione. Tuttavia porta a commettere un errore rilevante in tutti gli altri casi, i.e. in condizioni di parzializzato nei motori con farfalla e in caso di sovralimentazione. Esso è comunque usato perché è di semplice implementazione e non richiede l'utilizzo di sensori aggiuntivi.

Il pressure referencing basato sul segnale di pressione collettore (MAP) è simile a quello esposto nel paragrafo precedente, con la differenza che il valore di riferimento non è imposto a priori ma è letto da un sensore di pressione posto nel collettore di aspirazione. Questo permette di ridurre di molto l'incertezza sul valore assoluto assunto dalla pressione in camera, si suppone infatti che la pressione nel cilindro alla fine della corsa di aspirazione sia uguale a quella regnante nel plenum di aspirazione. La contropartita della miglior stima del valore della pressione è la necessità di utilizzare un sensore di pressione aggiuntivo che deve essere a sua volta campionato.

Il metodo della politropica non sfrutta l'ipotesi che la pressione in camera di combustione possa essere messa in relazione con quella esterna in qualche punto del ciclo, ma si basa sull'osservazione del solo segnale di pressione nel cilindro. Si fa l'ipotesi che nella parte di compressione che si svolge a valvole chiuse la legge che lega pressione e volume sia di tipo politropico, ovvero

$$p \cdot V^\gamma = \text{costante}$$

valutando l'espressione in due punti nella fase di compressione e considerando che la pressione è affetta da un errore di offset, si ha

$$(p_1 + offset) \cdot V_1^\gamma = (p_2 + offset) \cdot V_2^\gamma$$

e quindi

$$offset = \frac{p_2 \cdot V_2^\gamma - p_1 \cdot V_1^\gamma}{V_1^\gamma - V_2^\gamma}$$

la pressione è nota essendo misurata, il volume è ricavabile in funzione dell'angolo di manovella e dei parametri geometrici del motore (alesaggio, corsa, lunghezza biella e rapporto di compressione)

$$V_i = \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{s}{Rc - 1} + L \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i \cdot \frac{s^2}{4L^2}} \right) + \frac{s}{2} (1 - \cos \theta_i) \right) \quad (4.1)$$

mentre γ è incognito ma può solamente essere stimato. La gamma di valori usati comunemente varia tra 1.30 e 1.37, a seconda della tipologia di motori e del tipo di iniezione (diretta o indiretta).

Questo metodo fornisce generalmente una stima sufficientemente accurata, ma la rumorosità del segnale di pressione può causare errori macroscopici, dovuti al fatto che la valutazione dell'offset è basata sulla misura di una sola coppia di valori di pressione e volume, pertanto se anche un solo dei punti è affetto da errore la stima risulta errata. Per mitigare questo effetto è possibile effettuare la valutazione dell'offset usando un numero maggiore di coppie di valori e considerare poi il valor medio

$$offset = \frac{\sum_{i=1}^n offset_i}{n}$$

Nella figura 4.1 sono apprezzabili le differenze tra il metodo del riferimento a valore fissato e quello della politropica. Il ciclo di pressione riportato è relativo a una prova su motore diesel sovralimentato a pieno carico. Sono evidenti i limiti del referencing a valore fisso, che non è in grado di recuperare completamente l'offset del segnale, mentre con il metodo della politropica si raggiungono accuratissime nell'ordine di 100mbar.

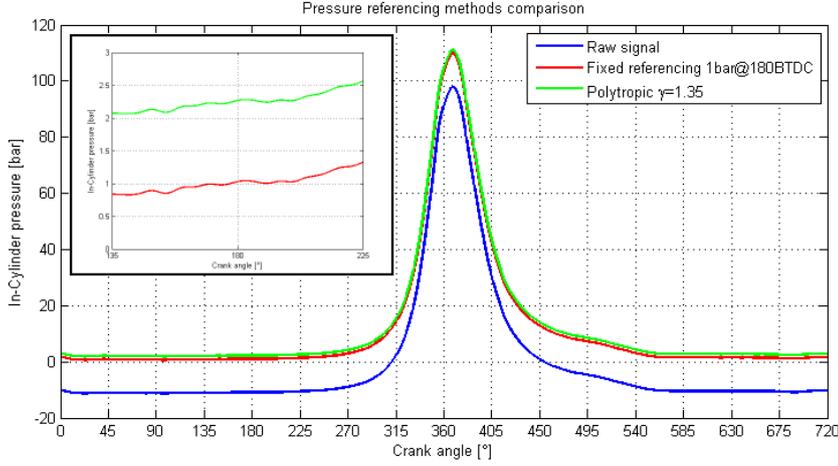


Figura 4.1 - Confronto tra i metodi per il recupero della componente media

4.2 Il calcolo della pressione media indicata

Il primo passo dell'analisi combustione vera e propria è la valutazione della pressione media indicata (PMI). E' una grandezza molto usata in quanto permette facilmente di confrontare le prestazioni di motori anche diversi tra loro. E' possibile mettere a confronto due motori di diversa cilindrata, per esempio, per stabilire quale dei due sviluppi maggior lavoro per unità di cilindrata. A differenza della PME (Pressione Media Effettiva), la PMI rappresenta il lavoro specifico lordo, dato che non tiene conto delle perdite meccaniche dovute principalmente agli attriti. E' ricavabile numericamente valutando il lavoro indicato del ciclo

$$PMI = \frac{1}{V_c} \oint p dV \quad (4.2)$$

L'equazione 4.2 non è direttamente applicabile, ma deve essere tradotta nella versione discreta, che tiene conto che la p non è un segnale tempo continuo, ma campionato. La relazione cambia in

$$PMI = \frac{1}{V_c} \sum_{i=1}^N p_i \Delta V_i$$

con N pari al numero di campioni nel ciclo. Essendo $p_i = p(\theta_i)$ e ricordando l'espressione del volume presentata nella sezione precedente

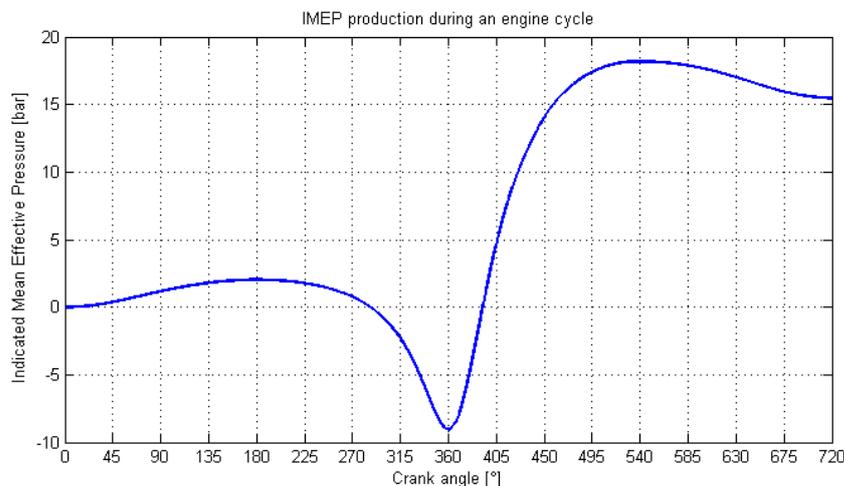


Figura 4.2 – Evoluzione della PMI in un ciclo motore

(Vedi eq. 4.1), è possibile esprimere il ΔV_i come differenza tra i volumi valutati in corrispondenza degli angoli θ_i e θ_{i-1} . In questo modo però la differenza ΔV_i risulta essere relativa alla posizione $\left(\theta_i - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{2}\right)$, non è quindi coerente con la posizione del termine di pressione. Il problema si risolve applicando la regola dei trapezi. La relazione 4.2 si trasforma quindi nell'equivalente discreto

$$PMI = \frac{1}{V_c} \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i + p_{i-1}}{2} \right) \cdot (V_i - V_{i-1})$$

Nella figura 4.2 è rappresentata l'evoluzione della PMI in funzione dell'angolo di manovella, calcolata su un ciclo di pressione in camera di combustione di un motore diesel sovralimentato.

4.3 Il rilascio di calore

Un altro indicatore di primaria importanza per valutare la qualità della combustione è la curva di rilascio di calore. Esprime la modalità con cui viene sviluppata l'energia chimica della combustione. Come sarà illustrato in seguito, dalla curva di rilascio di calore è possibile ricavare diversi indici derivati di grande importanza sia per la diagnosi che per la calibrazione di un motore. A differenza del calcolo della PMI, la valutazione

del calore rilasciato dalla combustione può essere computazionalmente complesso. Occorre infatti differenziare il rilascio di calore lordo, ovvero comprensivo delle perdite di calore con le pareti, dal rilascio di calore netto, che non tiene conto degli scambi termici. L'espressione del calore totale è la seguente

$$\delta Q_{tot} = \delta Q_{net} + \delta Q_{lost}$$

La stima di δQ_{lost} , anche usando modelli semplificati, richiede la conoscenza della temperatura dei gas e della temperatura di parete. Tali modelli sono difficilmente implementabili in tempo reale. Anche la valutazione del calore netto racchiude delle complessità inerenti al calcolo

$$\delta Q_{net} = \left(\frac{c_p}{R}\right) V dp + \left(\frac{c_v}{R} + 1\right) p dV$$

essendo c_p e c_v variabili con la temperatura e con la composizione dei gas, che variano durante il processo di combustione. Anche in questo caso occorre fare delle semplificazioni per rendere possibile il calcolo in tempo-reale del calore rilasciato, supponendo costante il rapporto tra i calori specifici (γ) durante la combustione. Riscrivendo i termini in c_p , c_v e R , e differenziando in θ , si ottiene l'espressione del tasso di rilascio di calore netto

$$\frac{dQ_{net}}{d\theta} = \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) V \frac{dp}{d\theta} + \left(\frac{1}{\gamma - 1}\right) p \frac{dV}{d\theta} \quad (4.3)$$

Nonostante le semplificazioni fatte, il rilascio di calore così calcolato rappresenta circa l'85%[?] del calore totale e fornisce quindi una stima sufficientemente accurata per gran parte delle applicazioni di diagnosi combustione. Riscrivendo l'espressione 4.3 sostituendo i differenziali con differenze e applicando il metodo dei trapezi, si ottiene

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q_{net_i}}{\Delta \theta_i} = & \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) \left(\frac{V_i + V_{i-1}}{2}\right) \left(\frac{p_i - p_{i-1}}{\theta_i - \theta_{i-1}}\right) + \\ & + \left(\frac{1}{\gamma - 1}\right) \left(\frac{p_i + p_{i-1}}{2}\right) \left(\frac{V_i - V_{i-1}}{\theta_i - \theta_{i-1}}\right) \end{aligned}$$

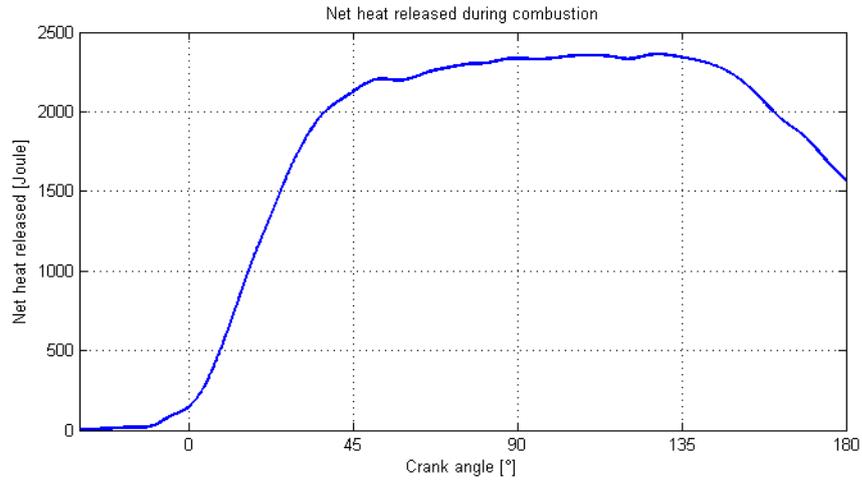


Figura 4.3 – Rilascio di calore netto integrale

mentre il valore del calore rilasciato in un ciclo si ottiene effettuando la sommatoria su tutti i campioni

$$Q_{net} = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{V_i + V_{i-1}}{2} \right) (p_i - p_{i-1}) + \left(\frac{1}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{p_i + p_{i-1}}{2} \right) (V_i - V_{i-1}) \right]$$

Spesso è utile analizzare l'evoluzione del rilascio di calore in forma integrale. E' una curva (vedi figura 4.3) in funzione di θ che ad ogni valore associa l'integrale del calore rilasciato da inizio calcolo fino a quel punto. In forma discreta si ottiene

$$Q_{int_k} = \sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{V_i + V_{i-1}}{2} \right) (p_i - p_{i-1}) + \left(\frac{1}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{p_i + p_{i-1}}{2} \right) (V_i - V_{i-1}) \right]$$

A differenza della PMI che è calcolato su tutto il ciclo motore, il calcolo del rilascio di calore è effettuato solo sulla parte di combustione, partendo da qualche decina di gradi prima del PMS attivo, fino alla fine

della fase di espansione, come mostrato in figura 4.3.

4.4 Indici derivati

Gli algoritmi esposti nelle precedenti sezioni forniscono la base per lo sviluppo di un sistema di analisi combustione completo. A partire dalla curva di pressione corretta, dalla PMI e dal rilascio di calore è infatti possibile ricavare numerosi altri indicatori della qualità della combustione.

4.4.1 Picco di pressione

A partire dalla curva di pressione corretta, ovvero dopo aver recuperato la componente media del segnale, è possibile calcolare il valore massimo raggiunto nel ciclo e la relativa posizione angolare. Il valore del picco di pressione e la sua dispersione ciclica forniscono informazioni utili a valutare la qualità della combustione e degli algoritmi di controllo e la condizione meccanica del motore. Invecchiando infatti il valore massimo di pressione raggiunto tende a calare a causa dell'usura delle fasce elastiche. La posizione del picco è utile per monitorare la fase della combustione, ovvero il suo posizionamento. Se valutato in condizioni di trascinato, ovvero in assenza di combustione, rappresenta un modo semplice ma efficace per stimare la posizione del punto morto superiore.

4.4.2 Gradiente di pressione

Dall'andamento della pressione nel ciclo è ricavabile anche il massimo gradiente di pressione e la sua posizione nel ciclo. Queste grandezze sono solitamente correlate con la ruvidità di combustione, oppure con la rumorosità, specialmente nei motori diesel. L'espressione del massimo $dp/d\theta$ in forma discreta è la seguente

$$MaxGrad = \max \left(\frac{p_i - p_{i-1}}{\theta_i - \theta_{i-1}} \right) \quad 1 \leq i \leq N$$

4.4.3 PMI di pompaggio e di combustione

E' possibile scomporre la PMI in due componenti, una relativa alla parte di ciclo in cui si sviluppa la combustione, compresa tra 180° prima a 180° dopo il PMS attivo, e una che rappresenta il lavoro di pompaggio, ovvero l'energia spesa a compiere le fasi di aspirazione e scarico.

$$PMI = PMI_C + PMI_P$$

La scomposizione nei due termini fornisce indicazioni specifiche sulle perdite dovute al pompaggio, collegate al rendimento volumetrico del motore e sulla qualità della fase di combustione vera e propria. Partendo dalla relazione generale 4.2, è possibile ricavare la componente di combustione come

$$PMI_C = \frac{1}{V_C} \sum_i \left(\frac{p_i + p_{i-1}}{2} \right) \cdot (V_i - V_{i-1}) \quad \forall i \mid \pi \leq \theta_i \leq 3\pi$$

avendo fissato il PMS attivo a 2π . Per differenza la pressione media di pompaggio si ricava così

$$PMI_P = PMI - PMI_C$$

4.4.4 Frazione di massa bruciata

L'espressione del calore rilasciato integrale rappresenta l'energia sviluppata dalla combustione. E' possibile considerare tale energia proporzionale alla massa di combustibile bruciato e il grafico di figura 4.4, ottenuto normalizzando all'unità quello riportato in 4.3, rappresenta l'andamento della frazione di massa bruciata durante la combustione.

Più che l'andamento della curva di figura 4.4 sono importanti altre grandezze da essa ottenibili, come la posizione in cui si raggiunge il 50% della massa bruciata, oppure la durata della combustione.

La posizione angolare in cui si verifica il raggiungimento di alcuni punti notevoli di frazione di massa bruciata forniscono informazioni importantissime per l'analisi della fase della combustione. Questi valori

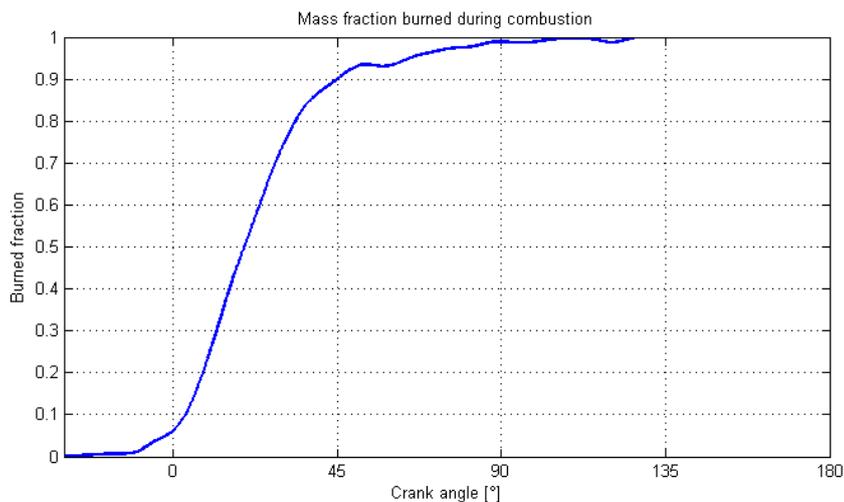


Figura 4.4 – Andamento della frazione di massa bruciata durante la combustione

notevoli tipicamente sono il 5%, il 50% e il 90%. Il primo rappresenta convenzionalmente l'inizio della combustione, il secondo ne indica il baricentro e l'ultimo la conclusione. La posizione del 50% MFB (Mass Fraction Burned) è anche usata come grandezza obiettivo nelle strategie più avanzate di controllo motore, ovvero si cerca di posizionare il 50% MFB in modo da ottenere le prestazioni desiderate.

Dalla frazione di massa bruciata si ricava anche la durata della combustione, espressa come ampiezza angolare. Convenzionalmente questa è definita come la differenza tra la posizione del 90%MFB e del 5%MFB.

4.4.5 Indicatori di misfire

La percentuale di mancate combustioni è un parametro di grande importanza per chi deve verificare il corretto funzionamento di un motore, specialmente in relazione alle emissioni inquinanti. Ogni misfire infatti provoca un innalzamento degli HC (idrocarburi incombusti) nei gas di scarico. In letteratura sono stati dimostrati e validati numerosi metodi indiretti, ovvero non basati sull'osservazione del segnale di pressione in camera, per il riconoscimento delle mancate combustioni, alcuni dei quali molto robusti[10, 11, 12, 13]. Si sono ottenuti ottimi risultati osservando le variazioni di velocità di rotazione del motore in seguito al calo di coppia

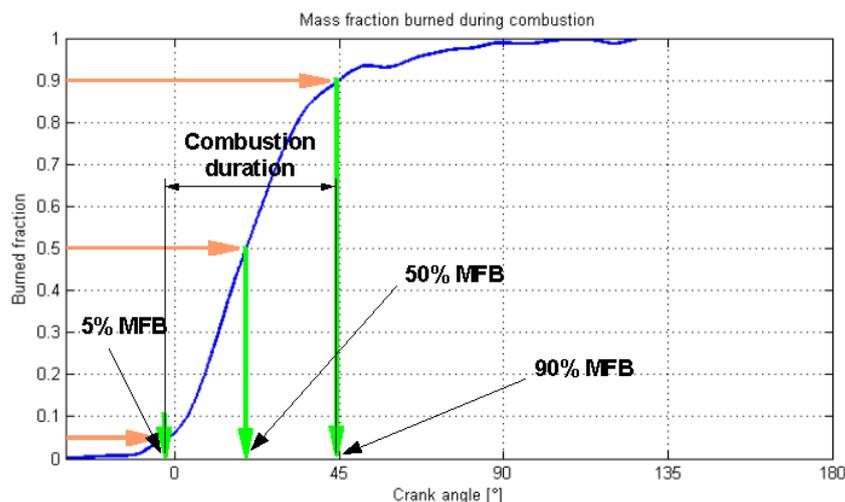


Figura 4.5 – Grandezze derivate dalla frazione di massa bruciata

dovuto alla mancata combustione. In certe applicazioni però la diagnosi con tali metodi ha un margine di affidabilità molto ridotto; per esempio in motori ad elevato frazionamento (8, 10 e 12 cilindri) la fluttuazione di velocità rotazionale derivante da una mancata combustione è molto ridotta, perché la mancata produzione di coppia di un solo cilindro viene mascherata dal funzionamento regolare degli altri.

La diagnosi misfire effettuata basandosi sul segnale di pressione in camera è invece molto robusta. Essendo infatti disponibili sia il valore della PMI che del calore rilasciato, è possibile creare un indice di misfire combinando le due informazioni. In assenza di combustione tanto la PMI quanto il calore netto dovrebbero assumere valori negativi. Per la PMI infatti, la parte di combustione si annulla mentre quella di pompaggio è normalmente negativa, mentre il rilascio di calore netto diventa anch'esso negativo a causa delle perdite di calore a parete.

Un indicatore di misfire semplice, efficace e di basso costo computazionale può quindi essere definito nel seguente modo

$$\begin{cases} (PMI < 0) \wedge (Q_{net} < 0) & \implies Misfire = 1 \\ (PMI \geq 0) \vee (Q_{net} \geq 0) & \implies Misfire = 0 \end{cases}$$

Capitolo 5

Potenzialità di calcolo avanzato offline

5.1 Il salvataggio dei dati

Finora sono state esaminate le potenzialità di analisi combustione in tempo reale, sia in ambito detonazione che indicating. Spesso però è stato necessario imporre semplificazioni agli algoritmi e ai modelli matematici per avere tempi di calcolo sufficientemente brevi per essere implementati in tempo reale. Nella progettazione del sistema di acquisizione e analisi dati però è stata prevista la possibilità di memorizzare su disco tutti i dati necessari per effettuare ulteriori analisi a posteriori. Disponendo infatti di tutti i campioni di pressione, dei riferimenti di posizione angolare e relative tempistiche è possibile ricostruire l'informazione $p(\theta)$, in maniera simile a quanto descritto nella sezione 2.3.

E' stato ideato un protocollo di memorizzazione dati binario molto efficiente dal punto di vista dell'occupazione dello spazio su disco e dell'uso di risorse computazionali. E' strutturato come un flusso di dati a 32bit (vincolo imposto dall'architettura hardware). I dati sono impacchettati a blocchi contenenti un intero ciclo motore e ogni inizio ciclo, corrispondente al riferimento angolare "zero", è marcato da una sequenza di 32bit predefinita. A seguire vengono inseriti nel flusso di dati i canali campionati ad alta frequenza, accoppiati a due a due per formare parole di 32bit, intercalati a particolari sequenze di 32bit ogniqualvolta venga

Bit 17-32	Bit 2-16	lsb	Descrizione
1111111111111111	1111111111111111	1	Marcatore inizio ciclo
$Trit_0$	$Tsmot_0$	1	Informazioni sincronizzazione $SMOT_0$
$Pcyl_0$	$Pcyl_1$	0	Campioni di pressione canali 1 e 2
...	...	0	...
$Pcyl_{n-1}$	$Pcyl_n$	0	Campioni di pressione canali n-1 e n
$Pcyl_0$	$Pcyl_1$	0	Campioni di pressione canali 1 e 2
...	...	0	...
$Pcyl_{n-1}$	$Pcyl_n$	0	Campioni di pressione canali n-1 e n
...
$Trit_1$	$Tsmot_1$	1	Informazioni sincronizzazione $SMOT_1$
...
$Trit_k$	$Tsmot_k$	1	Informazioni sincronizzazione $SMOT_{k-1}$
$Pcyl_0$	$Pcyl_1$	0	Campioni di pressione canali 1 e 2
...	...	0	...
$Pcyl_{n-1}$	$Pcyl_n$	0	Campioni di pressione canali n-1 e n
...
1111111111111111	1111111111111111	1	Marcatore inizio ciclo successivo

Tabella 5.1 – Schema del protocollo di memorizzazione dati

rilevato un riferimento angolare. Queste parole speciali contengono le informazioni temporali necessarie a ricostruire il posizionamento reciproco di campioni di pressione e riferimenti angolari.

Nella tabella 5.1 è schematizzata la struttura del flusso di dati che vengono memorizzati. Il significato delle varie sigle è il seguente:

- Il marcatore di inizio ciclo è una sequenza univoca di 32 bit tutti uguali a “1”;
- $Pcyl_0 Pcyl_1 \dots Pcyl_n$ sono i campioni di pressione, campionati simultaneamente, ciascuno di 16bit, uniti a coppie. La parola di 32bit risultante ha il bit meno significativo sempre uguale a “0”;
- $Trit_0 Trit_1 \dots Trit_k$ sono i tempi di ritardo tra l’istante di passaggio del riferimento angolare k-esimo e il successivo campione di pressione;

- $Tsmot_0, Tsmot_1 \dots Tsmot_k$ sono gli istanti di passaggio dei riferimenti angolari. Sono un tempo assoluto e per differenza tra valori consecutivi permettono di ricavare il $\Delta Tsmot$.

L'efficienza di un protocollo di comunicazione si riflette sull'ampiezza di banda richiesta dal flusso di dati. Questa grandezza è chiamata datarate o bitrate e si misura in bps (bit per secondo) o Bps (Byte per secondo). Il datarate per il protocollo qui descritto è deterministico e assume il seguente valore

$$BR = 32 \cdot \left[\frac{Nch}{2} \cdot Facq + \frac{RPM}{120} (Nsmot \cdot 2 + 1) \right] \quad [Mbps]$$

Per fare un esempio, considerando un'applicazione per motori di Formula1 basata su encoder con risoluzione di 1° (caso peggiore), l'occupazione di banda risulta essere pari a

$$BR = 32 \cdot \left[\frac{8}{2} \cdot 100000 + \frac{18000}{120} (360 \cdot 2 + 1) \right] \simeq 16Mbps \simeq 2MBps$$

Due ore di acquisizione ininterrotta occuperebbero quindi circa 112GB, un valore non elevato, assolutamente compatibile con le dimensioni tipiche dei dischi rigidi di ultima generazione, se si considera che conterrebbe le informazioni di un intero Gran Premio, pari a circa 1 Milione di cicli.

Per valutare meglio l'efficienza del protocollo studiato, si può valutare quale sarebbe il datarate richiesto per memorizzare le stesse informazioni in formato testo. Considerando di scrivere i dati in colonne, una contenente la posizione angolare e una ciascuna per le pressioni, usando 5 cifre significative (corrispondente ad una precisione di 16.6bit) più un separatore di colonna, si ottiene

$$BR_{txt} = 8 \cdot 6 \cdot [(Nch + 1) \cdot Facq]$$

che, usando i dati dell'esempio precedente, corrisponde a

$$Br_{txt} = 8 \cdot 6 \cdot [(8 + 1) \cdot 100000] \simeq 41Mbps \simeq 5MBps$$

ovvero circa 2.5 volte maggiore.

5.2 Algoritmi avanzati

Avendo rimosso il vincolo dell'esecuzione in tempo reale, è possibile risolvere modelli di calcolo più avanzati e migliorare quindi il livello di qualità dell'analisi combustione. Con le informazioni a disposizione sarebbe possibile implementare innumerevoli indicatori in grado di approfondire la conoscenza delle dinamiche della combustione nei motori endotermici alternativi. Nell'attività volta finora sono state analizzate solo alcune delle possibili migliorie, tuttavia le potenzialità del sistema di analisi renderanno possibili ulteriori sviluppi in futuro.

5.2.1 Algoritmi di stima della posizione del punto morto superiore

Tutti gli indici relativi alla combustione derivati dal ciclo di indicatore partono dal presupposto che la conoscenza del punto morto superiore sia accurata. In tutte le relazioni presentate finora, infatti, i termini in θ sono sempre stati considerati noti. Ciò è vero solo in parte, in quanto si conosce con buona accuratezza la posizione dell'albero motore, ma non il posizionamento relativo dei PMS dei vari cilindri rispetto al riferimento solidale con l'albero. La dipendenza della PMI e del rilascio di calore dalla posizione del PMS è contenuta nei termini di volume (vedi eq. 4.2 e 4.3). E' dimostrato che un errore di 1° sulla posizione del PMS porta a errori sulla PMI del 3.5% e del 5% sulla valutazione del calore rilasciato [?, ?].

La stima della posizione del PMS può essere effettuata in diversi modi, alcuni semplici altri innovativi; in letteratura si trovano numerosi lavori sull'argomento [7, 8, 9]. Il più immediato consiste nell'utilizzare i dati di progetto del motore, che indicano la posizione dei PMS riferiti alla ruota fonica, per esempio. Questo metodo, tuttavia, è impreciso a causa delle incertezze relative alle tolleranze di lavorazione, che possono portare a errori di diversi gradi. Un secondo metodo, ampiamente usato perché

garantisce ottima accuratezza, consiste nell'utilizzo di un sensore di posizione capacitivo, installato al posto della candela (o dell'iniettore in un motore diesel) di un cilindro. Facendo ruotare l'albero motore, per esempio usando il motorino di avviamento, e campionando il segnale in uscita dal sensore è possibile rilevare la posizione di corsa massima, ovvero il PMS. Pur essendo molto accurato ($\simeq 0.05^\circ$), questa tecnica presenta degli inconvenienti: occorre un sensore specifico che va installato ogni volta che è richiesta la determinazione della fase del motore, quindi ogni volta che si monta al banco un nuovo motore. Alla luce di questi limiti sono state analizzate metodologie basate esclusivamente sull'osservazione del segnale di pressione in camera, che non necessitino di altri sensori o della conoscenza del progetto del motore.

Osservando il ciclo di pressione in condizioni di trascinamento, ovvero con l'albero motore in rotazione ma senza combustione, si può pensare di associare la posizione del PMS con la posizione del picco di pressione. Ciò sarebbe vero nel caso di trasformazioni adiabatiche reversibili. Nelle condizioni reali, in cui le curve di compressione ed espansione sono soggette a perdite di massa attraverso le fasce elastiche e a scambi di calore con le pareti, la posizione del picco di pressione non coincide con la posizione di minimo volume, ovvero col PMS. La distanza angolare che li separa è chiamata *loss angle*

$$L_{PMS} = L_{PP} + \theta_{loss}$$

Per correlare la posizione del PMS con la posizione del picco di pressione, occorre quindi stimare il *loss angle*. Prima però si è cercato di dare una spiegazione termodinamica alla presenza del *loss angle*.

Si consideri il volume racchiuso tra il cilindro, il cielo del pistone e la testata come un sistema termodinamico assumendo che per il fluido all'interno valga l'equazione di stato dei gas perfetti, la legge della conservazione dell'energia e della massa.

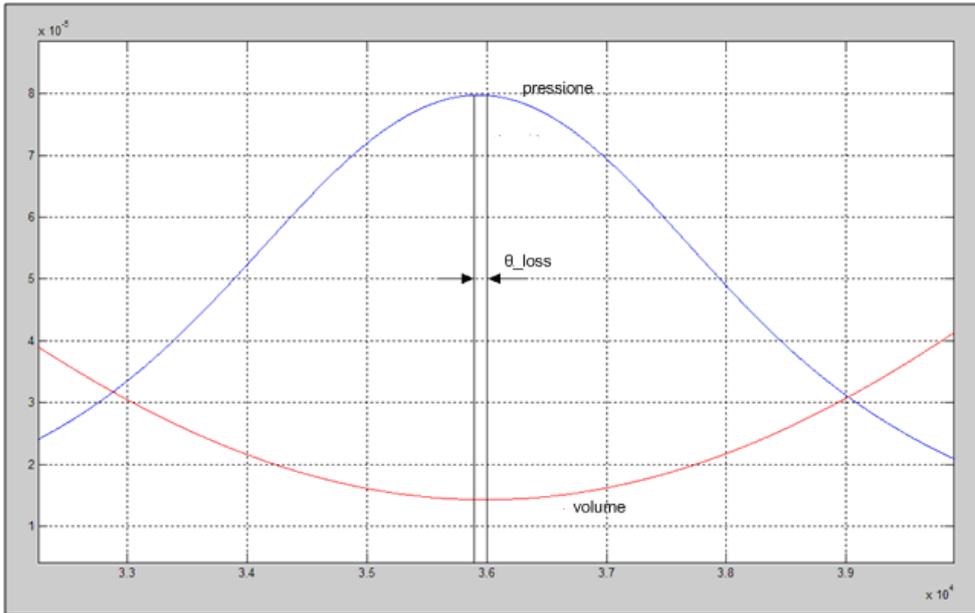


Figura 5.1 - Il loss angle.

$$\begin{cases} dm = dm_{in} - dm_{out} \\ \delta Q = \delta E_{CV} + \sum_j \left(h_j + \frac{c_j^2}{2} + gz_j \right) \cdot dm_{out} - \sum_i \left(h_i + \frac{c_i^2}{2} + gz_i \right) \cdot dm_{in} + \delta W \\ pV = mRT \end{cases}$$

Con m la massa del gas, δQ il tasso di trasferimento di calore, E_{CV} l'energia interna del volume controllato, h l'entalpia specifica, c la velocità del gas, z la quota e con W la potenza.

Durante la fase di compressione ed espansione con motore trascinato, la pressione del gas all'interno del cilindro è maggiore di quella nel collettore e nel basamento, causandone dunque delle perdite inevitabili verso queste zone.

Avendo considerato inizialmente il gas come perfetto, si ottiene che l'entalpia e l'energia interna sono in funzione della sola temperatura. L'equazione energetica diviene

$$\delta Q + \left(\frac{k}{2} + c_p \right) \cdot T dm = \frac{c_v}{R} V dp + \frac{c_p}{R} p dV$$

Considerando

$$\delta Q_{extent} = \delta Q + \left(\frac{k}{2} + c_p \right) \cdot T dm$$

si ottiene l'equazione della conservazione dell'energia nella seguente forma

$$\delta Q_{extend} = \frac{c_v}{R} V dp + \frac{c_p}{R} p dV$$

è possibile quindi ricavare l'espressione della variazione di pressione nel cilindro

$$dp = \frac{\left(\frac{R}{c_v} \delta Q_{extend} - k p dV \right)}{V}$$

Da queste relazioni è possibile ricavare analiticamente la posizione del PMS. Si consideri il ciclo termodinamico del fluido all'interno di un cilindro durante una fase di trascinamento del motore. Valutando l'andamento delle pressioni si può osservare che esiste solamente un punto in cui si raggiunge il picco di pressione, in cui $dp = 0$.

Allo stesso modo, considerando il diagramma dei volumi, esiste un solo punto in cui il pistone giunge a fine corsa minimizzando il volume stesso, quindi $dV = 0$.

In condizioni ideali, se non esistessero, né scambi di calore tra superficie del cilindro e ambiente esterno, né fuoriuscite di gas attraverso le guarnizioni durante il funzionamento a trascinamento del motore, si potrebbe considerare il processo come adiabatico. Ciò implicherebbe assenza totale di scambi energetici causati da scambi termici ($\delta Q = 0$) e perdite di massa ($dm = 0$).

$$\begin{cases} \delta Q = 0 \\ dm = 0 \\ \delta Q_{extend} = \delta Q + \left(\frac{k}{2} + c_p \right) \cdot T dm \end{cases}$$

in corrispondenza del picco di pressione ($dp = 0$), si avrà

$$\begin{cases} \frac{c_v}{R} V dp + \frac{c_p}{R} p dV = 0 \\ dp = 0 \end{cases}$$

Quindi, in condizioni ideali, si ottiene che la posizione del picco di pressione coincide col il raggiungimento della condizione di volume minimo ($dV = 0$), ovvero il PMS.

Invece, considerando il motore trascinato come un sistema termodinamico reale, le perdite di massa e il trasferimento di calore sono inevitabili ($\delta Q \neq 0, dm \neq 0$).

In prossimità del PMS, la pressione e la temperatura all'interno del cilindro risultano essere sempre maggiori che nel basamento e nei collettori. Per cui la variazione di energia, dovuta al moto del calore, e a quella di massa, dovuta alle fuoriuscite, dovranno essere considerate negative. Quindi

$$\begin{cases} \delta Q < 0 \\ dm < 0 \\ \delta Q_{extent} = \delta Q + \left(\frac{k}{2} + c_p\right) \cdot T dm < 0 \end{cases}$$

Al punto di massima pressione, si può scrivere

$$\begin{cases} \delta Q_{extent} < 0 \\ dp = \frac{\frac{R}{c_v} \delta Q_{extent} - k p dV}{V} = 0 \end{cases}$$

dalle precedenti relazioni è immediato ricavare che $dV < 0$ quando $dp = 0$, ovvero la posizione angolare di pressione massima non corrisponde a quella di volume minimo. Il picco di pressione precede il raggiungimento del PMS.

In base alle relazioni sopracitate, in presenza di una trasformazione ideale, ci sarebbe assenza totale di scambi energetici, ossia $\delta Q = 0$ e $dm = 0$. La pressione quindi raggiunge il suo picco massimo ($dp = 0$) quando il volume è minimo ($dV = 0$), per cui la posizione del picco di pressione (L_{PP}) dovrebbe coincidere con la posizione del punto morto superiore (PMS). Prendendo in considerazione un diagramma T-s (temperatura-

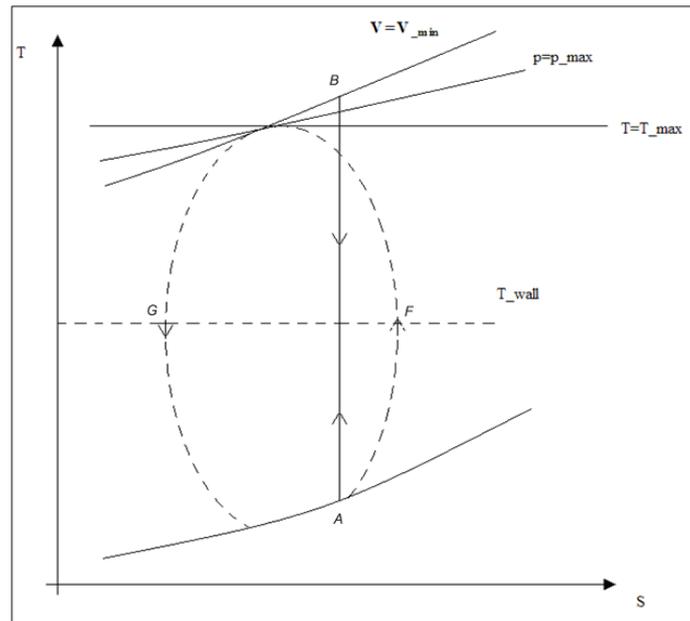


Figura 5.2 – Curve di compressione ed espansione nel diagramma T-s

entropia) questa trasformazione ideale è rappresentata da due segmenti coincidenti (AB e BA in figura 5.2), per cui $\delta s = 0$.

Tuttavia, in un ciclo reale, la variazione di pressione è dovuta sia ai cambiamenti del volume che a due fenomeni dipendenti dalla natura reale del motore: il calore scambiato (δQ), che è negativo quando la temperatura dei gas è maggiore di quella delle pareti del cilindro, e dalle perdite in massa (dm), che sono negative qualora la pressione del cilindro sia maggiore di quella del basamento.

In un ciclo di misfiring, non essendoci combustione, l'energia immessa chimicamente all'interno del sistema-cilindro è nulla. Ciò comporta che l'entità del calore trasferito del sistema dipende solo ed esclusivamente dalla differenza tra la temperatura all'interno del cilindro e quella delle pareti

$$\delta Q \propto (T_{wall} - T_{gas})$$

Nella figura 5.2 è mostrato con linea tratteggiata l'andamento in un diagramma temperatura-entropia delle fasi di compressione ed espansione

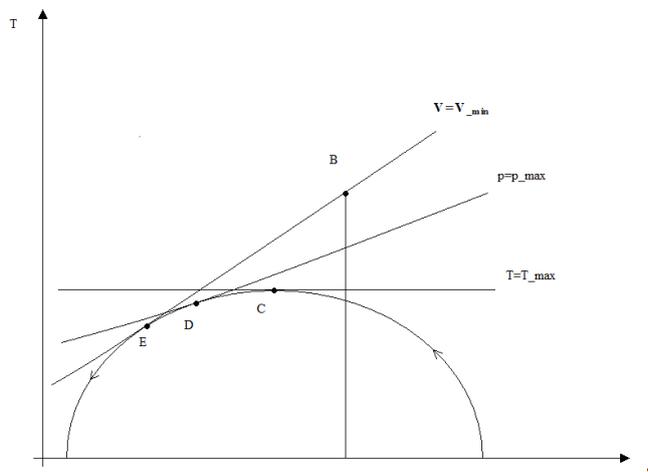


Figura 5.3 – Dettaglio della fine della fase di compressione

di un ciclo motore in misfiring.

Quando inizia il processo di compressione (punto A), la temperatura del gas contenuto all'interno del cilindro è inferiore a quella delle pareti di esso, ciò comporta un'immissione di calore all'interno del sistema e un andamento crescente di entropia. Con il protrarsi della compressione, la temperatura del gas incrementa fino a raggiungere la temperatura di parete, ossia $T_{wall} = T_{gas}$ (punto F). Nella parte seguente della corsa di compressione reale (da F a B), la variazione di entropia è negativa in quanto vi è del calore uscente dal sistema, dato che $T_{wall} < T_{gas}$.

Anche quando inizia la fase di espansione, la temperatura del gas è ancora maggiore di quella esterna e tale fase del ciclo è caratterizzata da un valore di entropia decrescente. Questo si verifica fino al punto in cui la temperatura del gas raggiunge quella di parete, momento in cui l'entropia torna a crescere.

La figura 5.3 mostra più in dettaglio l'andamento della curva relativa al ciclo motore in prossimità del PMS. Sono riportate nel diagramma l'isoterma di temperatura massima raggiunta, l'isobara corrispondente alla pressione massima e l'isocora riguardante il volume minimo.

Come si nota, a causa del trasferimento di calore e delle perdite di massa, la curva di pressione è asimmetrica rispetto al TDC. In particolare lo stato termodinamico del gas passa per i seguenti punti:

1. Punto C - temperatura massima
2. Punto D - pressione massima, ossia L_{PP}
3. Punto E - volume minimo, ossia PMS

Alla posizione di pressione massima non corrisponde quindi quella di volume minimo. Si definisce la distanza angolare tra il picco di pressione L_{PP} e la posizione del PMS come *loss angle* (θ_{loss}).

$$\theta_{loss} = L_{PMS} - L_{PP}$$

L'argomento della stima del *loss angle* è presente in diversi lavori pubblicati; di questi ne sono state valutati due:

- Metodo dell'analisi del diagramma T-s[8]
- Nuovo metodo termodinamico[7]

Il primo si basa sullo studio e analisi dei diagrammi temperatura-entropia durante fasi di compressione ed espansione in condizioni di trascinamento del motore. In particolare, la rilevazione della pressione nel cilindro permette, considerando costante la massa nel cilindro e utilizzando l'equazione dei gas perfetti, di ricavare durante queste fasi, l'andamento della temperatura T del gas.

Nel caso in cui il PMS sia calibrato correttamente, nel diagramma (T,S) sarà possibile notare come corsa di compressione e di espansione risultino simmetriche rispetto al picco di temperatura. Nel caso invece di errore di posizione risulterà nel diagramma un anello chiuso che non ha alcun senso dal punto di vista termodinamico. Nella figura 5.4 sono riportati quattro andamenti della fase di compressione-espansione in presenza di diversi valori di sfasamento (0, 0.5°, 0.75° e 1°).

Come si osserva nell'immagine, l'anello è presente a partire da un errore di fase di 0.5°. Gli autori suggeriscono un valore limite di 0.45°. Questo fatto permette di formulare una procedura di identificazione del PMS partendo da un ciclo di pressione in misfire:

1. si ipotizza un valore di primo tentativo per il PMS, per esempio la posizione del picco di pressione;

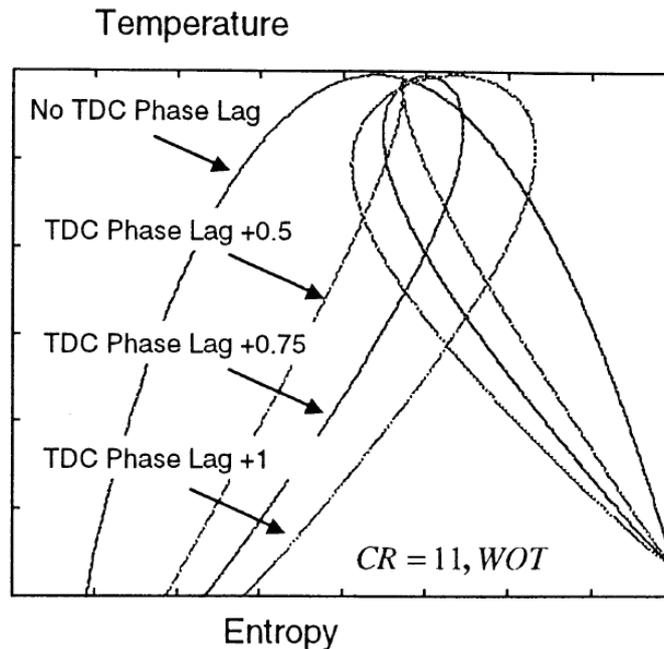


Figura 5.4 – Forma del diagramma T-s in presenza di errore PMS

2. iterativamente si arretra la curva di pressione finché non scompare l'anello nel diagramma T-s;
3. si sottrae 0.45° a tale valore.

Secondo gli autori questa procedura è robusta alla variazione di diversi parametri operativi, tra cui la pressione nel collettore, la massa intrapolata nel cilindro e il rapporto di compressione, rendendola applicabile a tutti i tipi di motori.

Il nuovo metodo termodinamico parte dalle considerazioni fatte in precedenza riguardo all'andamento della curva di compressione-espansione reale, che porta ad avere il punto di minimo volume a differire da quello di massima pressione.

Dall'osservazione dell'espressione della variazione di entropia

$$\delta s = c_p \frac{\delta V}{V} + c_p \frac{\delta p}{p} - c_p \frac{\delta m}{m}$$

si osserva come questa dipenda dalle grandezze $\frac{\delta V}{V}$ e $\frac{\delta p}{p}$ oltre che dalle perdite di massa attraverso le fasce elastiche. Le due quantità citate

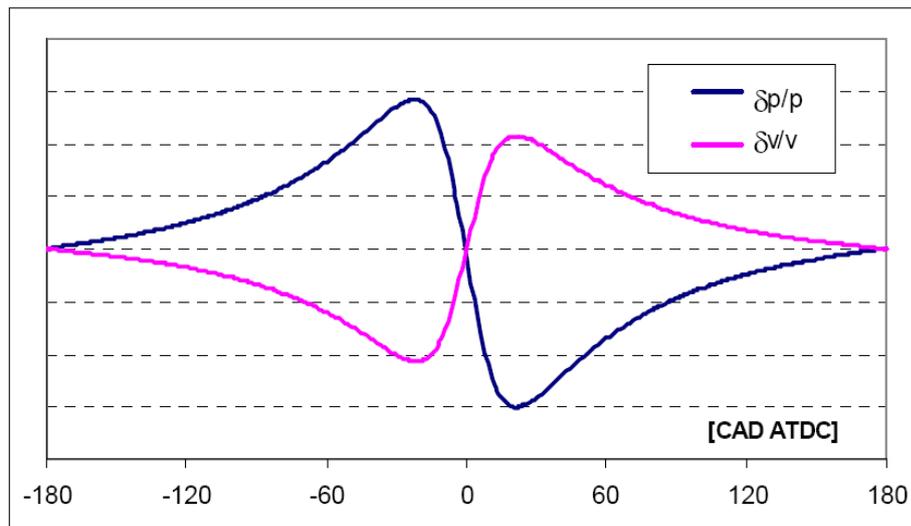


Figura 5.5 - Andamento delle quantità $\frac{\delta V}{V}$ e $\frac{\delta p}{p}$

hanno un andamento come in figura 5.5

E' possibile definire una funzione, detta *loss function*, come

$$\delta F = c_p \frac{\delta V}{V} + c_p \frac{\delta p}{p}$$

Introducendo l'espressione dell'entropia specifica diventa

$$\delta F = \delta s + c_p \frac{\delta m}{m}$$

L'andamento qualitativo della *loss function* è rappresentato in figura 5.6

Analizzando più in dettaglio, si nota come la variazione di entropia specifica inizi con un valore positivo essendo $T_{gas} < T_{wall}$. Col progredire della rotazione, quindi della fase di compressione del gas, questa variazione δs decresce assumendo un valore nullo quando $T_{wall} = T_{gas}$ e raggiungendo il minimo in prossimità del punto morto superiore (qui il flusso di calore dal gas alle pareti del cilindro è massimo). Successivamente, l'andamento della variazione dell'entropia torna ad essere crescente, finché δs diventa positiva prima di raggiungere il punto morto inferiore .

Considerando invece il termine $c_p \frac{\delta m}{m}$, il suo andamento, col progredire

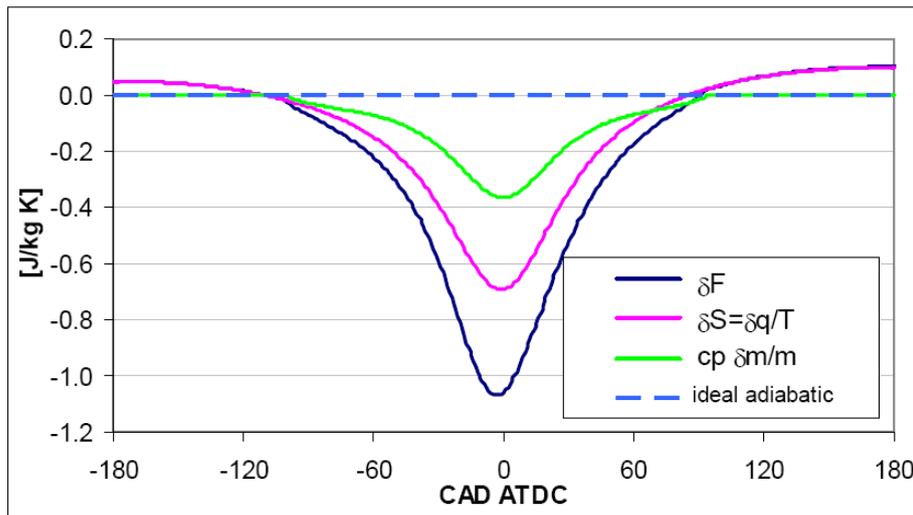


Figura 5.6 – Andamento della loss function

della rotazione della manovella, è simile a quello della variazione di entropia. Questo è dovuto al fatto che durante le corse di compressione ed espansione, la variazione di pressione è qualitativamente simile a quella della temperatura. Le perdite di massa $\frac{\delta m}{m}$, legate alla differenza tra pressione interna al cilindro ed esterna, raggiungeranno il valore massimo in prossimità del PMS.

Attraverso una serie di passaggi non riportati è possibile correlare il loss angle con la loss function valutata in corrispondenza del picco di pressione

$$\theta_{loss} = \frac{2}{Rc - 1} \frac{\lambda}{\lambda - 1} \left[\frac{1}{c_p} \frac{\delta F}{\delta \theta} \right]_{LPP}$$

La valutazione della loss function però è influenzata pesantemente dagli errori di posizione, come è evidenziato nell'immagine 5.7

La figura mostra tuttavia l'esistenza di due zone, in corrispondenza di due valori angolari θ_1 e θ_2 , nelle quali la curva δF assume sempre lo stesso valore indipendentemente dall'errore commesso nel fasamento.

In queste posizioni angolari, le funzioni fondamentali per il calcolo della variazione di entropia, $\frac{\delta p}{p}$ e $\frac{\delta V}{V}$, assumono i loro valori estremi, e quindi sono scarsamente influenzati da un eventuale errore di fasamento.

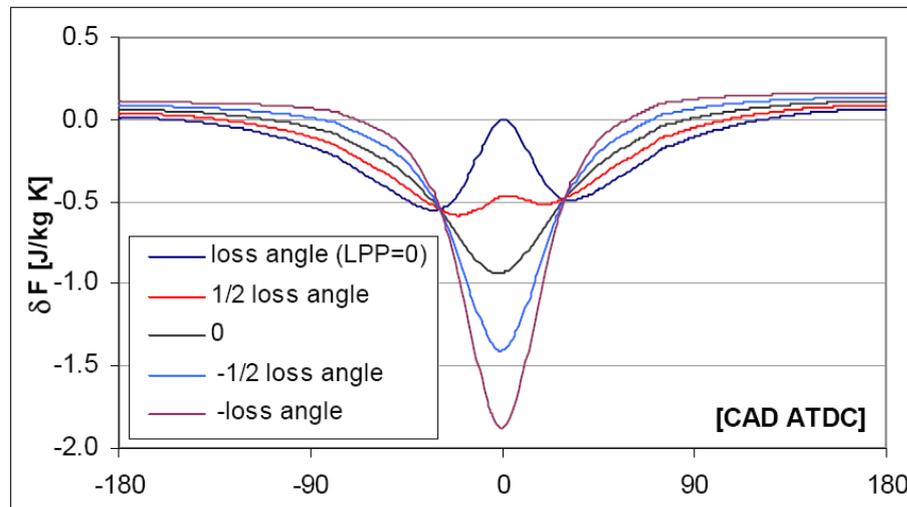


Figura 5.7 – Andamento della loss function in funzione degli errori di posizione

Risulta dunque conveniente introdurre inizialmente un errore pari al loss angle posizionando il picco di pressione in corrispondenza del PMS, ossia $L_{PP} = 0$, e determinare il valore della variazione della loss function δF in quelle posizioni angolari. In corrispondenza quei punti si possono ottenere stime di δF_1 e δF_2 piuttosto corrette.

Dal momento che per determinare θ_{loss} è necessario trovare il valore δF_{LPP} , si è ricercata una correlazione tra esso e δF_1 , del genere

$$\delta F_{LPP} = E_p \cdot \delta F_1 \quad (5.1)$$

E_p è una costante di proporzionalità dipendente principalmente dal rapporto di compressione del motore e dalla legge di trasferimento del calore assunta.

Purtroppo ci si è poi resi conto che il calcolo di δF_1 poteva risultare fortemente dipendente da numerosi elementi di incertezza: la stima di $\frac{\delta p}{p}$ e $\frac{\delta V}{V}$ è influenzata dagli errori di misura della pressione e del rapporto di compressione, e inoltre la stima della temperatura del gas nel cilindro al momento della chiusura della valvola di aspirazione, dalla quale dipendono c_p e c_v , non è molto accurata.

Nelle figura seguenti sono rappresentati studi effettuati introducendo

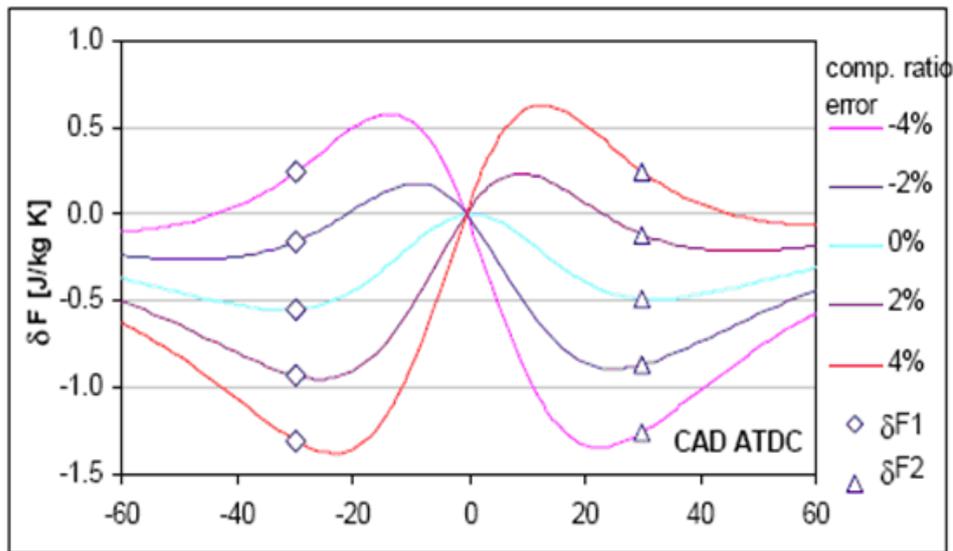


Figura 5.8 – Sensibilità all’incertezza di R_c

appositi errori di misura. Si può notare come la stima di δF_1 subisca notevoli variazioni. Prendendo però in considerazione anche δF_2 , il cui andamento è opposto rispetto a δF_1 , risulta evidente come la variazione media della loss function, $\delta F_m = (\delta F_1 + \delta F_2)/2$, rimanga pressoché inalterata.

Per determinare in maniera corretta δF_{LPP} , è necessario correlarlo al valore medio δF_m piuttosto che al valore nel singolo punto δF_1 , per cui la 5.1 diventa

$$\delta F_{LPP} = E_p \cdot \delta F_m \quad (5.2)$$

ricordando che

$$\delta F_m = \left(\frac{\delta F_1 + \delta F_2}{2} \right)$$

Per il valore della costante E_p presente nell’equazione 5.2, gli autori suggeriscono un valore ottenuto sperimentalmente di 1.95.

Per quanto riguarda la determinazione dei valori angolari θ_1 e θ_2 , fondamentali per la determinazione della variazione della loss function nel picco di pressione (δF_{LPP}), questi possono essere ottenuti per via

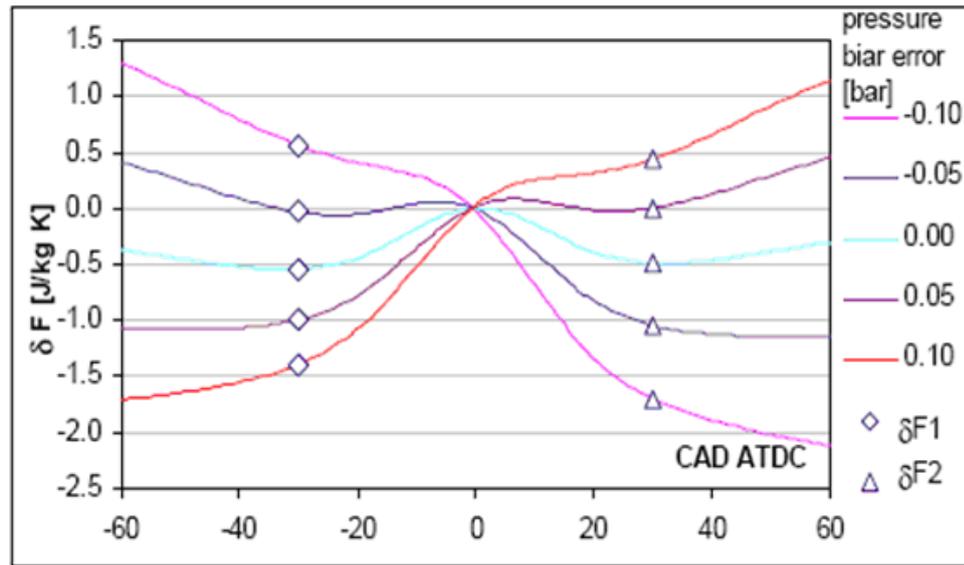


Figura 5.9 – Sensibilità all’incertezza sulla pressione

numerica

$$\theta_{1,2} = \mp 76.307 \cdot \lambda^{0.123} \cdot Rc^{-0.466}$$

Entrambi i metodi esposti sono stati applicati a dati sperimentali e hanno dimostrato di poter raggiungere un livello di confidenza di 0.2°. Saranno effettuati ulteriori test sperimentali per verificare la robustezza dei metodi alla variazione dei parametri, soprattutto per validare i termini empirici su cui entrambi i metodi si basano: lo sfasamento di 0.45° nel metodo del diagramma T-s e la costante di proporzionalità $E_P = 1.95$ del nuovo metodo termodinamico.

5.2.2 Modelli avanzati per la valutazione della legge di rilascio di calore

Il primo algoritmo che è stato affinato nel software per il calcolo delle grandezze indicate offline è quello per la valutazione del rilascio di calore. In tempo reale viene calcolato il rilascio netto, valutato con κ costante, mentre la disponibilità di maggiori risorse permette di ottenere una stima del rilascio lordo, ovvero comprensivo delle perdite di calore dovute allo

scambio con le pareti del cilindro. Il calore disperso viene valutato nelle componenti convettive e irraggiate.

L'espressione generale del flusso di calore scambiato per convezione è

$$\dot{q}_{conv} = h_c(T_{gas} - T_{wall})$$

per la stima del coefficiente di convezione è stata usata una versione modificata del modello di Annand, nella forma

$$h_c = \frac{c_1 \kappa Re^b}{D}$$

con D alesaggio, c_1 dipendente dalla fase all'interno del ciclo, κ conducibilità termica, Re numero di Reynolds, $b = 0.7$.

Per la valutazione del numero di Reynolds sono state prese come grandezze caratteristiche D e c_m

$$Re = \frac{\rho D c_m}{\mu}$$

Per quanto riguarda invece la componente irraggiata l'espressione secondo Annand non differisce di molto da quella generale

$$\dot{q}_{irr} = \beta \sigma (T_{gas}^4 - T_{wall}^4)$$

con β dipendente dal tipo di motore e σ costante di Stefan-Boltzmann.

A questo punto una prima stima del calore rilasciato dalla combustione è possibile

$$Q_{tot} = Q_{net} + S(\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{irr})$$

con S superficie di scambio termico (pareti cilindro, cielo pistone e testa).

L'applicazione di questo modello a dati acquisiti presso il laboratorio dell'Università di Bologna, relativi a un motore Fiat 1.2 Fire a 4500RPM a pieno carico mostra il seguente risultato

E' possibile affinare ulteriormente il modello, introducendo la variabilità di K , $\frac{c_p}{c_v}$, che ha un impatto diretto sul calcolo del calore netto

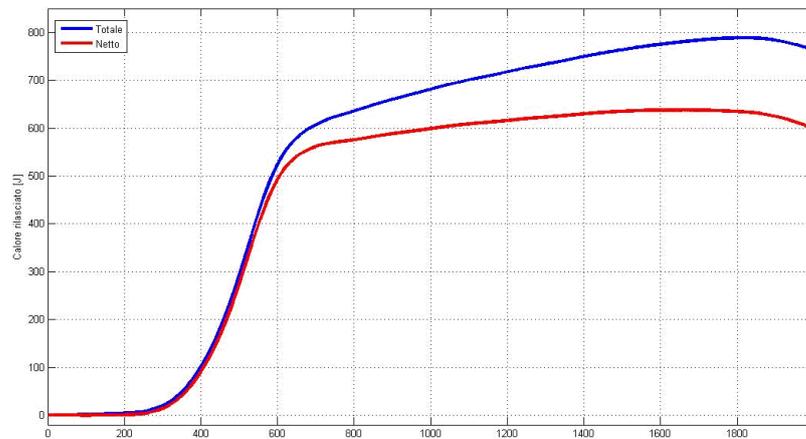


Figura 5.10 - Andamenti di Q_{net} e Q_{tot}

$$\frac{dQ_{net}}{d\theta} = \left(\frac{K}{K-1} \right) V \frac{dp}{d\theta} + \left(\frac{1}{K-1} \right) p \frac{dV}{d\theta}$$

Sono stati effettuati raffronti utilizzando diverse metodologie di valutazione di K :

1. K costante. Viene fissato il valore di K (un valore comunemente usato è 1.3);
2. K dell'aria variabile in funzione della temperatura. Si considera il rapporto dei calori specifici dell'aria, variabile in funzione della temperatura dei gas;
3. K della miscela aspirata in funzione della temperatura. Si considera anche la presenza di combustibile all'interno della camera di combustione, tramite la conoscenza, o la stima, del rapporto A/F;
4. K in funzione della composizione dei gas e della temperatura. Questo modello valuta anche l'evoluzione della composizione dei gas all'interno del cilindro durante la combustione, ottenuta dall'andamento della frazione di massa bruciata.

Sono stati determinati gli andamenti di K nelle quattro configurazioni descritte e valutati gli effetti che questi hanno sulle grandezze caratteri-

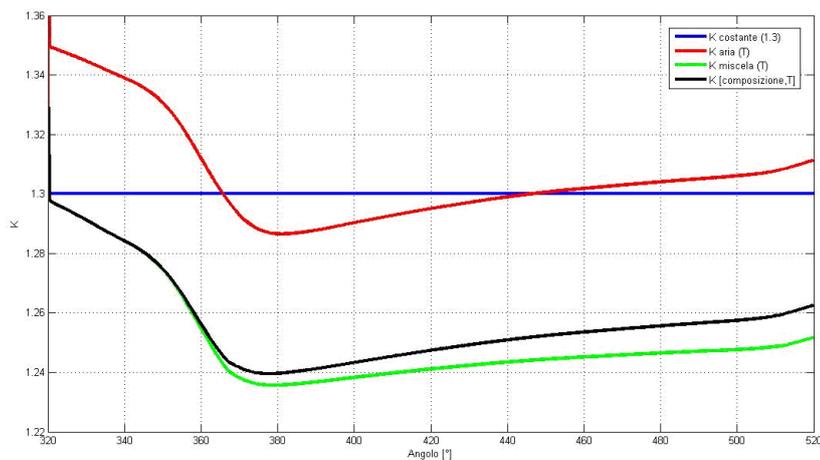


Figura 5.11 – Modelli di K

stiche del modello complessivo, in particolare sulla curva di rilascio calore netto.

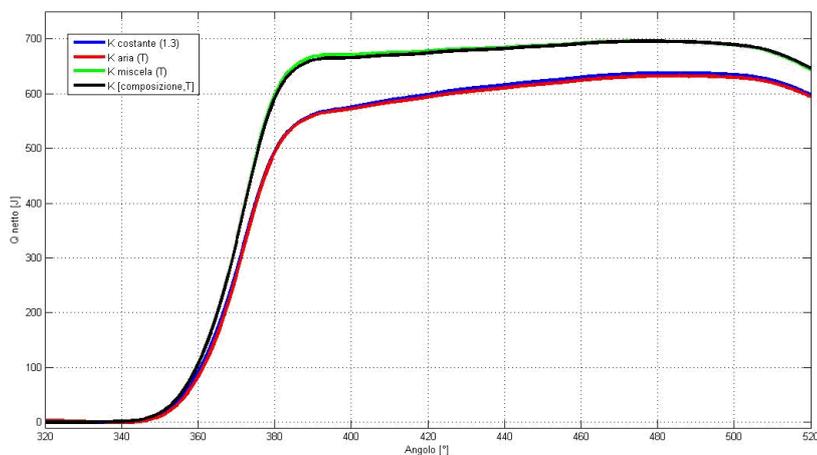


Figura 5.12 – Effetto dei modelli di K sul calore rilasciato netto

Si può notare come le curve che considerano la presenza di combustibile siano sensibilmente maggiori delle altre, a seguito di valori di K inferiori. Questi effetti si riflettono anche sulla posizione del 50% di massa bruciata e sul calore massimo rilasciato.

Capitolo 6

Implementazione

6.1 Architettura generale

Come già visto nel primo capitolo la struttura hardware del sistema è organizzata su tre livelli gerarchici (vedi figura 1.1). L'architettura del software che ne deriva è anch'essa sviluppata in tre ambiti distinti e intercomunicanti: FPGA, RT, HOST.

Nello schema di figura 6.1, sono rappresentati i macroblocchi funzionali che integrano tutti i codici, partendo dal livello più basso, quello FPGA, passando dal livello intermedio, quello RT, fino all'interfaccia utente, livello HOST. Le varie sezioni si scambiano dati bidirezionalmente, sfruttando le capacità dell'hardware. La comunicazione tra FPGA e RT avviene attraverso il bus locale, secondo varie modalità (Direct Variable Access e Direct Memory Access) che verranno approfondite nel-

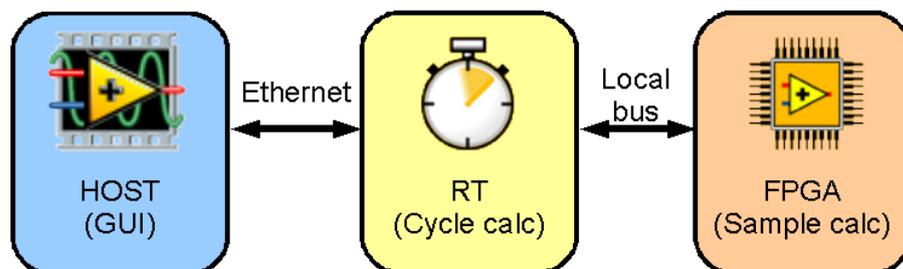


Figura 6.1 – Architettura del software

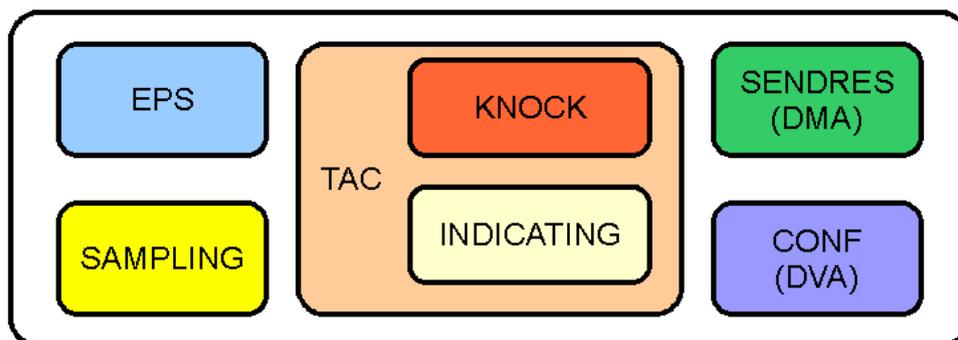


Figura 6.2 – Schema a blocchi del codice FPGA

le prossime sezioni. La comunicazione tra RT e HOST invece avviene tramite un'interfaccia di rete standard a 100Mbps, usando il protocollo TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol).

6.2 FPGA

Questa sezione si occupa del trattamento dei segnali di posizione e pressione in camera di combustione, del loro campionamento e della conversione da informazioni nel dominio dei tempi a dati in base angolo. Inoltre vengono svolte tutte le operazioni di basso livello relative al calcolo degli indici di detonazione, del lavoro indicato e della curva di rilascio di calore netto. Occorre quindi tradurre tutti i modelli matematici presentati nei capitoli precedenti in algoritmi numerici verificare il rispetto di tutti i requisiti temporali e di accuratezza.

I blocchi di codice che verranno schematicamente riportati in seguito vengono eseguiti su hardware di tipo FPGA, pertanto non è presente alcun sistema operativo ed è garantita l'esecuzione parallela di tutte quelle parti di codice che non dipendono ad altre per essere eseguite. Va ricordato inoltre che tutti i calcoli implementati in questo livello sono in aritmetica intera, pertanto, per minimizzare gli errori di troncamento e sfruttare al meglio le cifre significative disponibili, tutte le variabili sono scalate in unità di misura non convenzionali. Il ripristino dei fattori di scala e la conversione in unità ingegneristica avverrà nella sezione RT, usando aritmetica in virgola mobile a doppia precisione.

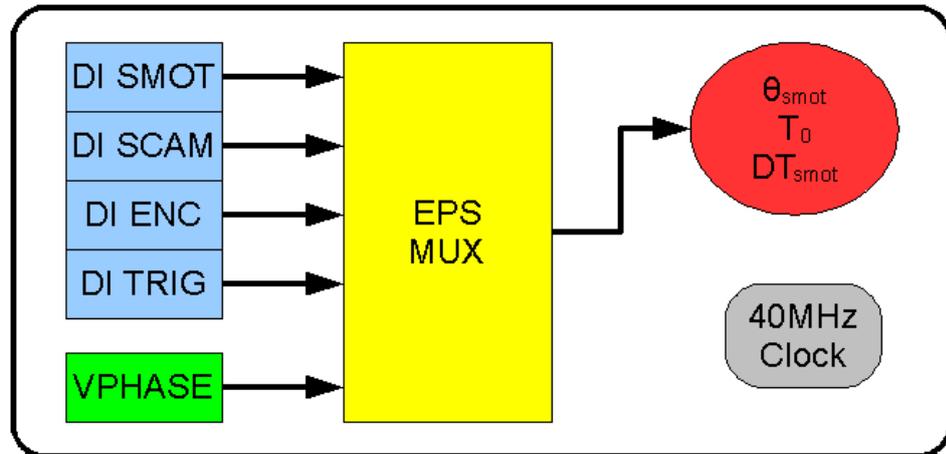


Figura 6.3 – Schema a blocchi del modulo di determinazione posizione angolare

6.2.1 Il modulo di rilevamento della posizione angolare (EPS)

Questa parte del codice si occupa di acquisire il quadro segnali del motore, che può essere di diverse tipologie, e di ottenere la posizione angolare di ogni riferimento con la massima accuratezza possibile. Oltre all'informazione sulla posizione dell'albero motore all'interno del ciclo deve fornire con precisione anche il tempo corrispondente ad ogni riferimento angolare, per poter associare i campioni di pressione alla propria posizione angolare. Il ciclo di campionamento lavora alla massima frequenza possibile per la piattaforma hardware scelta, ovvero 40MHz, a cui corrisponde una risoluzione di $25ns$.

Nel progettare questo modulo si è cercato di renderlo compatibile con la diverse possibili configurazioni del quadro segnale. Esse sono:

- Encoder più trigger di riferimento giro;
- Ruota fonica con denti mancanti;
- Ruota fonica piena con un ridotto numero di denti;

Per ciascuna delle configurazioni citate può essere presente un segnale di riferimento ciclo, oppure è possibile eseguire una fasatura basata su un

segnale di fase virtuale (indicato con VPHASE del diagramma), ricavato dalla curva di pressione in camera di un cilindro.

La strategia base, comune a tutti i casi riportati consiste nell'incrementare un contatore finché non si verifica la condizione di inizio nuovo ciclo, a quel punto esso viene azzerato. Nel caso di ruota fonica con denti mancanti, occorre ricostruire la posizione dei riferimenti mancanti in modo da non avere discontinuità nella risoluzione angolare della ruota fonica.

Le uscite del modulo di fasatura sono la posizione dei riferimenti angolari (chiamati θ_{smot}), gli istanti in cui l'albero motore raggiunge tali posizioni (T_0) e il tempo impiegato dal motore a ruotare della distanza angolare tra gli ultimi due riferimenti (DT_{smot}).

6.2.2 Il modulo di campionamento del segnale di pressione (SAMPLING)

Questa parte del sistema è molto critica in quanto deve garantire il campionamento di tutti i segnali di pressione in camera nello stesso istante temporale e deve inoltre correlare il tempo di campionamento con i dati ottenuti dal modulo di fasatura per poter ricavare la posizione angolare dei campioni di pressione.

La frequenza di esecuzione di questo blocco è di 100kHz, sufficiente per acquisire tutte le informazioni contenute nel segnale di pressione. Il blocco, indicato con "ADC SS" nel diagramma, esegue il campionamento simultaneo di tutti i canali e la conversione in digitale con risoluzione di 16bit. Il numero di canali che è possibile acquisire dipende dall'hardware usato e varia tra 4 e 16.

Successivamente i dati vengono elaborati da due blocchi di filtraggio, uno configurato come filtro passa-alto e uno passa-basso. La struttura dei due filtri è analoga, sono dei filtri di tipo IIR (Infinite Impulse Response) a due poli, ciò che li differenzia sono i coefficienti di calcolo. L'uscita dei filtri viene immagazzinata in un buffer di memoria per consentire ad altre parti di codice di accedere ai dati di pressione in maniera asincrona.

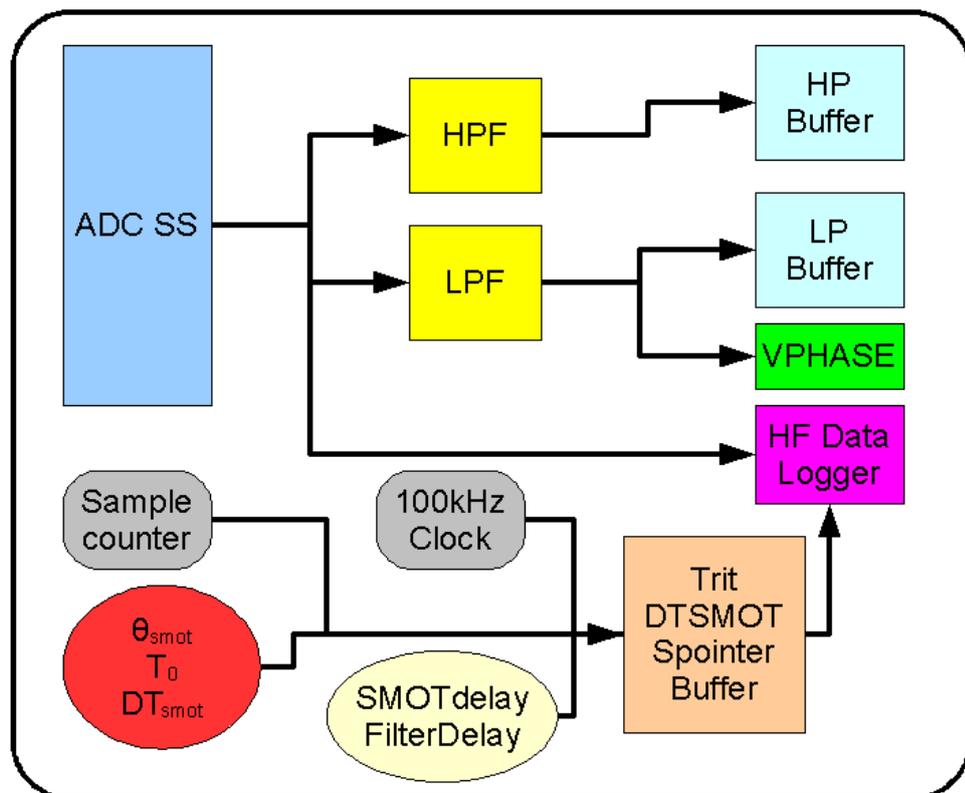


Figura 6.4 – Schema a blocchi del modulo di campionamento ad alta frequenza

Ad ogni iterazione del ciclo di campionamento viene controllata l'uscita del modulo di posizionamento (ellisse rossa nel diagramma). Quando si verifica un cambiamento nello stato, ovvero è stato rilevato il passaggio di un nuovo riferimento angolare, una serie di dati vengono scritti in un buffer:

- il tempo dente;
- il tempo di ritardo, calcolato come la differenza tra l'istante di campionamento e l'istante di passaggio del riferimento angolare, a cui vengono già applicate le compensazioni dei ritardi nella catena di misura;
- il valore del puntatore nel buffer delle pressioni, per sapere a quale campione si riferisce il tempo di ritardo calcolato al passo precedente.

I campioni di pressione e le informazioni di sincronizzazione vengono protocollate (vedi sezione 5.1) e inviate alla parte RT tramite un canale FIFO (First In First Out) DMA (Direct Memory Access) all'interno del blocco chiamate "HF Data Logger". I canali DMA, permettono di gestire flussi di dati con consumo di banda molto elevati, nell'ordine delle decine di MBps.

6.2.3 Blocco di conversione dal dominio temporale a dominio angolare (TAC)

In questa parte di codice viene effettivamente calcolata la posizione angolare di ciascun campione di pressione acquisito ad alta frequenza. I valori calcolati ai passi precedenti vengono utilizzati prima per valutare la velocità angolare media del motore all'interno dello SMOT corrente. Per SMOT corrente si intende il settore angolare compreso tra l'ultimo riferimento angolare e il precedente.

$$RPM_{avg} = \frac{SMOT_{deg}}{DT_{smot}} \quad [^{\circ}/ticks]$$

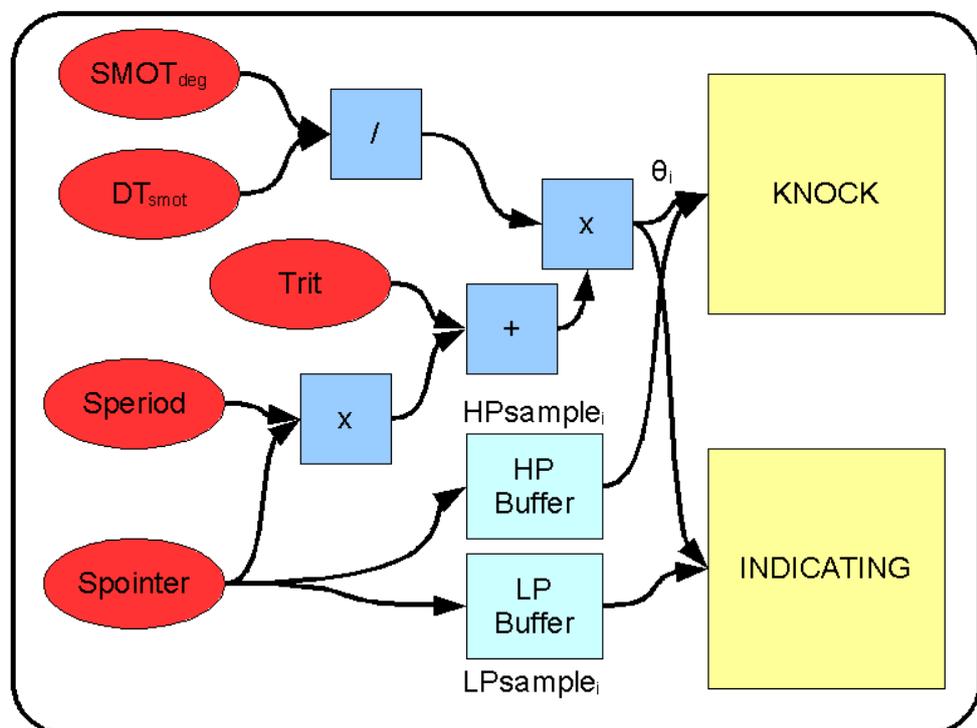


Figura 6.5 - Diagramma a blocchi del codice di attribuzione etichette angolari ai campioni

In parallelo viene valutato l'istante corrispondente al campione i -esimo, ottenuto come:

$$T_i = S_{pointer} \cdot S_{period} + T_{rit} \quad [ticks]$$

A questo punto la posizione angolare del campione i -esimo è immediatamente calcolabile:

$$\theta_i = RPM_{avg} \cdot T_i \quad [^\circ]$$

Successivamente viene estratto il campione i -esimo dai due buffer contenenti i segnali filtrati passa-basso e passa-alto che, assieme all'angolo corrispondente, entra nei blocchi di calcolo della detonazione e delle grandezze indicate. Tali blocchi saranno descritti in seguito.

La presenza dei buffer è necessaria per rendere asincrona questa parte di codice rispetto al campionamento, dato che l'attribuzione dell'etichetta angolare ai campioni richiede la velocità angolare media nello SMOT attuale e questa è calcolabile solo dopo che tutti i campioni di pressioni di uno SMOT sono già stati acquisiti. Il ritardo imposto è comunque limitato a una frazione di ciclo motore e pertanto non pregiudica il funzionamento in tempo-reale del sistema.

6.2.3.1 Calcolo indici detonazione (KNOCK)

L'implementazione dell'algoritmo di diagnosi detonazione, differisce leggermente da quanto esposto nel capitolo 3, in quanto l'operazione di filtraggio è stata svolta a priori, all'interno del blocco di campionamento (Vedi figura 6.4).

Per prima cosa viene verificato che il campione i -esimo appartenga alla finestra angolare specificata per il calcolo degli indici. Se tale condizione è vera, il campione viene elaborato in due sottoblocchi che restituiscono il valore del MAPO e del KINT. Questo blocco di codice viene eseguito per ogni campione di pressione, tante volte quanti sono i canali acquisiti, ma i blocchi "MAPO" e "KINT" restituiscono un valore valido solo a fine ciclo.

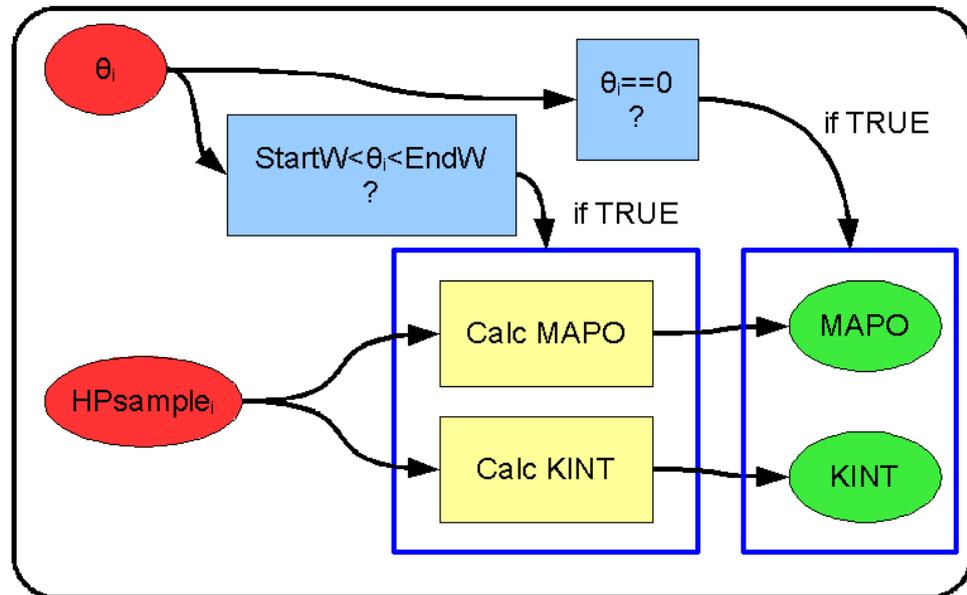


Figura 6.6 – Schema a blocchi del codice di diagnosi detonazione

Il calcolo del MAPO procede confrontando il valore attuale del valore assoluto del segnale con quello al passo precedente, se è maggiore esso viene immagazzinato in un registro, altrimenti il registro rimane al valore precedente. A fine ciclo il registro contiene esattamente il massimo del valore assoluto del segnale di pressione filtrato, che è l'indice definito in precedenza. La variabile “MAPO” viene aggiornata e il registro azzerato.

Per il KINT invece un registro contiene la sommatoria dei campioni elaborati fino al passo i -esimo presi in valore assoluto. A fine ciclo questo registro viene diviso per il numero di campioni, la variabile KINT viene aggiornata e il registro azzerato.

6.2.3.2 Calcolo grandezze indicate (INDICATING)

Questa parte del software svolge un ruolo chiave all'interno dell'applicazione, è qui infatti che vengono svolti la maggior parte dei calcoli relativi all'analisi combustione vera e propria. Nel diagramma di figura 6.7 è rappresentata schematicamente la struttura del codice e il flusso dei dati.

Il primo blocco è quello che si occupa di effettuare il recupero della componente media del segnale di pressione. Nella versione più semplice,

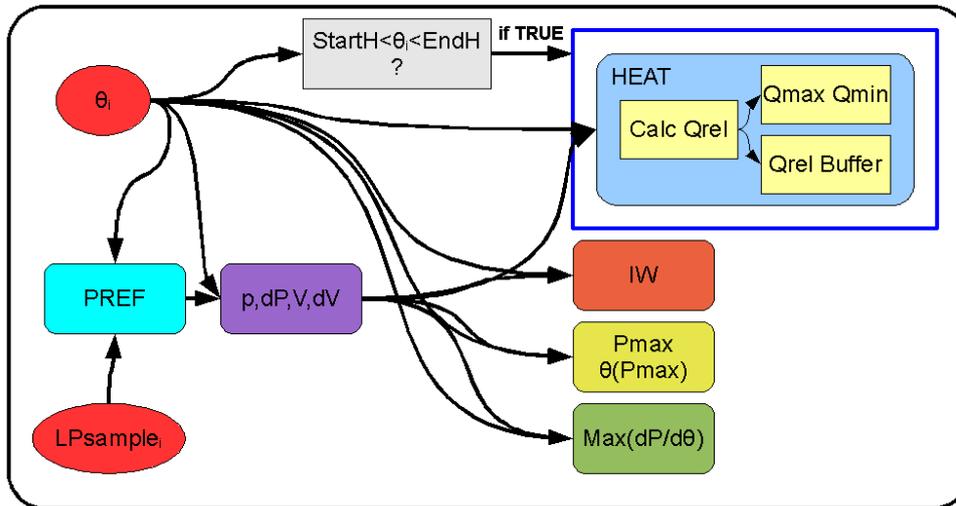


Figura 6.7 – Struttura del blocco INDICATING

ovvero il referencing a valore fisso, la procedura consiste nell'effettuare la media del segnale di pressione acquisito in una porzione di ciclo a valvole aperte ($StartREF \leq \theta_i \leq EndREF$) e calcolare la differenza tra tale valore e il valore di riferimento selezionato dall'utente.

$$Prec = Pref - \frac{1}{N} \sum p_i \quad \forall i \mid StartREF \leq \theta_i \leq EndREF$$

Il valore ottenuto viene poi sommato ai campioni di pressione ottenendo così il valore corretto.

Successivamente, dal valore di pressione e dall'angolo si ricavano le grandezze p , Δp , V e ΔV .

$$\begin{cases} p = \frac{p_i + p_{i-1}}{2} \\ \Delta p = p_i - p_{i-1} \\ V = \frac{V_i + V_{i-1}}{2} \\ \Delta V = V_i - V_{i-1} \end{cases}$$

Il volume non è ottenuto risolvendo l'equazione del manovellismo, perché sarebbe impossibile da fare in aritmetica intera, ma è ricavato da una LUT (Look Up Table) precalcolata in funzione delle caratteristiche

geometriche del motore in esame.

Il blocco HEAT implementa il calcolo del rilascio di calore netto integrale, da cui poi, nella parte RT, sarà possibile ricavare tutte le grandezze derivate. Il calcolo del rilascio di calore non viene eseguito su tutto il ciclo, ma in una porzione limitata dai parametri utente *StartH* ed *EndH*. L'equazione 4.3 è stata modificata per eliminare il calcolo dei termini in γ , dato che sono costanti è più efficiente precalcolarli nella sezione RT, scolarli opportunamente e passarli in FPGA. La relazione diventa

$$\Delta Q_i = K_1 \cdot V \Delta p + K_2 p \Delta V$$

La sequenza dei ΔQ da inizio ciclo viene memorizzata in un buffer che sarà inviato alla sezione RT.

Vi è poi il blocco che implementa il calcolo del lavoro indicato

$$\Delta IW_i = p \Delta V$$

In un registro viene tenuto in memoria la sommatoria da inizio ciclo.

Viene poi monitorato il valore della pressione all'interno del ciclo e due registri di memoria contengono il valore massimo e la relativa posizione angolare.

Per il calcolo del massimo del gradiente di pressione si sfrutta uno stratagemma per evitare di dover effettuare la divisione per $\Delta\theta$, operazione lunga dal punto di vista computazionale. Essendo la distanza temporale tra due campioni consecutivi costante, la relativa distanza angolare sarà proporzionale alla velocità di rotazione del motore, la quale è inversamente proporzionale al tempo dente, quindi la condizione di $\max(\frac{\Delta p}{\Delta\theta})$ si può tradurre in $\max(\Delta p \cdot \Delta T_{smot})$, dato che

$$\Delta\theta \propto RPM \propto \frac{1}{\Delta T_{smot}}$$

In questo modo il tempo di calcolo passa da diverse centinaia di cicli di clock a un solo ciclo, $25ns$.

Tutti i risultati vengono aggiornati, per ogni cilindro, alla fine del relativo ciclo. Un'altra parte del software (SENDRES) ha il compito di inviare alla parte RT i risultati.

6.2.4 Invio dei dati al livello RT (SENDRES)

All'inizio di ogni ciclo, definito convenzionalmente con l'inizio della fase di aspirazione, 360° prima del PMS attivo, i dati calcolati dai blocchi KNOCK e INDICATING assumono validità, pertanto possono essere spediti alla parte RT che li elaborerà ulteriormente. Nello stesso istante angolare, tutti i registri interni vengono azzerati e inizia il calcolo del ciclo successivo.

Per ottimizzare l'uso di risorse tutti i dati relativi a un singolo cilindro vengono uniti in un pacchetto che viene a sua volta accodato in un canale FIFO DMA ad alta velocità. I dati inviati sono i seguenti:

- Numero cilindro
- Lavoro indicato
- Pressione massima raggiunta
- Angolo del punto di massima pressione
- Curva di rilascio di calore integrale
- Massimo gradiente di pressione
- Angolo del punto di massimo gradiente di pressione
- Indice MAPO
- Indice KINT

Dato che il pacchetto di dati viene inviato al termine del ciclo, relativo ad ogni cilindro, questi saranno ricevuti nello stesso ordine della sequenza delle combustioni.

6.2.5 Gestione della configurazione (CONF)

Per il corretto svolgimento dei calcoli è necessario impostare una serie di parametri operativi, che sono usati dei vari sottoblocchi. Queste variabili vengono lette e scritte direttamente dalla sezione RT (Direct Variable Access), le principali sono:

- Coefficienti filtri passa-basso e passa-alto
- Posizione PMS
- Costanti di calibrazione canali analogici
- Impostazioni quadro segnali
- Finestre angolari per calcolo detonazione, rilascio di calore e recupero componente media

L'accesso alle variabili è asincrono e può avvenire in qualsiasi momento, senza particolari vincoli.

6.3 RT

Il livello intermedio del software di analisi viene eseguito su un hardware dotato di un sistema operativo certificato real-time e permette di rispettare vincoli temporali imposti dal progettista. In questo caso specifico i vincoli temporali riguardano il completamento dei calcoli iniziati nel livello inferiore (FPGA) entro il ciclo motore successivo a quello di campionamento. Deve svolgere anche altri compiti senza particolari vincoli temporali a parte garantirne l'esecuzione entro un tempo ragionevole (tipicamente inferiore al secondo), come l'invio dei dati all'interfaccia utente (livello HOST). La piattaforma di calcolo non pone limiti alla complessità dei calcoli implementabili, pertanto è possibile sfruttare tutte le potenzialità dell'aritmetica in virgola mobile a doppia precisione (64bit).

6.3.1 Gestione delle connessioni di rete con la parte HOST (CON)

In un'architettura multilivello i canali di intercomunicazione tra le varie parti assumono grande importanza. Esiste quindi una porzione specifica del software RT che si occupa di monitorare continuamente lo stato della connessione TCP/IP con l'HOST e di ripristinarla in caso di problemi.

La struttura dell'interfaccia di comunicazione RT-HOST è basata sull'uso di un solo indirizzo IP per parte, suddividendo il traffico dati in 3

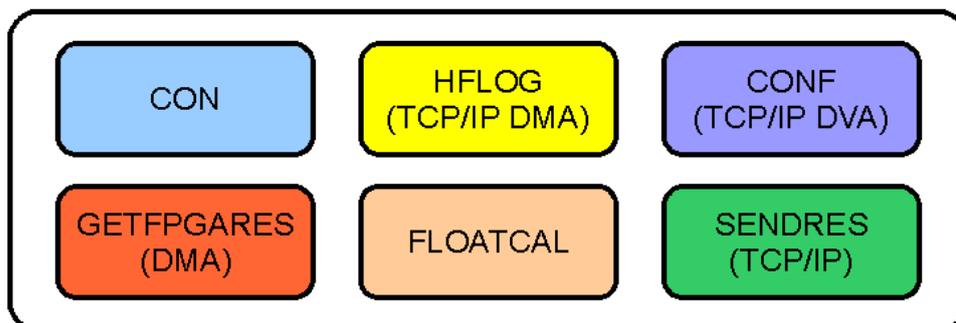


Figura 6.8 – Struttura del livello RT

canali assegnati a porte diverse. Il frazionamento in canali permette di mantenere separate informazioni che vengono prodotte a frequenze diverse. Il primo canale è relativo al transito del flusso di dati campionati ad alta velocità, il secondo trasporta i risultati dell'analisi combustione ciclo per ciclo e il terzo è usato per gestire i parametri di configurazione del sistema.

6.3.2 Data logger ad alta frequenza (HFLOG)

Il blocco HFLOG ha il compito di ricevere il flusso di dati ad alta frequenza provenienti dal livello FPGA e accodarli su uno dei canali TCP/IP, senza modificare in alcun modo i dati, dato che essi verranno usati esclusivamente nel livello HOST.

Per assicurare la continuità del flusso di dati, che ha un datarate di diversi Mbps, viene allocato un buffer di RAM (Random Access Memory) di generose dimensioni, capace di far fronte ad eventuali interruzioni momentanee del trasferimento.

I dati vengono estratti dal buffer FIFO DMA ogni $50ms$ e accodati direttamente sul canale TCP/IP dedicato. L'ampiezza di banda del bus Fast Ethernet si è dimostrata sufficiente al trasferimento dei dati relativi a 12 canali acquisiti a 100KHz.

6.3.3 Gestione della configurazione (CONF)

Questa parte di codice si interfaccia con la controparte in FPGA, in più però si occupa dello scambio di parametri con la sezione HOST. Occorre ricordare che l'utente non ha possibilità di controllare direttamente i parametri dei livelli FPGA e RT, ma tutte le azioni devono transitare dall'HOST.

Il gestore della configurazione RT, scambia parametri con l'HOST attraverso un canale dedicato TCP/IP, usa una parte delle informazioni direttamente e invia le rimanenti alla parte FPGA tramite DVA. Per evitare di occupare banda inutilmente il canale TCP/IP è asincrono e i dati vengono spediti solo in seguito a una modifica dei parametri di configurazione.

6.3.4 Ricezione risultati da FPGA (GETFPGARES)

Il compito di questa sezione è di ricevere i dati relativi ad un ciclo motore, quindi tanti pacchetti quanti sono i cilindri, di riordinarli secondo la numerazione convenzionale (e.g. da ordine di combustione 1-3-4-2 a ordine geometrico 1-2-3-4) e di renderli disponibili alla sezione di calcolo.

L'estrazione dei dati dalla FIFO DMA avviene monitorandone continuamente lo stato, non appena un pacchetto viene inserito dal lato FPGA esso viene estratto dal lato RT. Di questo pacchetto viene letto il primo campo, che identifica il numero di cilindro a cui i dati si riferiscono, e in base a questo viene inserito in un vettore N-dimensionale (con N pari al numero di cilindri) nella posizione corrispondente al cilindro. Dopo la ricezione del pacchetto relativo al cilindro N-esimo, viene generato un interrupt software, che segnala che i dati relativi ad un intero ciclo sono ordinati e pronti per essere elaborati.

6.3.5 Completamento dell'analisi combustione (FLOAT-CAL)

Nella sezione FPGA vengono eseguiti tutti i calcoli di basso livello, compatibili con l'aritmetica intera di cui è capace, occorre quindi completare

i calcoli per ottenere indici precisi numericamente con rappresentazione in unità ingegneristiche. Le operazioni svolte sono le seguenti:

- Conversione del lavoro indicato in PMI espressa in bar;
- Calcolo del massimo calore rilasciato e conversione in Joule;
- Normalizzazione della curva di rilascio di calore, interpolazione e determinazione delle posizioni del 5% del 50% e del 90% della frazione di massa bruciata;
- Valutazione condizione di misfire;
- Conversione del MAPO in bar;
- Conversione di tutti gli indici angolari in gradi ($\theta_{p_{max}}$, $\theta_{max}(dp/d\theta)$);
- Conversione da $max(\Delta p \cdot \Delta T_{smot})$ a $max(\Delta p / \Delta \theta)$.

Tutti i calcoli sono eseguiti in virgola mobile a doppia precisione.

I dati calcolati al passo precedente vengono raccolti in un pacchetto e inseriti in un canale TCP/IP dedicato e inviati all'HOST (SENDRES).

6.4 HOST

L'ultimo livello del software di analisi detonazione è l'unico che prevede l'interazione con l'utente, pertanto, a differenza delle sezioni descritte in precedenza, avrà anche l'implementazione dell'interfaccia grafica operatore (GUI). Inoltre, deve comunque assolvere a compiti di analisi statistica e memorizzazione dati.

6.4.1 Gestione delle connessioni di rete con la sezione RT (CON)

Questa parte è omologa al blocco CON presente in RT, si occupa di monitorare e mantenere attivi i canali TCP/IP che permettono alle informazioni di transitare da HOST e RT e viceversa.

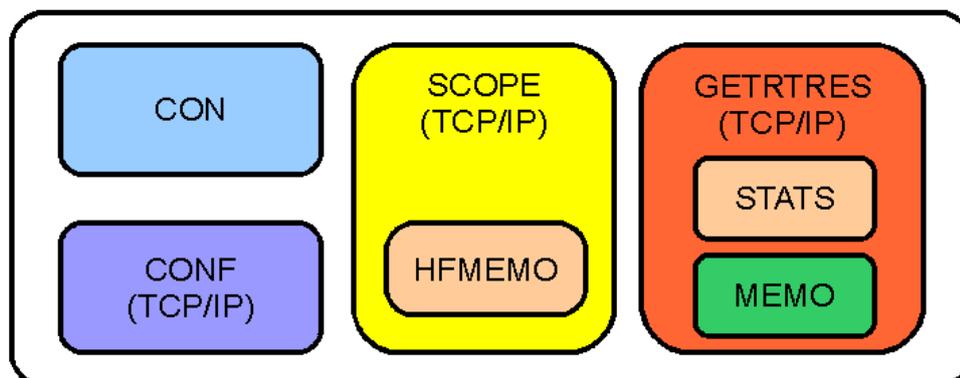


Figura 6.9 – Struttura sezione HOST

6.4.2 Gestione della configurazione (CONF)

Tutti i parametri di configurazione sono immessi dall'utente tramite un'interfaccia a menù, che sarà illustrata in seguito. Questo blocco di software ha il compito di inoltrare i parametri alle sezioni sottostanti (i.e. RT e FPGA), assicurandosi di mantenere coerenti le informazioni ai vari livelli.

6.4.3 Oscilloscopio (SCOPE)

Il flusso di dati campionati ad alta frequenza viene estratto dal canale TCP/IP a blocchi di 50000 elementi per volta. I dati vengono poi preparati per essere visualizzati sull'interfaccia grafica a mo' di oscilloscopio. Le curve di pressione di ogni cilindro vengono visualizzate sovrapposte in un grafico $p - \theta$. Occorre però estrarre i dati di pressione e angolo dal flusso protocollato descritto nella sezione 5.1. Per prima cosa viene isolato un ciclo motore; per questo è sufficiente cercare i marcatori di inizio ciclo e prendere gli elementi compresi tra due consecutivi. All'interno della porzione estratta è poi possibile riconoscere quali siano gli elementi contenenti campioni di pressione (hanno il bit meno significativo uguale a 0) e quali contengono le informazioni angolari (bit meno significativo uguale a 1). A questo punto è possibile riordinare i canali di pressione ed effettuare un'interpolazione angolare veloce (non tenendo conto del Trit) per ricostruire la curva di pressione $p(\theta)$ di ogni cilindro. Le curve dei singoli cilindri vengono quindi sovrapposte e visualizzate su un grafico.

In parallelo alla visualizzazione grafica dei dati viene svolta l'operazione di scrittura su disco di tutto il flusso ricevuto via TCP/IP, integralmente, senza modificarlo in alcun modo. Questa funzione non è svolta continuamente ma solo se attivata tramite l'interfaccia operatore.

6.4.4 Implementazione analisi statistica (GETRTRES)

L'ultimo blocco di codice implementa la ricezione dei dati elaborati dalla sezione RT, estraendoli dal canale TCP/IP un pacchetto per volta (relativo ad un singolo ciclo). I dati vengono poi raccolti in buffer di dimensione configurabile dall'utente, sui quali viene applicata un'analisi statistica. Gli indici calcolati sono i seguenti:

- media, implementata come $\mu = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_i}{N}$, con N numero di elementi nel buffer;
- deviazione standard, definita come $\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(x_i - \mu)^2}{N}}$;
- coefficiente di varianza percentuale, definito come $CV\% = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100$;
- massimo e minimo della popolazione.

L'analisi statistica viene applicata alle seguenti grandezze: PMI , $pMax$, $\theta(pMax)$, $\theta(50\%MFB)$, $KINT$ e $MAPO$.

All'interno di questa parte di codice viene anche implementata la memorizzazione su disco di tutte le grandezze calcolate su base ciclo. Anche in questo caso la registrazione non è continua ma è attivata in seguito al comando dell'utente. I dati vengono scritti in formato testo, per renderne possibile la lettura in modo semplice da qualsiasi programma in grado di leggere file ".txt" (e.g. Matlab, MS Excel). Il nome del file è definito creato automaticamente dal sistema e riporta data e ora di inizio registrazione.

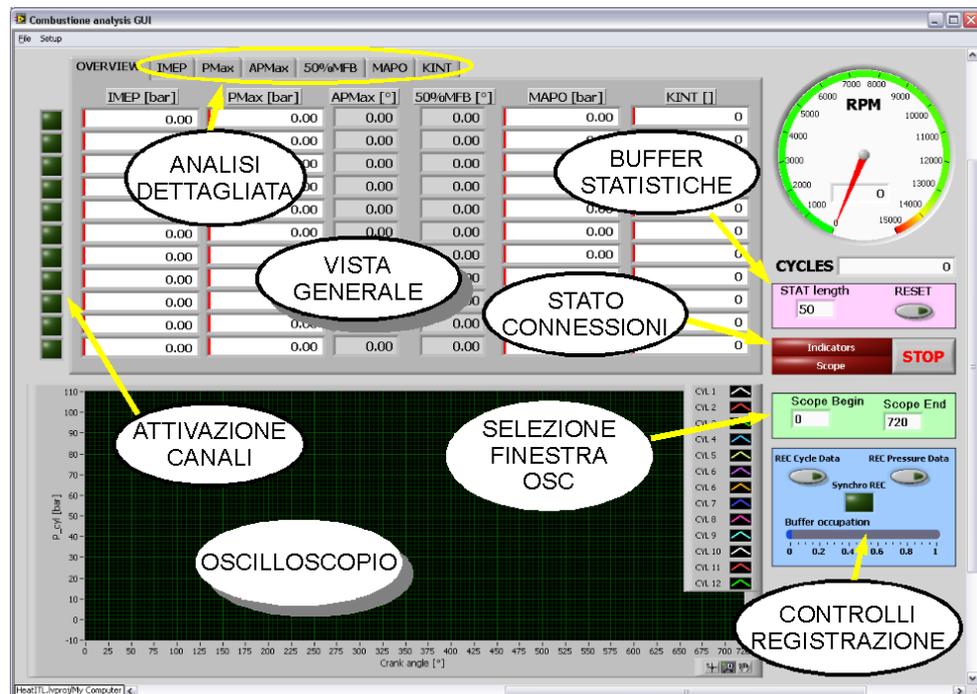


Figura 6.10 – Interfaccia operatore

6.4.5 Interfaccia utente (GUI)

Nel progettare l'interfaccia operatore si è cercato di mantenere la massima semplicità, sia nella visualizzazione delle informazioni che nell'impostazione dei parametri operativi.

Per rendere possibile la visualizzazione delle molteplici informazioni disponibili, si è cercato di stabilire quali fossero le informazioni da tenere sempre sotto controllo e quali fossero necessarie solo in determinati casi. Sono sempre visualizzati gli RPM istantanei del motore, l'oscilloscopio, la maschera di attivazione dei singoli canali e i parametri di controllo del buffer statistico, della registrazione e dell'oscilloscopio. I risultati dell'analisi combustione sono invece organizzati in cartelle. Una permette una vista generale dello stato della combustione, potendo osservare i valori istantanei di PMI , $pMax$, $\theta(pMax)$, $\theta(50\%MFB)$, $KINT$ e $MAPO$.

Per ciascuna di quelle grandezze è presente una cartella specifica, simile a quella riportata in figura 6.11, con l'analisi statistica dettagliata.

Per il $MAPO$ e il $KINT$, l'analisi statistica include un grafico che

OVERVIEW	IMEP	PMax	APMax	50%MFB	MAPO	KINT
Mean [bar]	Min [bar]	Max [bar]	Std [bar]	CV% []		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

Figura 6.11 – Esempio di visualizzazione analisi statistica

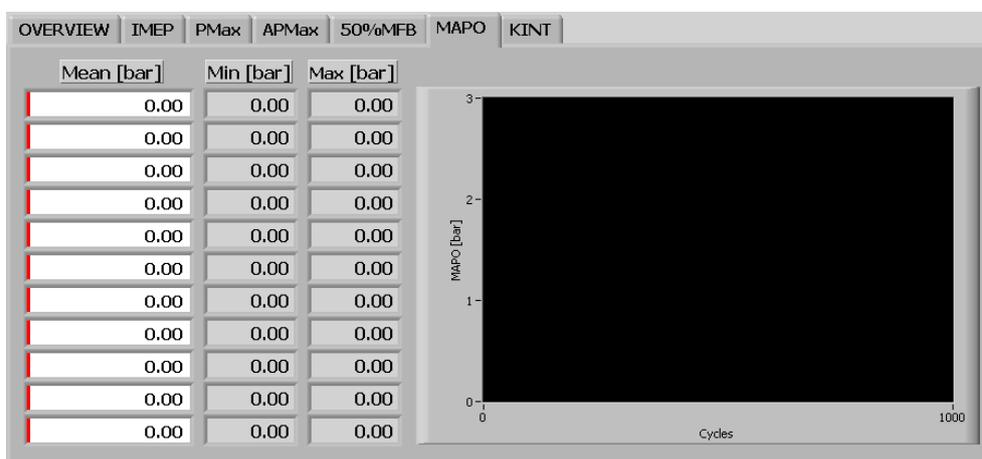


Figura 6.12 – Analisi statistica detonazione

mostra i valori degli indici relativi agli ultimi 1000 cicli, per avere un'indicazione visiva dell'andamento della prova (figura 6.12).

La configurazione avviene attraverso un'interfaccia a menù, da cui si accede a diverse finestre di dialogo che contengono i parametri suddivisi per ambito. Una finestra riguarda la definizione delle caratteristiche del motore (definizione dei PMS e della geometria) e del quadro segnali. Un'altra è relativa ai parametri per il calcolo del rilascio di calore e recupero componente media del segnale di pressione. Una riguarda la definizione delle caratteristiche dei segnali acquisiti (frequenza di campionamento, filtri, caratteristiche di linearizzazione sensori). Infine, una finestra permette di definire l'indirizzo IP dell'hardware RT e il percorso



Figura 6.13 – Struttura dei menù di configurazione

su disco dove memorizzare tutte le acquisizioni.

Capitolo 7

Conclusioni

L'attività svolta ha portato alla realizzazione di un sistema completo di analisi combustione in tempo reale, adatto sia all'uso in ambienti di ricerca, sia per usi industriali. Le potenzialità come strumento di innovazione sono racchiuse nella possibilità di espansione e modifica degli algoritmi implementati grazie alla facilità di programmazione e interazione con strumenti software diversi (e.g. Matlab e Simulink) comunemente usati nell'ambiente universitario. Nell'ottica dell'utilizzo industriale, ha come punti di forza i costi contenuti, le prestazioni elevate e la facilità di utilizzo.

Le principali caratteristiche sono le seguenti:

- Compatibile con hardware in standard PXI oppure CompactRIO, con diversi livelli di prestazioni a seconda dei requisiti;
- Campionamento del segnale di pressione in camera con le seguenti caratteristiche:
 - Risoluzione di 16bit;
 - Periodo di campionamento costante;
 - Campionamento simultaneo su tutti i canali;
 - Frequenza di 100Ksps;
- Ricostruzione componente media del segnale di pressione in camera di combustione con diversi metodi:

- Pressure referencing a valore fisso;
- Pressure referencing con pressione collettore di aspirazione;
- Metodo della politropica;
- Compatibile con diversi sistemi di determinazione posizione angolare albero motore:
 - Encoder ottico;
 - Quadro segnali standard;
- Implementa un sistema di analisi combustione in tempo reale in grado di produrre un'ampia gamma di indicatori tra cui:
 - PMI , PMI_C , PMI_P ;
 - Rilascio di calore netto;
 - Angoli corrispondenti a diverse frazioni di massa bruciata (e.g. 5%, 50%, 90%);
 - Picco di pressione;
 - Posizione del picco di pressione;
 - Massimo gradiente di pressione;
 - Posizione del massimo gradiente di pressione;
 - Valutazione indici di detonazione $MAPO$ e $KINT$;
 - Valutazione indici di misfire;
- Visualizzazione dei singoli cicli di pressione con modalità simile a un oscilloscopio digitale;
- Valutazione indici statistici:
 - Massimo;
 - Minimo;
 - Media;
 - Deviazione standard;

– Coefficiente di varianza percentuale;

- Memorizzazione dati su base ciclo su file in formato testo;
- Memorizzazione dati ad alta frequenza, per analisi offline, per un tempo limitato solamente dallo spazio su disco.

La struttura modulare del sistema si riflette anche nelle prestazioni raggiunte, che dipendono dalla configurazione implementata. Per fare un esempio, col crescere del numero di canali di pressione acquisiti si verifica un calo del regime massimo operativo del sistema. La parte che pone limiti alle prestazioni, allo stato attuale, è quella sezione di codice implementata in FPGA che deve eseguire i calcoli delle grandezze indicate campione per campione (vedi immagine 6.5). La parte relativa all'associazione tempo-angolo viene eseguita una volta per ogni SMOT, mentre i blocchi KNOCK e INDICATING devono essere eseguiti per ogni campione, tante volte quanti sono i canali acquisiti. Il tempo per effettuare il calcolo delle grandezze relative a un ciclo è stato caratterizzato ed è esprimibile con la seguente relazione

$$T_{calc_{cycle}} = 2 \cdot T_{TAC} \cdot N_{SMOT} + N_{SAMPLE} \cdot T_{IK} \cdot N_{CYL} \quad (7.1)$$

con T_{TAC} pari al tempo per eseguire la conversione tempo-angolo, N_{SMOT} il numero di riferimenti angolari per giro, N_{SAMPLE} il numero di campioni di pressione per ciclo, T_{IK} il tempo di calcolo ogni esecuzione dei blocchi KNOCK e INDICATING e N_{CYL} il numero di cilindri. E' possibile riarrangiare la relazione 7.1 per ricavare il regime massimo che garantisce ancora l'esecuzione dei calcoli in tempo reale. La seguente relazione lega il numero di campioni al regime motore e alla frequenza di campionamento

$$N_{SAMPLE} = T_{cycle} \cdot SR = \frac{120}{RPM} \cdot SR$$

sostituendola nella 7.1 si ottiene

$$T_{calc_{cycle}} = 2 \cdot T_{TAC} \cdot N_{SMOT} + \frac{120}{RPM} \cdot SR \cdot T_{IK} \cdot N_{CYL}$$

La condizione limite si verifica quando il tempo di calcolo eguaglia il tempo di ciclo, ovvero

$$T_{calc_{cycle}} = T_{cycle}$$

Sostituendo i due termini con le espressioni ricavate in precedenza

$$T_{calc_{cycle}} = 2 \cdot T_{TAC} \cdot N_{SMOT} + \frac{120}{RPM} \cdot SR \cdot T_{IK} \cdot N_{CYL} = \frac{120}{RPM}$$

Mettendo in evidenza il termine RPM si ottiene l'espressione che lega il regime massimo ai tempi di calcolo e alla configurazione del sistema

$$RPM_{MAX} = \frac{60(1 - SR \cdot I_{IK} \cdot N_{CYL})}{T_{TAC} \cdot N_{SMOT}}$$

Volendo fare una valutazione del massimo regime di rotazione nel caso peggiore, considerando 12 cilindri, l'uso di encoder a 360 tacche e una frequenza di campionamento di 100KHz, si ricava

$$\begin{cases} T_{TAC} = 3.75 \quad [\mu s] \\ T_{IK} = 0.55 \quad [\mu s] \\ RPM_{MAX} = 15111 \quad [s^{-1}] \end{cases}$$

La mole dei calcoli nei livelli HOST e RT non è tale da limitare le prestazioni del sistema, anzi lascia aperta la possibilità di futuri sviluppi in quelle aree.

Nella tabella 7.1 sono indicate le prestazioni sintetiche di due possibili configurazioni, una a 4 cilindri e una a 12.

Il sistema di analisi combustione illustrato nel presente documento è attualmente operativo presso la sala prove dell'Università di Bologna, con lo scopo di contribuire all'avanzamento delle attività di ricerca attualmente in essere presso il Dipartimento di Macchine.

Canali ad alta frequenza	4	12
Risoluzione angolare	0.1°	
Risoluzione temporale	25ns	
Accuratezza PMI	0.5%	
Accuratezza rilascio di calore	1%	
Accuratezza posizione 50%MFB	0.2°	
Massimo regime rotazione	oltre 22000	15000
Massima dimensione buffer statistico	oltre 30000 elementi	
Numero di cicli memorizzabili	dipende dal disco fisso	

Tabella 7.1 - Prestazioni del sistema di analisi combustione

Bibliografia

- [1] Burgdorf K., Denbratt I. G., 1997, "Comparison of Cylinder Pressure Based Knock Detection Methods", SAE 972932.
- [2] Schmillen K. P., Rechs M., 1991, "Different Methods of Knock Detection and Knock Control", SAE 910858.
- [3] Cavina N., Corti E., Solieri L., 2006, "A Heat flux Damages-Related Index", ASME ICES2006-1425.
- [4] Heywood J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book.
- [5] Corti E., 2008, "Measurement Errors in Real-Time IMEP and ROHR Evaluation", SAE 2008-01-0980.
- [6] Ponti F., 2005, "In-Cylinder Pressure Measurement: Requirements for On-Board Engine Control", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power May 2008 032803.
- [7] Pipitone E., Beccari A., Beccari S., 2007, "The Experimental Validation of a New Thermodynamic Method for TDC Determination", SAE 2007-24-0052.
- [8] Tazerout M., Le Corre O., Rousseau S., 1999, "Tdc Determination in Ic Engines Based on the Thermodynamic Analysis of the Temperature-Entropy Diagram", SAE 1999-01-1489.
- [9] Nilsson Y., Eriksson L., 2004, "Determining Tdc Position Using Symmetry and Other Methods", SAE 2004-01-1458.

BIBLIOGRAFIA

- [10] Cavina N., Corti E., Serra G., Minelli G., 2002, “Misfire Detection Based on Engine Speed Time-Frequency Analysis”, SAE 2002-01-0480.
- [11] Klenk M., Moser W., Mueller W., Wimmer W., 1993, “Misfire Detection By Evaluating Crankshaft Speed—A Means to Comply With Obdi”, SAE 930399.
- [12] Chung Y., Bae C., Choi S., Yoon K., 1999, “Application of a Wide Range Oxygen Sensor for the Misfire Detection”, SAE 1999-01-1485.
- [13] Auzins J., Johannsson H., Nydomt J., 1995, “Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock, and Engine Control”, SAE 950004.