



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA MECCANICA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Progettazione di un sistema d'analisi della combustione
e dei fenomeni dinamici per un motore ad alte
prestazioni di Formula SAE**

**Design of a combustion and dynamic phenomena
analysis system for a high-performance Formula SAE
engine**

Relatore:

Prof. Paolo Castellini

Tesi di Laurea di:

Francesco Colangelo

Sessione autunnale

Anno Accademico **2020/2021**

DISCLAIMER

Tutti i riferimenti e le foto delle simulazioni monodimensionali realizzate su *GT SUITE* sono di proprietà del *Polimarche Racing Team*. Le simulazioni sono state realizzate e perfezionate nelle varie stagioni da tutti i membri del reparto *powertrain* del *Polimarche Racing Team*. Essendo io membro del reparto *powertrain* sono autorizzato ad utilizzare per la mia tesi tutti i file che mi sono stati forniti dal *Polimarche Racing Team*.

INDICE

INTRODUZIONE	13
1. LA FORMULA SAE	15
1.1. Cos'è la formula SAE	15
1.2. Polimarche Racing Team	15
1.3. Regolamento Formula SAE	17
<i>1.3.1. Le prove in gara</i>	<i>19</i>
1.4. Il motore	19
1.5. ECU	21
1.6. Simulazione monodimensionale del motore	22
2. FENOMENI DINAMICI	25
2.1. Che cos'è un'onda di pressione	25
2.2. Effetti d'onda	26
2.3. Come operano le onde nei motori	26
2.4. Ruolo della fasatura	28
2.5. Analisi dei casi reali	28
<i>2.5.1. Pressioni nel cilindro</i>	<i>30</i>
<i>2.5.2. Pressioni a valle della valvola di scarico</i>	<i>30</i>
<i>2.5.3. Pressioni a monte della valvola di aspirazione</i>	<i>31</i>
3. ANALISI DELLA COMBUSTIONE	33
3.1. Parametri maggiormente usati per la calibrazione del motore	36
3.1.1. MFB50	37
3.1.2. Ampiezza del battito in testa	37
3.1.3. PMI (Lordo)	38
3.2. Combustione anormale – Fenomeno di battito in testa	39
3.2.1. Autoignizione	40

3.2.2. <i>Preaccensione</i>	40
3.3. Applicazioni dell'analisi della combustione	41
3.3.1. <i>Taratura del motore</i>	41
3.3.2. <i>Convalida del modello</i>	43
3.3.3. <i>Diagnostica del motore</i>	43
4. SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI.....	45
4.1. Banco prova motore	45
4.2. Scheda di acquisizione.....	48
4.3. Misurazione posizione albero a gomiti	49
4.4. Sensore di battito in testa	50
4.2. Trasduttori di pressione.....	53
4.2.1. <i>Scelta dei trasduttori di pressione</i>	57
4.2.2. <i>Trasduttore di pressione in camera</i>	60
4.2.3. <i>Trasduttori di pressione per gli effetti dinamici</i>	67
4.6. Posizione dei sensori	69
4.6.1. <i>Posizione sensore di pressione in camera di combustione</i>	69
4.6.2. <i>Posizione sensori per effetti dinamici</i>	70
4.6.3. <i>Posizione sensore di battito in testa</i>	73
5. ACQUISIZIONE DATI	75
5.1. Introduzione a LabVIEW	75
5.2. VI utilizzati nel progetto	76
5.2.1. <i>Acquisizione dei segnali</i>	76
5.2.2. <i>Salvataggio dati</i>	81
5.3. Acquisizione dei fenomeni dinamici.....	83
5.3.1. <i>Block Diagram</i>	83
5.3.2. <i>Front panel</i>	84
5.4. Acquisizione dei segnali per l'analisi della combustione	84

5.4.1. Block Diagram	85
5.4.2. Front Panel	86
6. POST PROCESSING	87
6.1. Calore rilasciato	87
6.1.1. Calcolo del calore rilasciato	87
6.1.2. Modello per il post processing dei dati	88
6.2. Taratura del motore	90
MATERIALE A SUPPORTO	91
CONCLUSIONI	95
BIBLIOGRAFIA	97

INTRODUZIONE

In questo documento verrà trattato il lavoro che ha portato alla realizzazione di un sistema di misurazione e acquisizione delle onde di pressione che si generano in aspirazione e della pressione in camera di combustione di un motore monocilindrico *KTM LC4*. Tale sistema propulsivo è equipaggiato sulla vettura di Formula SAE, la *P4 Evoluzione*, del *Polimarche Racing Team*.

Gli obiettivi di questa trattazione sono principalmente due. In primo luogo, si vogliono osservare gli effetti dinamici che avvengono si generano durante la corsa di aspirazione. Osservare da vicino questo fenomeno può essere innanzitutto utile per la validazione dei modelli monodimensionali, poi, aspetto sicuramente più, può essere d'aiuto per valutare meglio parametri, come geometrie e/o anticipi, al fine di migliorare il coefficiente di riempimento e dunque aumentare il rendimento del motore. In secondo luogo, si vuole effettuare un'analisi della combustione. Questo tipo di analisi si basa principalmente sull'osservazione della traccia della pressione all'interno del cilindro. Questo genere di osservazioni è in grado di aiutare nella calibrazione del motore, ovvero nello studio di molteplici parametri, tra i quali l'ignition timing, nella comprensione dei principi di progettazione, nella validazione dei modelli, questo aspetto è fondamentale durante gli eventi statici in gara, e la diagnostica del motore, per esempio sarà possibile monitorare fenomeni dannosi come quello del battito in testa.

La trattazione sarà avviata analizzando nel dettaglio i fenomeni che si vogliono osservare. Si procederà poi con la fase progettuale del sistema di misurazione: scelta dei sensori e il loro posizionamento. Successivamente, con l'aiuto del software *LabVIEW* si cercherà di realizzare il programma che permetterà di procedere con le misurazioni che saranno poi raccolte e processate, così da avere un'analisi più dettagliata dei fenomeni. La trattazione si concluderà con delle considerazioni su tutto il lavoro svolto.

Si vuole precisare un obiettivo molto importante di questo studio. Il progetto in questione è confezionato per effettuare studi sul *KTM LC4*, ma un goal molto importante sarebbe quello di cercare di estendere la tesi anche a più tipologie o marche di sistemi produttivi, considerando perciò il sistema di analisi universale.

1. LA FORMULA SAE

1.1. Cos'è la formula SAE

La *Formula SAE* ®, istituita dalla *Society of Automotive Engineers*, è una competizione sportiva, alla quale possono partecipare i team di studenti delle università aderenti. I team hanno l'obiettivo di ideare, progettare, fabbricare, sviluppare una monoposto che sia conforme al regolamento. Le monoposte verranno poi giudicate in una serie di eventi statici e dinamici, incluso: ispezione tecnica, business plan, presentazione, ingegnerizzazione, collaudo e performance di resistenza su un tracciato.

La *Formula SAE* è un'esperienza multidisciplinare nella quale gli studenti hanno la possibilità di mettere in pratica le conoscenze tecniche acquisite durante il percorso di studi e di valorizzare il significato del lavoro di squadra. Nonostante il regolamento imponga precise restrizioni atte a garantire la sicurezza e a limitare la dimensione delle vetture, è consentito agli studenti di esprimere al meglio il loro talento e la loro creatività. La competizione è articolata in modo tale da premiare non il team che ha elaborato l'auto più veloce, quanto il team che ha realizzato il miglior connubio di prestazioni, economicità, producibilità e vendibilità della propria vettura. La chiave del successo risiede pertanto in un efficiente lavoro di squadra, basato sulla coesione dei membri del team e sul loro interscambio di informazioni, al fine di ottimizzare le fasi di progettazione e costruzione. Il target di mercato della vettura realizzata è il pilota non professionista, per il quale la macchina da corsa deve offrire caratteristiche di guida molto buone, con particolare riguardo all'accelerazione, alla frenata e alla guidabilità. Essa dovrebbe essere, quindi, offerta ad un prezzo ragionevole, ma allo stesso tempo, essere performante ed affidabile. In aggiunta, il valore di mercato dell'auto è strettamente dipendente da altri fattori: l'estetica, l'ergonomia e l'utilizzo di componenti standard facilmente disponibili per la sostituzione.

1.2. Polimarche Racing Team

Molte, tra le più accreditate università del mondo, ormai da tempo, hanno aderito a questo importante evento, mostrando il proprio prestigio e la capacità dei propri studenti a collaborare ed operare insieme.

L'Università Politecnica delle Marche è da tempo presente nella competizione di Formula SAE dal 2014 con il Polimarche Racing Team. Fin dal primo anno di partecipazione, le monoposto progettate e realizzate presso i laboratori della facoltà di ingegneria si sono rivelate competitive con le vetture realizzate da altre università con molti più anni di esperienza.

Il team 2021 è composto da circa 70 studenti divisi in 7 reparti: aerodinamica, dinamica del veicolo, elettronica, marketing, powertrain e telaio; ci sono, poi, 4 piloti sempre studenti e membri dei vari reparti. Tutte le attività del team sono coordinate da un team manager e un team leader tecnico a cui fanno capo i vari capo-reparti.

Il team ogni anno ha progettato, realizzato e collaudato una nuova monoposto in circa 10 mesi e, considerando i risultati ottenuti e il breve tempo a disposizione, si evince come l'impegno, la passione e la tenacia degli studenti sia stata determinante nel raggiungere l'obiettivo di realizzare una monoposto competitiva.

Dietro un evento che si manifesta in pochi giorni su una pista, c'è lo sforzo, l'impegno e il sacrificio di un gruppo di ricercatori, docenti, borsisti e studenti che, durante tutto l'anno, si adoperano per potersi misurare e affrontare le varie problematiche di questo particolare lavoro.



Figura 1 – P4 Evoluzione

Il *Polimarche Racing Team* ha gareggiato anche quest'anno con il prototipo denominato "P4 Evoluzione" (fig. 1), quinto prodotto, che ha dimostrato di avere ottime potenzialità negli eventi di *Formula EAST* a Budapest, in Ungheria, presso l'*Hungaroring*, e di *Formula SAE Italy* a Varano de' Melegari in Italia.

1.3. Regolamento Formula SAE

Gli studenti nel progettare le monoposto devono attenersi al regolamento della competizione, pena esclusione dalle gare. Il regolamento pone vincoli in tutti gli ambiti della vettura, come ad esempio: dimensioni massime della vettura, le componenti del telaio, i materiali utilizzabili e le modalità di collegamento. Ampio spazio viene lasciato alle soluzioni tecniche adottabili.

Per quanto riguarda la sezione powertrain viene specificato il liquido di raffreddamento utilizzabile, ovvero solo acqua senza alcun additivo, vengono date indicazioni per le dimensioni dei contenitori di recupero liquidi che ogni monoposto deve avere ed altre limitazioni che riguardano la trasmissione rivolte alla sicurezza. Sono poste limitazioni anche per la tipologia di motore che si può utilizzare, motore a combustione interna a pistoncini 4 tempi con cilindrata massima di 700 cm³ per ciclo, non sono ammessi motori ibridi. L'alimentazione del motore può essere fatta con la benzina 95RON minimo oppure con etanolo E85.

Ci sono limitazioni anche per il sistema di aspirazione dell'aria che deve presentare una sezione ristretta di passaggio con diametro massimo pari a 20 mm nel caso di alimentazione a benzina e di 19 mm se alimentato ad etanolo. Questa sezione ristretta deve avere una determinata posizione all'interno del sistema di aspirazione in base alla tipologia di motore se aspirato (fig. 2) o sovralimentato; nel caso di motore sovralimentato è definito anche l'ordine con cui disporre i componenti, sia in presenza di intercooler che in sua assenza (fig. 3).

Altre limitazioni sono indicate anche per alcuni componenti direttamente connessi al motore o necessari per il suo funzionamento come: il corpo farfallato che deve essere unico, indipendente dal numero di cilindri e può essere di tipo elettronico; il sistema di alimentazione del combustibile deve rispettare determinati requisiti dall'imbocco del serbatoio del carburante fino al sistema di iniezione.

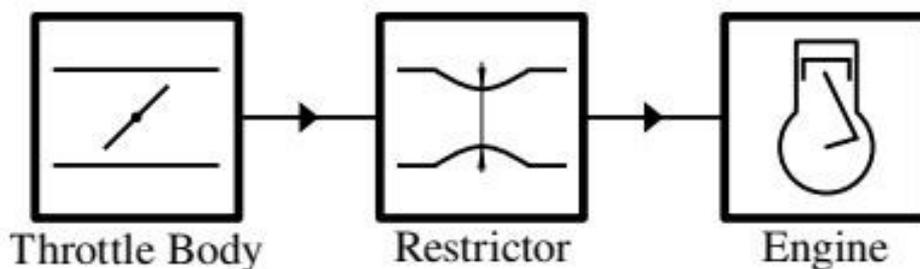


Figura 2 – Configurazione di aspirazione per i motori aspirati

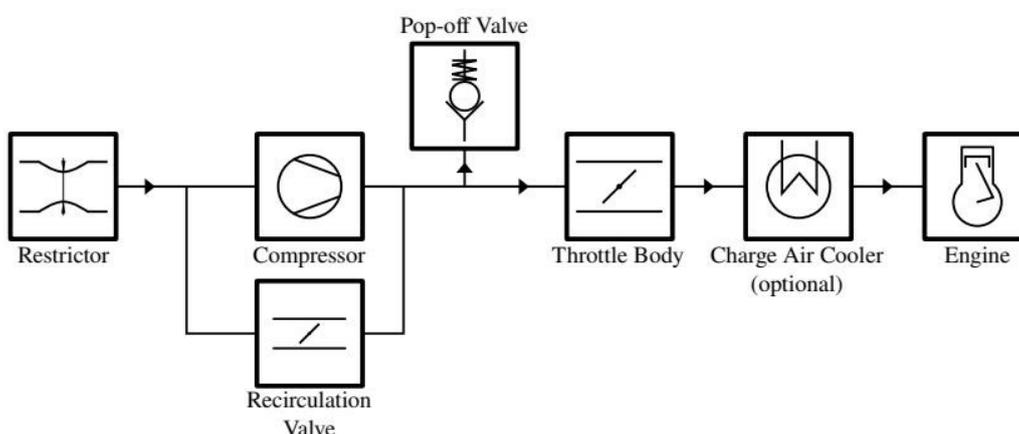


Figura 3 – Configurazione di aspirazione per motori sovralimentati

Altre limitazioni sono indicate anche per alcuni componenti direttamente connessi al motore o necessari per il suo funzionamento come: il corpo farfallato che deve essere unico, indipendente dal numero di cilindri e può essere di tipo elettronico; il sistema di alimentazione del combustibile deve rispettare determinati requisiti dall'imbocco del serbatoio del carburante fino al sistema di iniezione.

Sono regolamentate anche le lunghezze dei condotti di aspirazione e scarico; tutti i componenti del sistema di aspirazione dell'aria e di alimentazione del combustibile devono esser posizionati all'interno della superficie definita dal roll bar e dal bordo esterno dei quattro pneumatici (fig. 4).

Infine, ogni vettura deve essere equipaggiata con un 'on-board starter' ed essere in grado di essere messa in moto senza alcun ausilio esterno durante la gara.

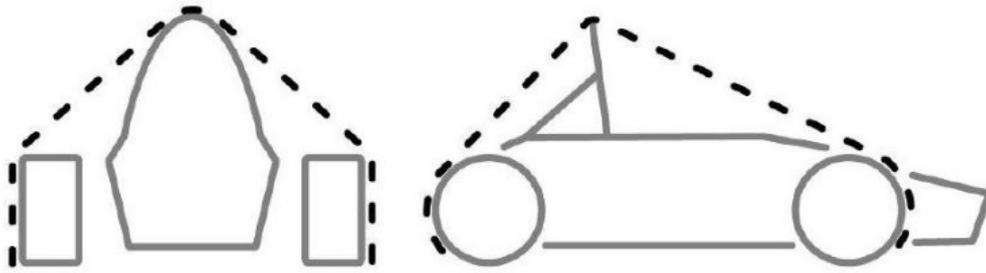


Figura 4 – Inviluppo per l'aspirazione d'aria e per il sistema di rifornimento

1.3.1. Le prove in gara

Prima di poter partecipare alle prove guidate, le vetture vengono sottoposte ad una serie di verifiche ed ispezioni, note comunemente come "*techs*", da parte dei giudici, che ne verificano la conformità al regolamento, soprattutto per quanto concerne le norme preposte a garantire l'incolumità del pilota.

Dopo il superamento dell'ispezione avviene il rifornimento della vettura che è successivamente posizionata sulla *tilt table*, una piattaforma in grado di inclinare il prototipo su entrambi i lati fino ad un angolo di 60 gradi, al fine di certificare che non vi sia perdita di liquidi. Prima delle prove dinamiche sono affrontate altre prove statiche tra le quali, il *noise test*, il *BSPD test* e il *brake test*.

Affrontate le prove statiche è il momento delle prove dinamiche in cui vengono assegnati punti per un totale di 1000 punti. Il team che realizza il maggior punteggio vince l'evento Formula SAE organizzato per quella nazione.

1.4. Il motore

Il motore che equipaggia la *P4 Evoluzione* è il monocilindrico di derivazione motociclistica *LC4* della *KTM*. Il motore è stato reso sovralimentato grazie ad un sistema di turbocompressore. Il team è passato ad un motore monocilindrico turbo *KTM 690* dopo aver utilizzato per quattro anni un motore turbo a 3 cilindri per autoveicoli. La decisione arriva dopo mesi passati a studiare ogni opzione pratica, cercando sempre di ottenere le migliori prestazioni e la migliore affidabilità (fig. 5).



Figura 5 – Motore *KTM LC4* sovralimentato

Il reparto powertrain ha deciso di utilizzare benzina RON 95 piuttosto che E85, il quale è soggetto ad una limitazione nell'immissione dell'aria che lo rende meno conveniente della benzina. E85 ha un calore latente di evaporazione più elevato e una minore tendenza alla detonazione. Entrambi questi aspetti consentono rapporti di compressione più elevati e dunque una maggiore efficienza del motore. Tuttavia, il costo dell'E85 è il 300% più alto della benzina.

	RON 98	E85
Restrizione [mm]	20	19
Portata massima [Kg/s]	0.074	0.067
Potere calorifico [MJ/Kg]	43	29.53
Rapporto stechiometrico [A/F]	14.5	9.8
Massima potenza teorica [MW]	0.219448276	0.201888776

E' anche importante spiegare quali sono le motivazioni che hanno spinto a preferire una configurazione sovralimentata piuttosto che una aspirata. Per un motore di *Formula SAE* gli obiettivi principali sono:

1. Rapporto potenza/peso alto;
2. Efficienza del carburante.

3. Il motore *KTM LC4* è un buon propulsore grazie alla cilindrata elevata rispetto alle norme di *Formula SAE*, al peso molto contenuto, al design moderno e alla sua potenza. Allo stesso tempo, le esperienze pregresse del team con un motore turbo *Smart-Mercedes 700cc* hanno permesso di osservare che con il turbo è possibile migliorare l'efficienza termica del motore, anche la curva di coppia.

1.5. ECU

L'unità di controllo motore (dall'inglese Engine Control Unit) anche detta Engine Control Module (ECM) e Powertrain Control Unit/Module (PCU, PCM) è un dispositivo per la gestione elettronica-digitale della formazione della miscela e della sua combustione, per il contenimento delle emissioni inquinanti di un motore a combustione interna. Le più semplici ECU controllano soltanto la quantità di carburante iniettato all'interno di ogni cilindro per ciclo. Le più avanzate invece, presenti nella maggior parte delle auto moderne, controllano anche il tempo d'iniezione, il variable cam timing, la fasatura d'accensione e tutte le periferiche del sistema di controllo.

Questo sistema per funzionare necessita di sensori per:

- Temperatura motore
- Pressione e temperatura olio
- Temperatura aria aspirata
- Pressione atmosferica
- Pressione e temperatura aria nei condotti d'aspirazione
- Fase, controlla la fasatura della distribuzione e del pistone
- Di caduta o ribaltamento (per arresto del motore e del circuito carburante)
- Apertura valvole primarie o del comando gas, nel primo caso si adoperano due valvole a farfalla nel condotto d'aspirazione, di cui una è controllata elettronicamente e regola l'accelerazione, nel secondo generalmente si utilizza solo la valvola controllata elettronicamente
- N° giri motore;

- Lambda;
- Sensore di detonazione.

La centralina scelta per la gestione del motore è la *MoTeC M800* (fig. 6). Questa è molto versatile, infatti è adatta a quasi tutte le applicazioni dei moderni motori a combustione interna fino a 12 cilindri, è inoltre adatta ai motori rotativi con camera doppia, tripla o quadruple. Offre la massima precisione per il controllo dei più recenti progressi nel mondo automotive come la fasatura variabile in modo continuo e il drive by wire, pur mantenendo la flessibilità per adattarsi ad una vasta gamma di utenti. Questa ECU altamente avanzata è l'ideale per il motorsport e si integra perfettamente in una soluzione completa per la gestione del motore e l'acquisizione dati.



Figura 6 – *Motec M800*

1.6. Simulazione monodimensionale del motore

Per gli studi di impostazione, per la progettazione e, in generale, per l'analisi del funzionamento dei motori a combustione interna, riveste grande importanza una particolare tipologia di software definiti monodimensionali che, in maniera versatile ed efficace, permettono la modellazione dell'intero sistema motore al fine di simularne il

funzionamento, con una elevata velocità di esecuzione dei calcoli di simulazione, consentendo di ridurre il numero di costose e complesse prove sperimentali.

Fra questi software, nello specifico campo dei motori endotermici alternativi, gli strumenti più diffusi sia a livello universitario che industriale, sono senza dubbio il codice *GT-SUITE* di *Gamma Technologies* ed il codice *Wave* di *Ricardo Software*, entrambi modelli di calcolo gas-dinamico che si propongono di risolvere le equazioni di bilancio della massa, della quantità di moto e dell'energia in funzione del tempo e dello spazio, mediando la soluzione di tali equazioni sull'asse del condotto, per mezzo di una formulazione monodimensionale alle differenze finite.

In questo caso specifico la scelta è ricaduta sul primo sopra citato e cioè *GT-SUITE* per via del suo approccio chiaro e facilmente comprensibile.

Le equazioni citate, fondamentali per lo studio del moto dei fluidi, sono di seguito riportate:

- Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = 0$$

- Equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + S_M$$

- Equazione di conservazione dell'energia:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\vec{\nabla}(p\vec{V}) + \vec{\nabla}(\vec{V} \cdot \vec{\tau}) + \vec{\nabla}(K\nabla T) + S_E$$

Le simulazioni e i modelli *GT SUITE* del motore oggetto di questa tesi sono fornite gentilmente dal reparto powertrain del *Polimarche Racing Team*. L'autore di questa tesi non si è occupato della modellazione monodimensionale del sistema propulsivo ma è autorizzato dal team stesso ad utilizzare tutto il materiale fornito.

2. FENOMENI DINAMICI

I fenomeni legati alla non stazionarietà del flusso in un motore a combustione interna, indicati globalmente con il termine di effetti dinamici, possono influenzare sensibilmente l'andamento del processo di riempimento di un motore quattro tempi. Per analizzarli in dettaglio conviene distinguere l'effetto dovuto al moto di trasporto non stazionario del fluido, effetto inerziale, da quelli legati al moto delle onde di pressione, effetti d'onda, che si propagano attraverso i sistemi di aspirazione e scarico con velocità del suono, che mediamente è di un ordine di grandezza superiore alla velocità con cui si muovono i fluidi.

2.1. Che cos'è un'onda di pressione

Potrebbe essere scontato definire il concetto di onda ma nel caso in questione può aiutare a capire meglio i concetti trattati. Banalmente, un'onda è una variazione di stato che si propaga nello spazio e nel tempo. Se si attacca ad una mano una lunga corda, che poi sarà fissata ad un muro, e si imprime a detta estremità un brusco movimento trasversale, si osserva che questo movimento si propaga lungo la corda. Si propaga nello spazio in quanto esso ha viaggiato dalla mano al muro e si propaga nel tempo in quanto il movimento ha impiegato un certo tempo per viaggiare dalla mano al muro. Giunta al muro l'onda si riflette secondo certe modalità e tornando indietro. Se non ci fossero dissipazione di energia e la mano fosse mantenuta ferma, l'onda continuerebbe ad andare avanti e indietro indefinitamente lungo la corda.

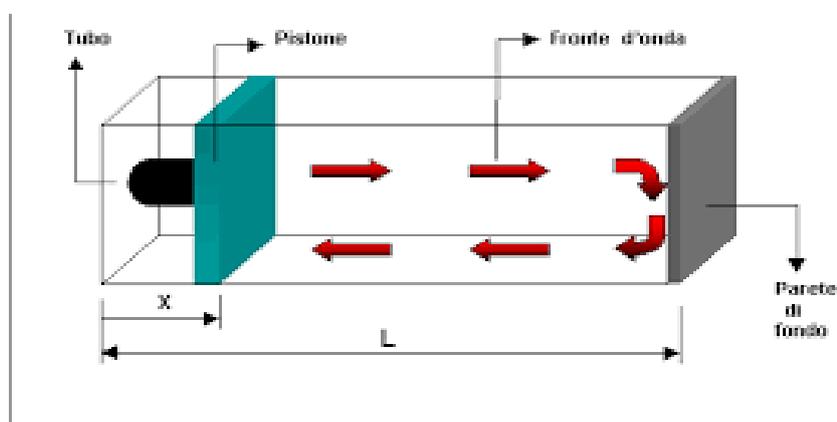


Figura 7 – Propagazione d'onda in un condotto chiuso

Se si prende un tubo di lunghezza indefinita, pieno di aria, aperto ad un'estremità e chiusa dall'altra da uno stantuffo inizialmente fermo, e poi imprimendo allo stantuffo un rapido movimento, si genera un'onda nell'aria contenuta nel tubo. Tale movimento, in assenza di attriti e dispersioni, si propaga lungo il tubo mantenendosi uguale a sé stesso, riflettendosi all'estremità del tubo secondo certe modalità e poi tornando indietro (fig. 7). Questo tipo di onda progressiva è quello di maggiore interesse motoristico e conviene approfondirlo quanto serve.

2.2. Effetti d'onda

E' conveniente pensare che a generare i fenomeni dinamici globali, che influenzano il processo di riempimento, accanto agli effetti inerziali concorrano anche quelli prodotti dalle onde di pressione che si propagano attraverso i sistemi di aspirazione e scarico, riflettendosi ad ogni discontinuità. Per analizzare questi fenomeni, è comodo distinguere gli effetti d'onda che si verificano a valvola aperta, i quali interferiscono direttamente sull'ingresso della carica fresca nel cilindro, e da quelli prodotti dalle oscillazioni di pressione che si manifestano nel condotto a valvola chiusa, le quali determinano le condizioni che regnano vicino ad essa al momento della sua apertura.

2.3. Come operano le onde nei motori

L'onda di pressione generata nel condotto di aspirazione si propaga fino alla sua estremità aperta e vi si riflette secondo le leggi prima citate, cioè trasformandosi in un'onda di sovrappressione che torna indietro verso il cilindro. Giunta alla valvola, essa spinge nel cilindro l'aria compressa, operando la voluta sovralimentazione dinamica (fig. 8).

Quando il pistone inizia la corsa di aspirazione, genera, dal lato valvola, un impulso di depressione. Questo si propaga nel condotto con la velocità del suono, fino alla prima discontinuità presentante un brusco allargamento di sezione. Se il volume a valle risulta più grande rispetto a quello del condotto, la differenza di pressione tra il condotto e l'ambiente esterno deve annullarsi nella sezione terminale del primo. Da questa condizione al contorno del sistema, deriva che un impulso di pressione del segno opposto si genera all'estremità aperta, risalendo il condotto in senso inverso, in modo che l'effetto globale delle due onde sia quello di annullare la differenza di pressione nella sezione

terminale. La depressione globale, prodotta dal pistone nella prima metà della corsa di aspirazione, può essere vista come una somma di successivi impulsi di depressione.

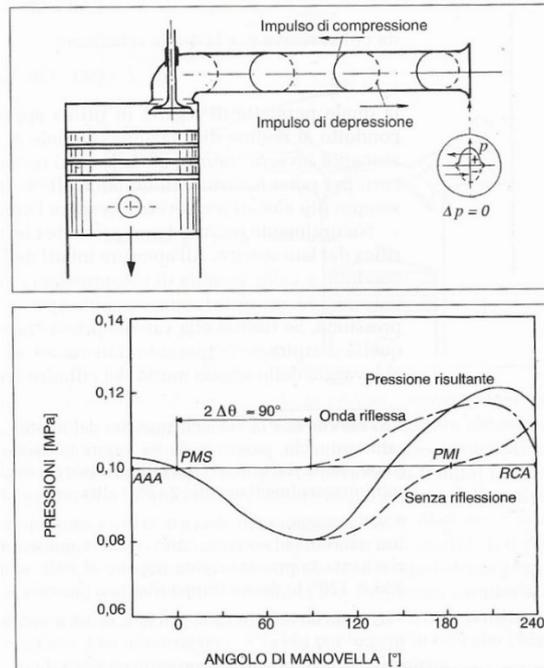


Figura 8 – Schematizzazione effetti d'onda

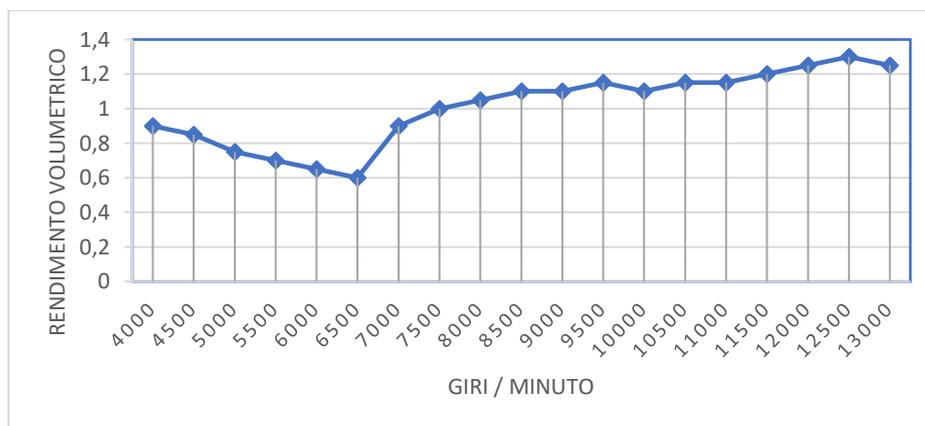
Tutti questi percorrono il condotto fino all'estremità aperta, dove sono riflessi come impulsi di compressione. Se la lunghezza del loro percorso, andata e ritorno, è tale che i primi cominciano a tornare in prossimità della valvola nella seconda metà della fase di aspirazione, ossia circa 90° dopo il PMS, generano un'onda riflessa positiva che, sommata al valore di pressione che si avrebbe avuto in assenza di riflessione, provoca un aumento della pressione risultante, proprio quando il pistone non è più in grado di aspirare carica fresca, favorendo così il riempimento del cilindro. L'onda di sovrappressione generata dall'espulsione dei gas nel condotto di scarico, si propaga fino alla sua estremità aperta trasformandosi in un'onda di depressione, che torna indietro verso il cilindro. Se, nell'istante che vi giunge, le valvole di scarico e di aspirazione sono in fase di incrocio, cioè contemporaneamente semi aperte, la depressione aspira aria dal tubo di aspirazione attraverso la camera di combustione, ed opera tre funzioni: la riaspirazione dei gas combusti eventualmente entrati nel condotto di aspirazione durante l'incrocio, il lavaggio della camera di combustione e il preavviamento dell'onda di aspirazione.

2.4. Ruolo dalla fasatura

La frequenza delle oscillazioni del fluido nei condotti, in particolare il fatto che le onde partono e arrivano al momento giusto per massimizzare gli effetti utili, dipende in sostanza dalle lunghezze che il progettista assegna ai condotti stessi. L'intensità delle onde, in particolare la loro capacità di spingere nel cilindro la maggiore quantità di aria possibile, ovvero operare le altre funzioni dipende sostanzialmente dalle sezioni che il progettista assegna ai condotti. Con ciò egli massimizza quello che è definito rendimento volumetrico totale: far entrare nel cilindro la massima possibile massa di aria. La capacità di intrappolare nel cilindro la massima possibile frazione di aria in ingresso dipende sostanzialmente dalla fasatura. E' questa che permette di aprire e chiudere le valvole nei momenti più opportuni. Con questo tipo di regolazione è possibile definire il rendimento di intrappolamento. Il prodotto dei due è, il rendimento volumetrico effettivo: come si vede esso dipende dal perfetto accordo tra le lunghezze e le sezioni di condotti e valvole, e fasatura, che vengono quindi a costituire problemi strettamente connessi. L'intera ottimizzazione fluidodinamica del motore consiste nell'ottenere questo perfetto accordo.

2.5. Analisi dei casi reali

Per analizzare nel caso reale le onde di pressione è necessario scegliere il numero di giri al quale corrisponde il valore massimo di rendimento volumetrico. Nella seguente figura è riportato un esempio per un motore da competizione.



Si ipotizzi che si voglia vedere qual è la situazione fluidodinamica del motore nel punto di massimo rendimento volumetrico. Come prima cosa è giusto definire le grandezze:

- 1) La curva indicata con la “croce” rappresenta la pressione assoluta nel cilindro;
- 2) La curva indicata con il “triangolo” rappresenta la pressione assoluta immediatamente a monte della valvola di aspirazione;
- 3) La curva indicata con il “cerchio” rappresenta la pressione assoluta immediatamente a valle della valvola di scarico.

La situazione di questa situazione è mostrata in figura (fig. 9).

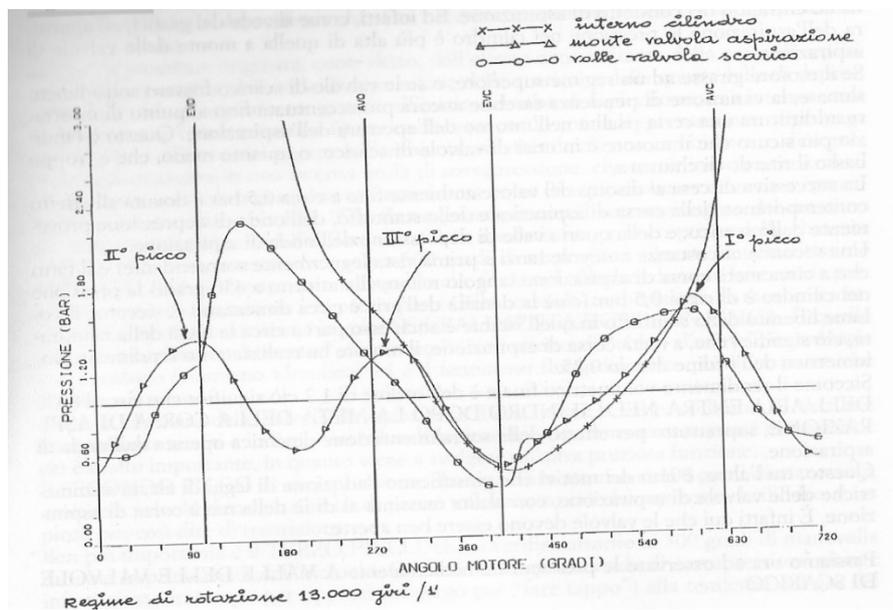


Figura 9 – Andamento delle pressioni nei tre punti evidenziati

Le varie grandezze sono riportate in funzione dell'angolo di manovella, per un intero ciclo di 720 gradi, a partire dal punto morto superiore di combustione. Le sigle indicano rispettivamente:

- EVO – apertura valvole di scarico;
- AVO – apertura valvole di aspirazione;
- EVC – chiusura valvole di scarico;
- AVC – chiusura valvole di aspirazione.

2.5.1. Pressioni nel cilindro

All'apertura delle valvole di scarico, la pressione, partendo da un valore di qualche bar, precipita rapidamente raggiungendo il valore ambiente, 1 bar, circa a metà della fase di incrocio. Continua successivamente a diminuire raggiungendo il minimo di circa 0.5 bar verso la fine, o poco più in là, della fase dell'incrocio. Risale infine regolarmente raggiungendo circa 2.4 bar alla chiusura delle valvole di aspirazione, dopodiché continua a salire per effetto della compressione operata dal pistone. Sono da notare alcune interessanti circostanze. La prima è il fatto che la curva cambia pendenza radicalmente, precipitando più rapidamente, all'apertura delle valvole di aspirazione. Ciò significa che una certa quantità di gas combusti sta sfogandosi attraverso le valvole di aspirazione ed entrando nel condotto di aspirazione. Ed infatti, come si vede dai grafici, all'apertura dell'aspirazione la pressione nel cilindro è più alta di quella a monte delle valvole. Siccome il rendimento volumetrico finale è dell'ordine di 1.3 ciò significa che circa l'80% dell'aria entra nel cilindro dopo la metà della corsa di aspirazione, soprattutto per effetto della sovralimentazione dinamica operata dall'onda di aspirazione.

2.5.2. Pressioni a valle della valvola di scarico

All'apertura della valvola di scarico si origina, al condotto di scarico, un'intensa onda di sovrappressione, che raggiunge un'intensità dell'ordine di 2.4 bar assoluti. Essa, in accordo con le leggi descritte, si propaga lungo il condotto, si riflette alla sua estremità e risale all'indietro nel tubo verso il cilindro, dove giunge giusto in fase di incrocio. Questa violenta depressione opera, attraverso le valvole di aspirazione, dapprima il richiamo dei gas combusti penetrati nel tubo di aspirazione, e successivamente il lavaggio della camera di combustione. In questa fase la pressione dell'onda di scarico è infatti minori sia di quella nel cilindro che di quella a monte della valvola di aspirazione: è perciò chiaro che è in corso un trafilamento di fluido attraverso ambedue. Si nota pure che nel cilindro, e anche a monte della valvola di aspirazione, la depressione inizia prima del punto morto superiore di incrocio, 360 gradi di manovella, ed è inoltre assai intensa: l'onda di scarico fornisce cioè anche il primo impulso della fase di avviamento alla fase di aspirazione.

Al di là della chiusura delle valvole di scarico il gas, come si vede, continua ad oscillare intensamente producendo un picco di sovrappressione ed una seconda valle di depressione e ripresentandosi con l'inizio del terzo picco di sovrappressione per il ciclo successivo.

Questi fenomeni, che avvengono a valvole di scarico ormai chiuse non influiscono più su ciò che avviene nel cilindro ed hanno importanza solo per la fluidodinamica del tubo di scarico.

2.5.3. Pressioni a monte della valvola di aspirazione

Si parte dalla forte depressione che si ha nel cilindro a metà della corsa di aspirazione, circa 450 gradi. Questa depressione originata dall'effetto concomitante della corsa di aspirazione genera, all'inizio del tubo di aspirazione, un'intensa onda di depressione: l'onda primaria. Quest'onda, in accordo con le leggi enunciate, si propaga nel tubo fino all'estremità aperta sull'ambiente, riflettendosi con un cambiamento di segno, cioè trasformandosi in una intensa onda di sovrappressione, che torna indietro verso il cilindro. Essa comincia a giungervi attorno a metà corsa di aspirazione e comincia a immettervi un intenso flusso di aria. Tale flusso prosegue con il sopraggiungere del massimo picco di sovrappressione, dell'ordine di 1.6 bar assoluti, fino a poco prima della chiusura delle valvole di aspirazione, attorno ai 600 gradi di manovella. Questo importantissimo primo picco di sovrappressione è quello che forza nel cilindro, durante la seconda parte della corsa di aspirazione e la prima parte della compressione, la massima massa di aria, operando cioè una intensa sovralimentazione dinamica. E' quello che comunemente viene chiamato "*effetto ram*" o meglio conosciuto come "*colpo d'ariete*" ed è il fenomeno fluidodinamico più importante che avviene nel motore. Dopo la chiusura delle valvole di aspirazione, l'aria continua ad oscillare intensamente avanti e dietro nel condotto di aspirazione.

Il secondo picco di sovrappressione, che si verifica attorno ai 100 gradi di manovella, avviene a valvole chiuse, e non ha di per sé influenza su ciò che avviene nel cilindro: è un picco per così dire di transizione.

Ben più importante è il terzo picco, che si verifica attorno ai 300 gradi di manovella durante la prima metà dell'incrocio. Come si vede, questa onda di sovrappressione giunge infatti giusto in tempo per opporsi alla tendenza del gas del cilindro, ancora in sovrappressione, ad entrare nel condotto di aspirazione. Senza l'effetto di contrasto di questo terzo picco ne entrerebbe ancora di più, con detrimento del rendimento volumetrico.

Qualora, all'arrivo del terzo picco, la pressione nel cilindro fosse inferiore a quella del picco stesso non si avrebbe un semplice effetto tappo, ma un inizio di lavaggio di camera e di sovralimentazione, operata appunto dal terzo picco. L'angolo di incrocio ottimale, come è facile intuire, è largamente determinato da questa situazione di pressioni.

Subito dopo si ha la quarta valle dell'onda di aspirazione, che collabora, assieme alla contemporanea discesa del pistone ed alla valle di depressione di scarico, a generare l'onda di depressione del ciclo successivo.

3. ANALISI DELLA COMBUSTIONE

L'analisi della combustione è un metodo di indagine che si basa sulla misurazione della pressione all'interno del cilindro ad alta frequenza in un motore a combustione interna. Catturando e visualizzando la traccia della pressione rispetto alla posizione dell'albero a gomiti in un motore in funzione, è stato possibile osservare tutti i processi termodinamici vitali. Avere la conoscenza di un tale fenomeno e processo offre allo sviluppatore una visione molto migliore di quanto efficacemente funziona il dato motore. Con l'indagine sulla pressione della camera di combustione è possibile analizzare non solo la combustione ma anche il processo di scambio di gas (fase di bassa pressione). Ciò migliora significativamente la possibilità di avere la corretta calibrazione o sviluppare ulteriormente il motore raggiungendo gli obiettivi richiesti. Proprio per questo il Polimarche Racing Team è interessato ad effettuare un'analisi della combustione: in primo luogo sarà possibile sfruttare i dati per lo studio del fenomeno del knock, ovvero del battito in testa, e per la calibrazione e la realizzazione di mappe ad hoc tramite il software *Motec ECU manager* (fig. 10).

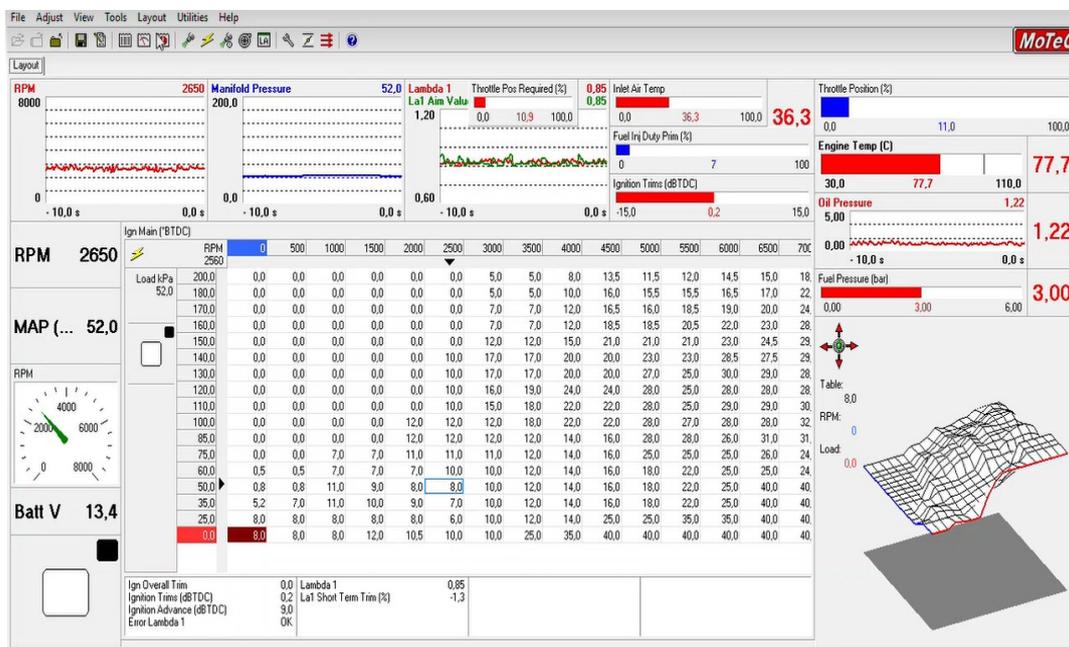


Figura 10 – Interfaccia *Motec ECU manager*

Si potrebbe affermare che nessun'altra tecnologia fornisce informazioni così ricche come l'indicazione della pressione in camera di combustione, o analisi di combustione. Grazie

all'ausilio del sensore di pressione in camera di combustione è possibile visualizzare la traccia della pressione in funzione dell'angolo di manovella. Nelle figure successive sono riportate le tracce delle pressioni in funzione dell'angolo di manovella che saranno utili in fase progettuale per la scelta dei sensori. (fig. 11).

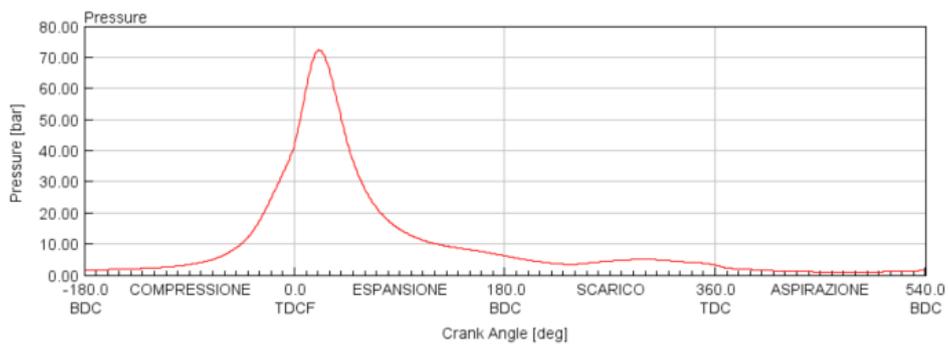


Figura 11.1 – Pressione vs. angolo di manovella 8000 rpm

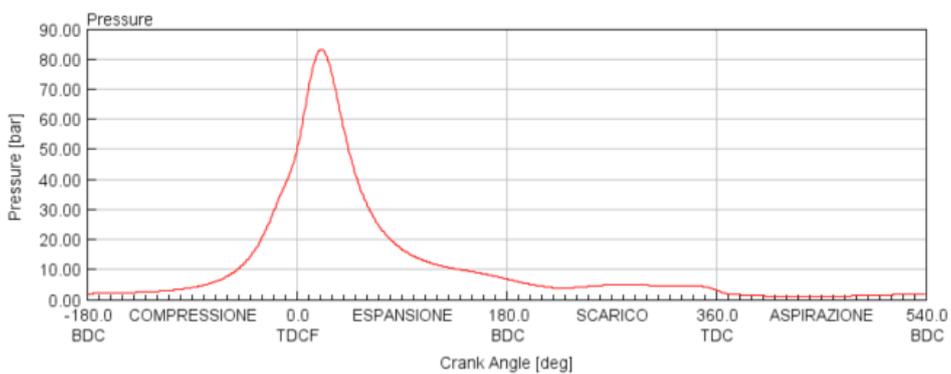


Figura 11.2 – Pressione vs. angolo di manovella 7000 rpm

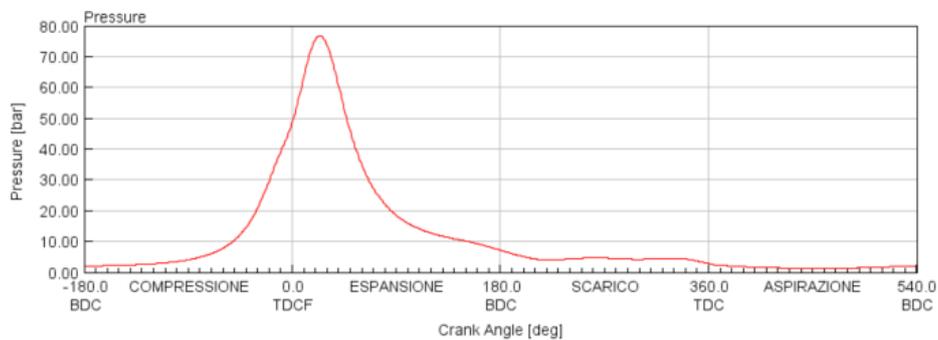


Figura 11.3 – Pressione vs. angolo di manovella 6000 rpm

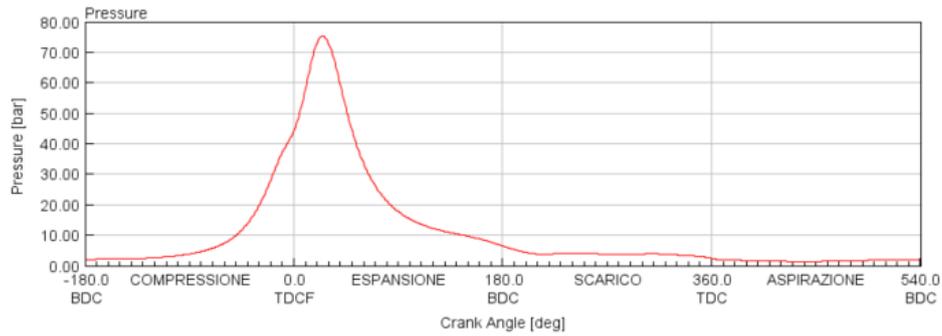


Figura 11.4 – Pressione vs. angolo di manovella 5000 rpm

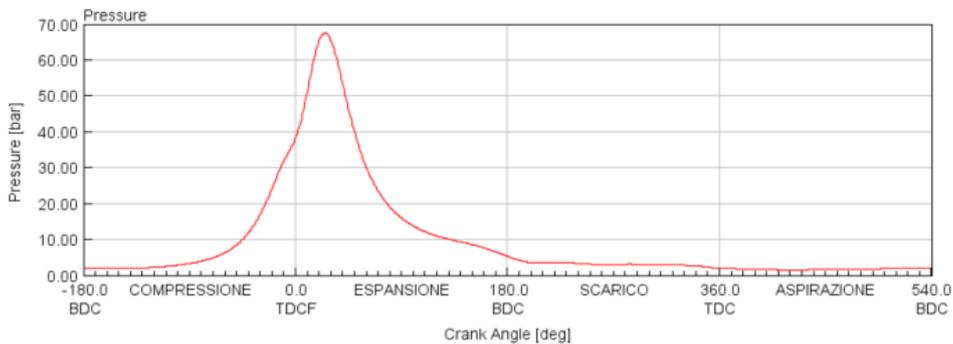


Figura 11.5 – Pressione vs. angolo di manovella 4000 rpm

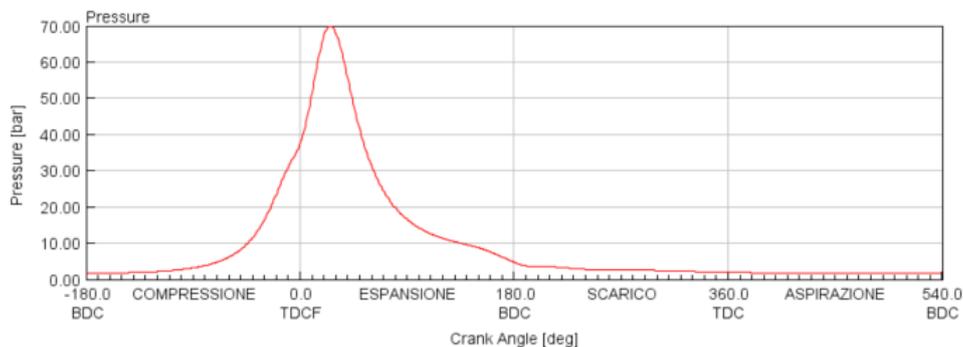


Figura 11.6 - Pressione vs. angolo di manovella 3000 rpm

Dal valore di pressioni in camera di combustione possono essere calcolati e graficati altri valori molto utili per l'analisi della combustione (fig. 12):

- Gradiente di Pressione [bar/deg];
- Calore rilasciato [J/deg];

- Rilascio di calore accumulato [J];
- Rilascio di calore normalizzato.

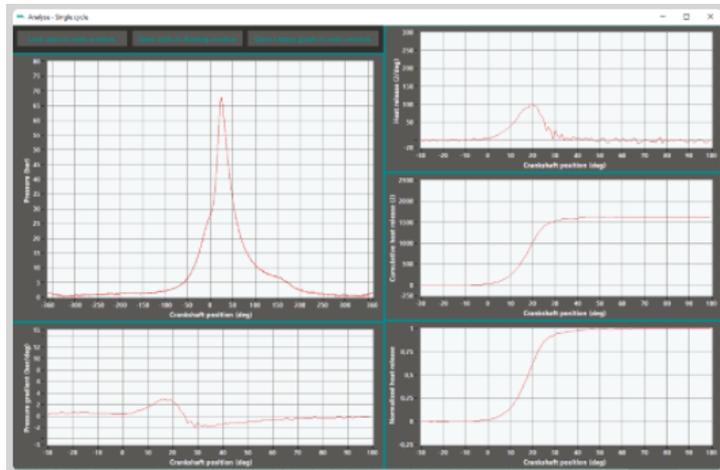


Figura 12 – Andamento tipico dei valori calcolabili

Avendo calcolato la traccia della pressione e i grafici sopra elencati per ogni ciclo, è possibile acquisire i seguenti parametri del ciclo:

- Pressione massima in camera;
- Posizione della pressione massima in camera;
- Valori di posizione della massa bruciata:
 - MFB50: angolo di manovella dove viene rilasciato il 50% di calore;
- PMI, pressione media effettiva indicata;
- Ampiezza del battito.

3.1. Parametri maggiormente usati per la calibrazione del motore

Sono 3 i principali parametri utilizzati per la regolazione e la calibrazione del motore.

3.1.1. MFB50

MFB50 è un acronimo che indica Mass Friction Burned 50, ovvero la frazione di massa bruciata: permette di conoscere il punto dove viene rilasciato il 50% del calore totale. MFB50 ha un valore ottimale in tutti i motori. Ragionando in termini termodinamici è possibile affermare che una combustione a volume costante è più efficiente, in termini energetici, di una combustione a pressione costante. In un ciclo Otto ottimale il rilascio di calore avviene al PMS ed è infinitamente veloce. Infatti in un vero motore la combustione istantanea è impossibile, quindi la combustione deve essere ben posizionata per ottenere il miglior equilibrio tra dispersioni termiche e mantenimento di un accettabile rapporto di espansione. È così che potrebbero essere utilizzati i valori MFB50, poiché è una misura diretta e comparabile di tale equilibrio. In linea di massima il suo valore dovrebbe essere compreso tra 7° e 15° di anticipo del PMS per la maggior parte dei motori.

3.1.2. Ampiezza del battito in testa

La detonazione costituisce una delle forme di combustione anomala più importanti, perché limita le prestazioni ed il rendimento dei motori e nello stesso tempo impone vincoli restrittivi alla formulazione dei carburanti. Essa si manifesta all'esterno con: l'emissione di un caratteristico rumore metallico, simile ad un martellamento (proprio per questo si parla di battito in testa), perdita di potenza, vibrazioni, riscaldamento accentuato, arrivando in condizioni severe al danneggiamento degli organi meccanici del motore (fig. 13). La spiegazione più convincente si basa sull'ipotesi di autoaccensione di una o più parti di una miscela che brucia per ultima (end gas), prima che venga raggiunta dal normale fronte di fiamma. Si supponga che il fronte di fiamma venga avviato regolarmente dallo scoccare della scintilla tra gli elettrodi della candela. Con la sua avanzata esso comprime e riscalda la miscela fresca che trova davanti a sé. Siccome quest'ultima non è mai perfettamente omogenea, né in termini di temperatura, né in composizione, le reazioni di prefiamma si svilupperanno con una diversa rapidità nei vari punti della carica fresca, che dovrebbe essere investita per ultima dal fronte di fiamma. Può quindi accadere che uno o più volumi della miscela si autoaccendano (fig. 14), prima di essere raggiunti dal fronte di fiamma, liberando una forte quantità di energia che produce un brusco aumento di pressione che porta al danneggiamento degli organi meccanici.



Figura 13 – Pistone danneggiato a causa del battito in testa

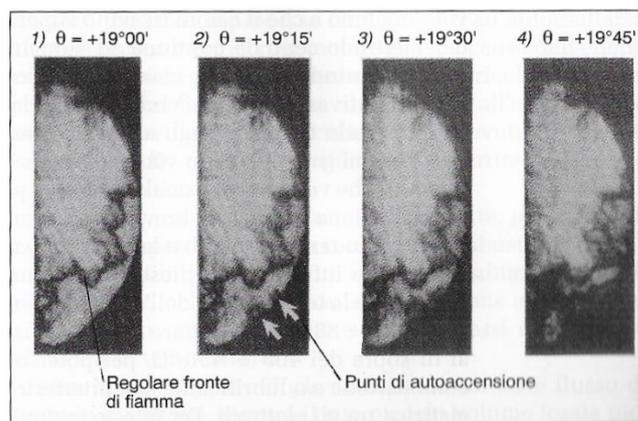


Figura 14 – Sequenza di quattro shadowgrafie relative ad un ciclo di detonazione

L'ampiezza del battito descrive l'ampiezza di quell'oscillazione di pressione ad alta frequenza. Come regola generale, il livello accettabile di detonazione è di 1 bar di ampiezza / 1000 giri/min.

3.1.3. PMI (Lordo)

Descrivere l'integrale della traccia di pressione attraverso i cicli, che è correlato al livello di coppia dei cicli dati. Qualsiasi modifica termodinamica che aumenti la coppia del motore aumenta anche il livello PMI.

3.2. Combustione anormale – Fenomeno di battito in testa

L'effetto della detonazione potrebbe essere monitorato sulla traccia di pressione, poiché è ricoperto da un'oscillazione ad alta frequenza. La sua frequenza dipende principalmente dall'alesaggio, in quanto si tratta di una sovrapposizione delle diverse armoniche delle riflessioni dell'onda di pressione all'interno del cilindro.

Per capirlo meglio, è possibile osservare un gruppo di cicli con la traccia di pressione e la FFT delle tracce di pressione sul lato destro (fig. 15). Tra quei tre cicli di esempio nessuno bussava pesantemente.

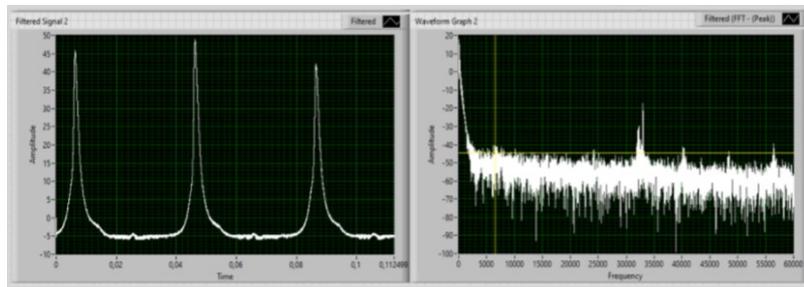


Figura 15 – Analisi della frequenza dei cicli senza battito in testa

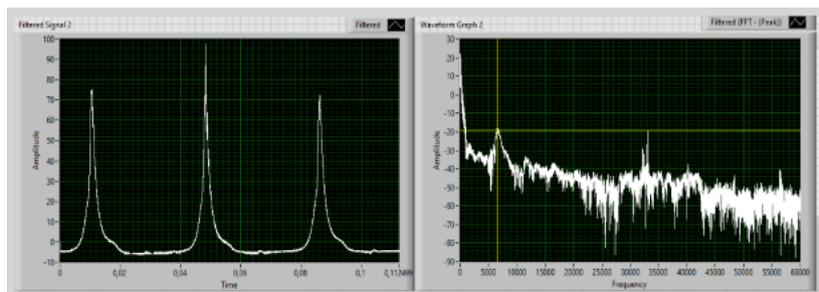


Figura 16 – Analisi della frequenza dei cicli in presenza di battito in testa

Osservando i cicli di forte detonazione, l'analisi della trasformata di Fourier veloce mostra un'immagine chiaramente diversa (fig. 16). Si può osservare una componente di elevata ampiezza. Tale frequenza corrisponde molto da vicino alla frequenza di detonazione che potrebbe essere calcolata in funzione dell'alesaggio.

La detonazione che produce dei picchi di pressione, e dunque di frequenza, può essere dovuta principalmente a due fenomeni:

- Autoignizione;
- Preaccensione.

3.2.1. Autoignizione

E' il principale fenomeno imputato alla presenza della battito in testa. La combustione generata dalla scintilla porta ad un aumento della pressione e della temperatura del cilindro. Questo fenomeno si verifica quando la temperatura di picco locale nella zona incombusta raggiunge la temperatura di autoaccensione della miscela aria-combustibile e la fiamma secondaria inizia a propagarsi da quel punto di accensione spontanea. L'onda di pressione generata si scontra con quella normale. L'autoaccensione è innescata dalla combustione proveniente dallo scocco della scintilla, e quindi potrebbe essere controllata alterando l'anticipo.

3.2.2. Preaccensione

Per preaccensione di una miscela di combustibile si intende il risultato finale di un'insieme di reazioni di preffiamma, le quali liberando energia e fornendo una serie di prodotti instabili di parziale ossidazione, portano all'avvio del processo di combustione senza l'intervento di una sorgente di accensione esterna. Questa condizione si verifica quando l'energia rilasciata dalle prime reazioni chimiche supera la quantità di calore ceduta dal sistema reagente all'ambiente esterno. Come conseguenza la temperatura della miscela aumenta, accelerando rapidamente le varie reazioni di ossidazione, la cui velocità si è visto dipendere essenzialmente dalla temperatura. L'ampiezza della preaccensione è solitamente di magnitudine superiore a quella di un battito standard. Come afferma la definizione sopra menzionata, un evento di detonazione provoca un'oscillazione di pressione ad alta frequenza che potrebbe essere osservata sulla traccia della pressione del cilindro. Poiché un'onda di pressione si propaga sempre con la velocità locale del suono, la frequenza di tale oscillazione sarebbe influenzata dalle dimensioni interne del motore, principalmente dall'alesaggio del cilindro. In figura (fig. 17) è mostrato un'esempio di un ciclo di detonazione con un'ampiezza di detonazione di circa 5 bar.

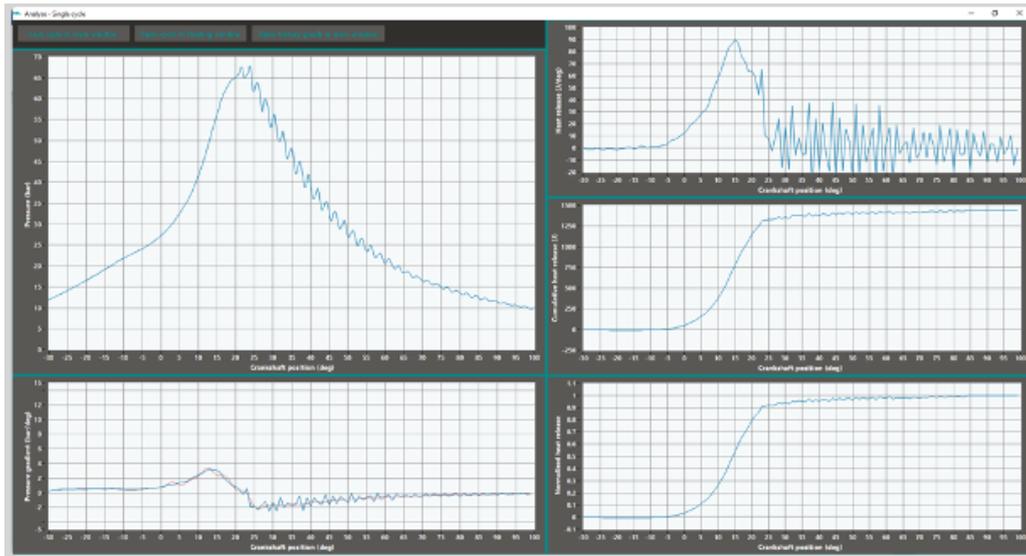


Figura 17 – Analisi di un ciclo con forte detonazione

Osservando questi tipici andamenti, in funzione dell'angolo di manovella, dei valori di pressione nella camera di combustione del motore soggetto a detonazione si possono fare delle osservazioni: dopo uno sviluppo inizialmente regolare, si possono notare delle oscillazioni di pressione gradualmente decrescenti, dovuti all'autoaccensione della parte finale di carica. Al crescere di intensità della detonazione, le oscillazioni anticipano nel tempo e presentano una maggiore ampiezza.

3.3. Applicazioni dell'analisi della combustione

L'analisi della combustione può essere applicata per svariati scopi alcuni dei quali sono di interesse del *Polimarche Racing Team*.

3.3.1. Taratura del motore

Avendo una visione molto più chiara dei processi termodinamici dei motori, la calibrazione del motore potrebbe essere eseguita in modo molto più efficace utilizzando l'indagine sulla pressione del cilindro. E' possibile osservare l'effetto dell'alterazione della fasatura di accensione sulla traccia della pressione in camera di combustione. I valori che si osservano dalla traccia della pressione (fig. 18) permettono di avere

un'occhio diverso sul fenomeno in modo da poter studiare meglio i valori di ignition timing con il software Motec ECU manager (fig. 19).

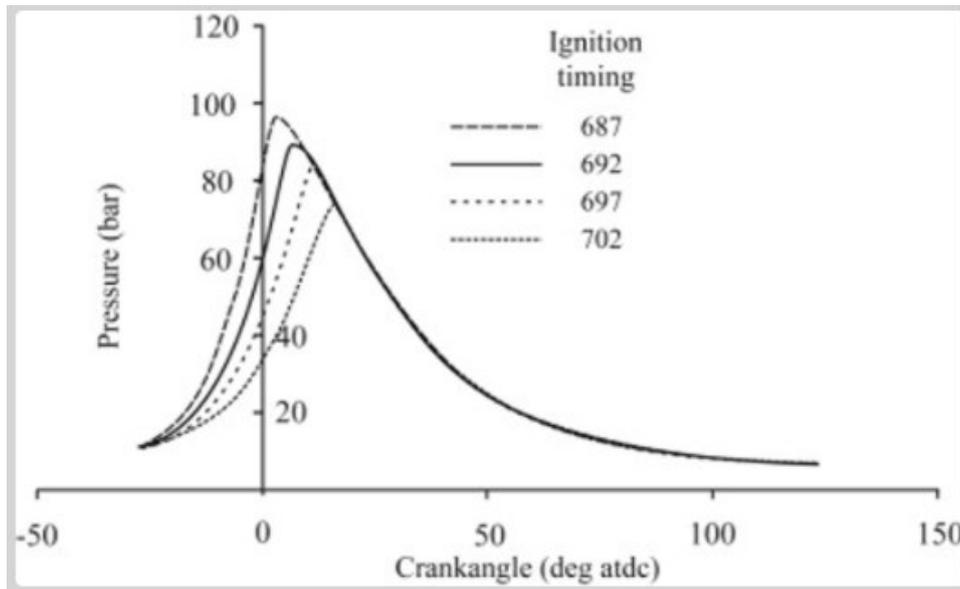


Figura 18 – Influenza teorica dell'alterazione dell'anticipo sulla traccia di pressione in camera

Inj Timing (*BTDC)		RPM	0	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
ET °C	60,0		320,0	320,0	320,0	320,0	320,0	320,0	320,0	360,0	360,0	390,0	390,0	320,0	320,0
	40,0		360,0	360,0	320,0	320,0	320,0	320,0	320,0	360,0	360,0	390,0	390,0	320,0	320,0
	20,0		400,0	400,0	320,0	320,0	320,0	320,0	320,0	360,0	360,0	390,0	390,0	320,0	320,0

Figura 19 – Mappa Motec di regolazione dell'injection timing

La tempistica dell'accensione ha un enorme effetto sull'entità e sulla posizione della pressione di picco del cilindro. Il rapporto aria-combustibile influisce sulla durata della combustione e, a causa del calore latente di evaporazione del carburante, influenza notevolmente la temperatura di picco durante l'evento di combustione, che si avvicina quindi al limite dell'autoaccensione. La calibrazione di un motore ai limiti è sempre un compromesso, in cui si applicano determinati fattori limitanti, come le temperature di detonazione e dei gas di scarico. L'analisi della combustione aiuta a capirli e fornisce una misura diretta al tecnico della calibrazione sul comportamento del motore.

3.3.2. Convalida del modello

I dati sulla pressione delle bombole potrebbero essere ben utilizzati nelle simulazioni del motore agendo come condizioni limite o come dati di convalida. È importante menzionare le varie aree:

- Simulazione dello scambio di gas;
- Simulazione di combustione;
- Simulazione FEM di parti strutturali;
- Simulazione del modello del motore monodimensionale.

I due aspetti fondamentali d'interesse per il reparto powertrain del Polimarche Racing Team sono principalmente la validazione della simulazione di combustione e del modello monodimensionale sviluppati su Gt Suite (fig. 20).

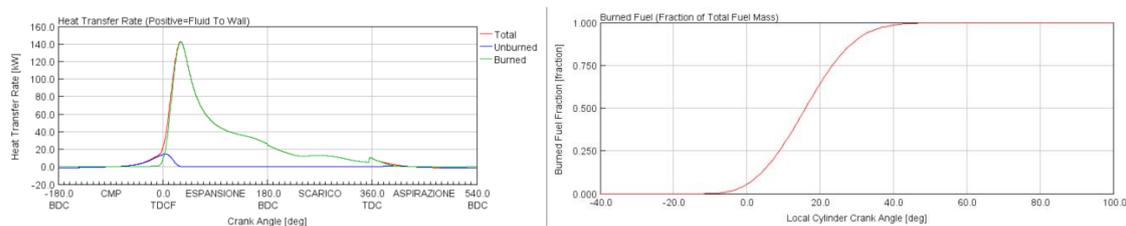


Figura 20 – Esempi di simulazione eseguiti dal *Polimarche Racing Team* su *Gt Suite*

3.3.3. Diagnostica del motore

L'analisi della combustione potrebbe essere utilizzata efficacemente nella diagnostica del motore. Poiché la maggior parte dei problemi del motore ha un impatto sulla traccia della pressione del cilindro, l'acquisizione di tutti gli eventi potrebbe consentire all'osservatore di scoprire vari problemi. Osservando per esempio tracce di pressioni più elevate e un maggiore rilascio di calore è possibile valutare il mal funzionamento del motore. Problematiche tipo queste possono essere imputabili per esempio al mal funzionamento degli iniettori. Oppure potrebbe accadere di osservare valori di pressione notevolmente più bassi nel cilindro e questo può essere dovuto all'usura di pezzi meccanici. Oltre ai problemi nel sistema di alimentazione, l'analisi della combustione potrebbe anche

rispondere efficacemente a domande diagnostiche provenienti principalmente da ogni campo del motore, comprese le parti meccaniche come camme dei cilindri usurate, fasce elastiche, pistoni, valvole o malfunzionamenti nel percorso dell'aria e nel sistema di scarico.

4. SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

L'impiego di una strumentazione altamente performante e prestazionale permette di ottenere ottimi risultati anche in ambienti non molto favorevoli alla collezione dei dati. E' da considerare che gli strumenti da impiegare per le diverse misurazioni possono essere applicati anche a macchina in movimento; dunque, una buona struttura e una buona qualità del segnale permettono di non avere disturbi e di avere un'elevata resistenza alle vibrazioni.

4.1. Banco prova motore

I test sulla combustione e sull'analisi delle onde di pressione nel motore vengono effettuati mettendo il propulsore sul banco prova. Un banco prova si può semplificare come una "macchina" in grado di assorbire energia meccanica. I banchi prova vengono usati per differenti motivi, dalla misura della potenza di un motore al test di un cambio o una trasmissione. Attualmente i test richiedono sistemi con notevoli prestazioni e caratteristiche, sia perché sono notevolmente migliorate le prestazioni dei motori da provare, sia perché i test da effettuare sono sempre più complessi. Un altro aspetto dell'evoluzione dei banchi prova è la necessità di trasferire in sala prova il maggior numero di test e collaudi che fino a qualche tempo erano possibili solo su strada. Per poter effettuare i test al banco il *Polimarche Racing Team* è autorizzato ad usufruire di un banco prova situato nella sala prove del *Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche* presso la sede di Ancona.

Il banco che si trova presso il dipartimento dell'*Università Politecnica delle Marche* è di tipo dinamico: è dotato di un motore AC usato come generatore. Con il termine dinamico viene indicata sostanzialmente la possibilità di funzionare anche come motore. L'energia meccanica del motore da testare viene trasformata in energia elettrica che viene restituita alla rete mediante apposito convertitore. Le caratteristiche principali di un freno dinamico sono l'elevata rapidità di risposta, l'inerzia bassa e la possibilità di lavorare a regimi di velocità molto elevati.

Il banco prova che andrà utilizzato sarà di tipo dinamico della *APICOM s.r.l.*, società di Cento (FE), da 100 kW, una macchina trifase da 380 A nominali e 450 A massimi, con una velocità di 7500 rpm e raffreddamento forzato ad aria; la connessione tra il freno e il

motore consente di simulare le caratteristiche di un ipotetico veicolo e le sue condizioni di marcia, resistenza all'avanzamento, a differenza dei banchi prova stazionari che permettono solamente di mantenere il motore in un punto fisso di funzionamento, indipendentemente dal carico. Il controllo del carico prevede la regolazione ad anello chiuso della coppia: per questo scopo si utilizza un torsionmetro mentre il regime di rotazione è misurato tramite un encoder montato sul motore del freno (fig. 21).



Figura 21 – Banco prova *APICOM*

Il banco è gestito da un sistema di controllo che mette l'utente nelle condizioni di interagire con il motore e con il freno visualizzando in tempo reale i dati ottenuti relativi alle grandezze monitorate come temperatura dell'olio, dei gas di scarico, dell'aria di raffreddamento, dell'aria di aspirazione, oltre alla coppia, al regime di rotazione e alla posizione dell'acceleratore elettronico. Il tutto è visualizzato e modificato mediante la torre di controllo.

La parte hardware è costituita da un personal computer con una serie di schede di acquisizione, interfacciato al dispositivo di frenatura e ai vari sensori mediante il software di gestione *XTwin Plus*: poi c'è il modulo per l'impostazione manuale dei comandi del freno e il modulo *MP2020* che vengono impiegati per il settaggio e il controllo di alcuni parametri di freno e motore, in modalità sia manuale sia automatica (fig. 22). Ovviamente

occorre mettere i vari dispositivi della catena di regolazione e di misura nelle condizioni ottimali di funzionamento in modo che non si discostino dai parametri impostati. Il torsionmetro viene letto contemporaneamente dal modulo di controllo del freno e dell'acceleratore con due differenti filtraggi, ciò può comportare una discrepanza tra il valore letto nei due dispositivi. Risulta opportuno quindi all'inizio della prova, azzerare i due canali di coppia, visto che i dati salvati provengono dal canale di coppia acquisito dal sistema di controllo freno. Inizialmente è stata ripristinata tutta la sala prova, controllando e rimettendo in funzione tutti gli impianti di sicurezza e procedendo alla taratura del freno.



Figura 22 – Torre di controllo del banco prova *APICOM*

Sfruttando il software e la strumentazione sensoristica della sala, il motore è stato monitorato tramite controlli di pressione, temperatura e umidità; il banco è infatti provvisto di un UTA (unità trattamento aria), che gestisce la pressione e l'umidità nella sala, e di un circuito acqua per il controllo della temperatura del motore.

Nello specifico sono stati utilizzati i sensori di pressione per acquisire dati relativi all'aspirazione, lo scarico, il turbocompressore e il circuito olio, sensori di temperatura per monitorare oltre che i soliti sistemi di aspirazione scarico, turbo e olio, anche l'acqua.

4.2. Scheda di acquisizione

I sistemi di acquisizione dati vengono impiegati per misurare fenomeni fisici come temperatura, tensione, corrente, pressione, vibrazione, peso ecc. E' inoltre in grado di condizionare i segnali in maniera efficiente e possibilmente a basso costo. La scheda che potrebbe essere adatta alle esigenze di questo lavoro è la *DAQ NI-6009USB* (fig. 23). Per questa scheda sono disponibili:

- 8 canali di ingresso analogici (AI);
- 2 canali di uscita analogici (AO);
- 12 canali di ingresso/uscita (DIO);
- 1 contatore a 32 bit.

Il sampling rate di questa scheda è 48 kS/s, dunque, permette di acquisire segnali di un discreto range di frequenze. Il grande vantaggio nell'utilizzare questo dispositivo è la possibilità di impostare la configurazione e quindi di gestire l'acquisizione o generazione dati tramite un computer grazie al software *LabVIEW*.



Figura 23 – Vista frontale del *DAQ NI-6009USB*

Utilizzando in futuro anche una scheda di acquisizione con un tipo di Can Bluetooth o WIFI è possibile ottenere i dati anche a macchina in movimento.

4.3. Misurazione posizione albero a gomiti

E' necessario poi mettere in relazione tutti i valori di pressione che si hanno in funzione della posizione dell'albero motore. Per fare ciò ovviamente è necessario l'impiego di un encoder (fig. 24).

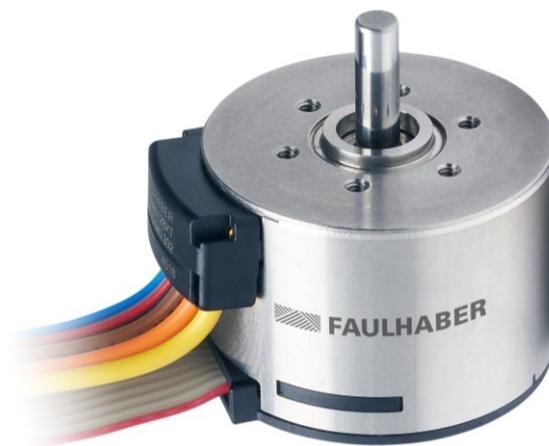


Figura 24 – Encoder incrementale

Gli encoder sono strumenti in grado di visualizzare uno spostamento; il loro principio di funzionamento si basa sulla trasmissione di un fascio luminoso tra un emettitore led e un ricevitore fotodiode. Nel percorso è interposta una macchina con delle fenditure. Il segnale rilevato dal fotodiode dipende dalla posizione rilevata fra la maschera e il fascio luminoso. Se la maschera è solidale all'elemento mobile di cui si vuole conoscere lo spostamento e la coppia led-fotodiode è fissa, si può misurare lo spostamento della maschera e quindi dell'oggetto mobile. In generale gli encoders lavorano in binario: la cifra 1 viene associata alle zone luminose, di vuoto, e la cifra 0 alle zone d'ombra, di pieno o viceversa. Il team è in possesso di un encoder ottico *AVL 36401* (fig. 25) che era stato preso in considerazione per monitorare la traccia dell'angolo di manovella. Durante i primi test effettuati al banco prova *APICOM* sul *KTM LC4* l'encoder di è danneggiato a

causa di elevate vibrazioni e movimenti anomali del motore: in particolare i cavi in fibra ottica che trasportavano la luce, che veniva convertita da un light pulse converter in voltaggio, sono stati tranciati dalla piastra di supporto che si è spezzata. Proprio per evitare di ritrovarsi a dover far fronte di nuovo a queste criticità e di far alzare il budget la soluzione adottata è un'altra.



Figura 25 – Encoder AVL serie 36

Per ovviare all'utilizzo dell'encoder rotazionale collegato all'albero motore si è utilizzato il sensore di giri dell'albero a gomiti. Sul volano del motore è possibile calettare un disco dentato il quale andrà ad interagire con un sensore hall che restituirà la velocità e la posizione. Di serie nel *KTM LC4* vi è un disco da 24 denti al quale ne è stato tolto 1 il quale funge da trigger, ovvero da punto zero, in corrispondenza del punto morto superiore. A questo punto oltre a conoscere la velocità di rotazione si riesce a conoscere l'angolo di manovella. Si potrebbe aumentare la risoluzione realizzando una nuova ruota dentata da 60 denti, alla quale ne verrà tolto uno in corrispondenza del PMS. Tramite software CAD come *Solidworks* è possibile realizzare il progetto CAD della ruota dentata che si andrà ad utilizzare.

4.4. Sensore di battito in testa

Per monitorare il battito in testa oltre ad avere il sensore di pressione in camera sarà utilizzato un sensore di battito in testa (fig. 26). Questo sensore è un accelerometro e come

tale possiede tutte le caratteristiche necessarie: gli accelerometri sono strumenti inerziali, ovvero trasduttori di moto assoluto perché sono misurati direttamente sull'oggetto di misura e non misurano lo spostamento relativo a un punto fisso nello spazio circostante l'oggetto stesso ma lo spostamento relativo ad una massa che si muove alla stessa frequenza dell'oggetto in moto.

Per questo è definito sistema inerziale, perché è basato su un sistema massa – molla – smorzatore. Gli accelerometri trasducono accelerazione in spostamento.



Figura 26 – sensore di battito in testa

Le tipiche caratteristiche di un accelerometro sono principalmente 3:

1. Massa molto piccola $\sim 1\text{g}$;
2. Rigidezza elevata;
3. Frequenza naturale molto alta $\sim 10^5\text{ Hz}$.

La frequenza naturale è molto alta perché l'accelerometro ha un sistema di vibrare molto particolare: a basse frequenze la molla è rigida, spostando la base essa ha lo stesso comportamento di un corpo rigido mentre, alle alte frequenze, ho forza di accelerazioni importanti e la molla ne risente comprimendosi. E' interessante vedere come gli accelerometri non abbiano bisogno di smorzamento. Questo particolare aspetto mi giustifica la predilezione per gli accelerometri di lavorare con trasduttori piezoelettrici.

Il sensore a risposta in frequenza piatta offre il vantaggio dell'universalità poiché un design del sensore può essere utilizzato su diversi modelli di motore con diverse frequenze di detonazione. Tuttavia, il filtraggio elettrico del sensore deve essere ottimizzato per ciascun modello di motore per distinguere il battito dal rumore. I sensori di picchi sono sintonizzati sulla frequenza di detonazione per un particolare motore, ma sono limitati dalle variazioni di fabbricazione, sia nel sensore che nel motore, che possono causare un disallineamento nella frequenza di detonazione e nella loro risposta, con conseguenti eventi di detonazione non rilevati. Sensori risonanti a banda larga combinano i vantaggi dei sensori Flat e Resonant. La loro amplificazione meccanica e filtraggio del rumore il segnale su un'ampia larghezza di banda nel knock fornisce livelli di segnale elevati pur consentendo per motori vari. I sensori di detonazione a vibrazione misurano una risposta secondaria all'evento di detonazione nella camera di combustione. Da un punto di vista puramente ingegneristico, è certamente desiderabile una tecnica di misurazione più diretta per ridurre l'errore di misurazione e la complessità. Sono in fase di sviluppo dispositivi di misurazione della pressione del cilindro, della temperatura di combustione e della fiamma all'interno del cilindro, utilizzando tecnologie come piezoelettrica, ottica, fibra ottica, silicio micro-lavorato e materiali chimicamente sensibili. Ciascuno dei dispositivi attualmente disponibili presenta vantaggi e svantaggi rispetto agli attuali sensori di detonazione e dovrebbe essere valutato sulla base dei requisiti di sistema, delle esigenze di imballaggio e dell'analisi costi-benefici come menzionato più avanti in questo documento per giustificare la loro implementazione (fig. 27).

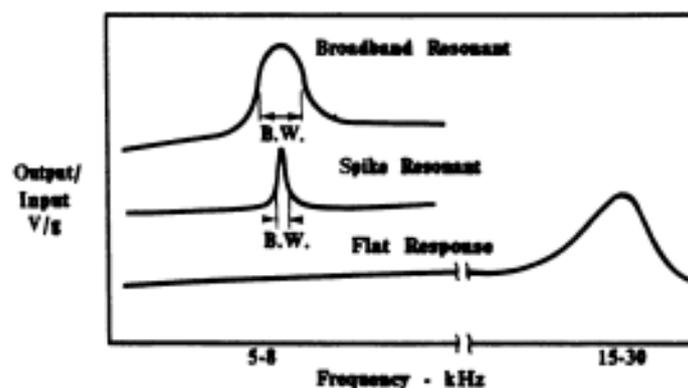


Figura 27 – Differenza dei vari tipi di risposta

4.2. Trasduttori di pressione

Come evidenziato nei capitoli 2 e 3 per una corretta misurazione delle pressioni occorre utilizzare principalmente tre trasduttori:

- Uno a monte della valvola di aspirazione;
- Uno all'interno della camera di combustione;
- Uno a valle della valvola di scarico.

Per una corretta misurazione delle onde di pressioni in un motore a combustione interna aspirato sarebbero necessari solo questi tre sensori per definire il fenomeno. Ricordando nuovamente quanto detto nel capitolo 1 è stata preferita una configurazione sovralimentata piuttosto che una aspirata; dunque, lavorando con una turbina che sfrutta il principio degli impulsi, inserire altri 2 trasduttori darebbe sicuramente maggiori informazioni sulle onde di pressione. Gli altri due sensori sono collocati nei seguenti punti:

- Sull'intercooler;
- Sul runner di aspirazione.

Dunque, il numero totale di trasduttori di pressione da utilizzare è 5.

Il sensore di pressione in camera di pressione sarà sfruttato per entrambi gli studi, sia per valutare gli effetti dinamici sia per effettuare l'analisi della combustione.

I fattori che intervengono nella scelta dei sensori sono:

- Performance: livello del segnale, rapporto segnale/rumore alla frequenza di detonazione, degradazioni delle prestazioni ad alte temperature, requisiti di orientamento del sensore;
- Ambiente: capacità di resistere alla temperatura, connessioni sigillate, tenuta, compatibilità con fluidi automobilistici;
- Produttività: qualità costruttiva, robustezza, requisiti di tolleranza, assemblaggio;
- Problematiche di sistema: compatibilità elettromagnetica, grandezza, impatto del sistema di sensori sul costo.

Le caratteristiche statiche in un sensore descrivono il suo comportamento in condizioni normali con variazioni lente dell'ingresso e in assenza di urti, vibrazioni e accelerazioni.

Le condizioni normali di funzionamento si hanno ad una temperatura di 25°C, meno del 90% di umidità relativa e circa 1 bar di pressione atmosferica. Il sensore reale ha un comportamento non ideale, quindi non perfettamente lineare, si avrà una variazione dell'uscita del valore reale. La differenza tra valore ideale e valore reale è detta errore (fig. 28).

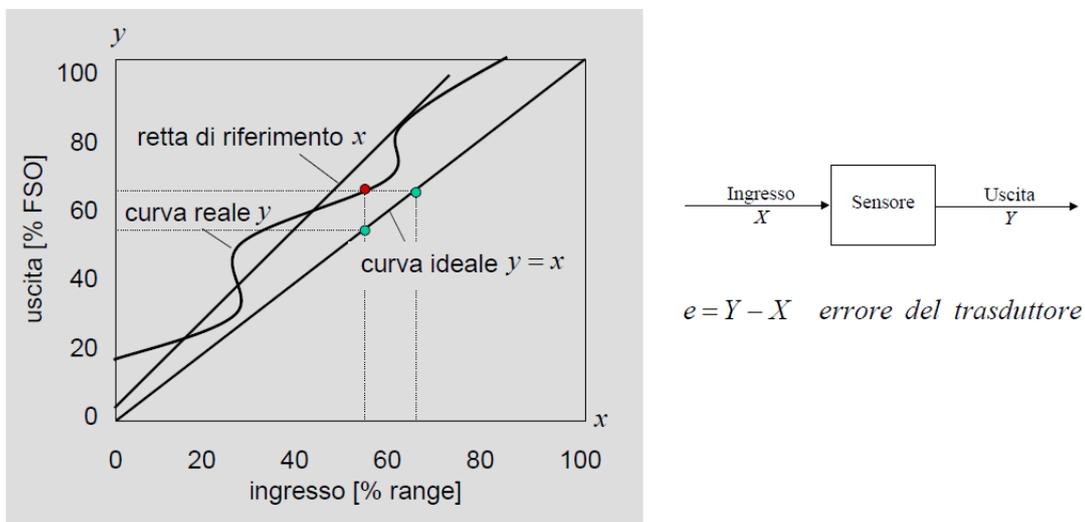


Figura 28 – Errore del sensore reale

Il modo più immediato di considerare l'errore del sensore è quello di definire la sua fascia di incertezza $[\pm \%FSO]$ che rappresenta la massima deviazione dalla sua retta di riferimento. La scomposizione totale nelle sue componenti può essere utile per effettuare la correzione finale dei dati e migliorare l'accuratezza complessiva. Le caratteristiche di errore possono essere determinate con la taratura.

Un'altra caratteristica statica del sensore è l'isteresi. Essa rappresenta la massima differenza tra i valori di uscita corrispondente ad uno stesso ingresso, ottenuto prima per i valori crescenti e poi decrescenti (fig. 29).

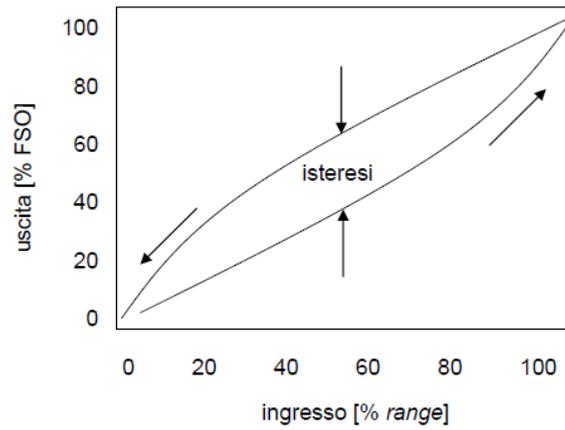


Figura 29 – Fenomeno di isteresi

L'isteresi rappresenta la capacità di riprodurre la stessa uscita quando è applicato lo stesso ingresso, consecutivamente, nelle stesse condizioni operative e nella stessa direzione. E' espressa come massima differenza tra le uscite di due cicli di taratura (fig. 30).

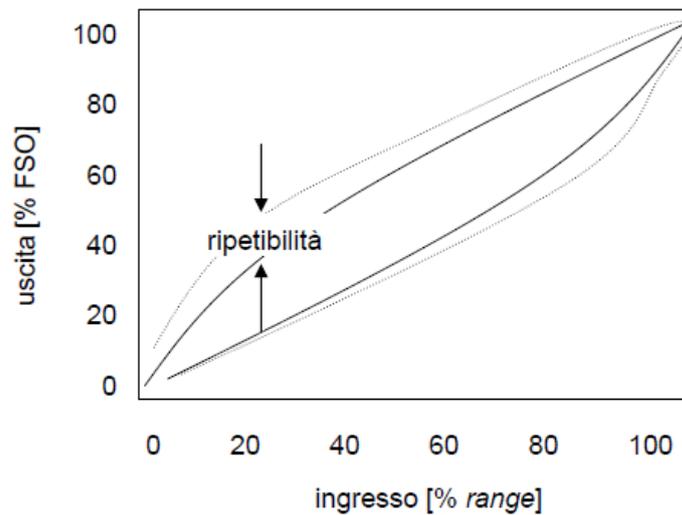


Figura 30 – Ripetibilità

La linearità indicalo scostamento della curva di taratura dalla retta di riferimento (fig. 31).

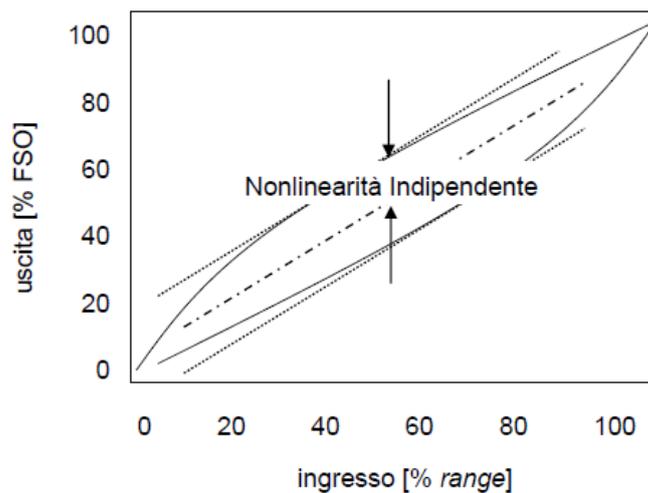


Figura 31 – Isteresi

La risoluzione rappresenta l'ampiezza del passo delle uscite, ovvero la distanza tra due uscite consecutive, al variare dell'ingresso in tutto il suo range (fig. 32).

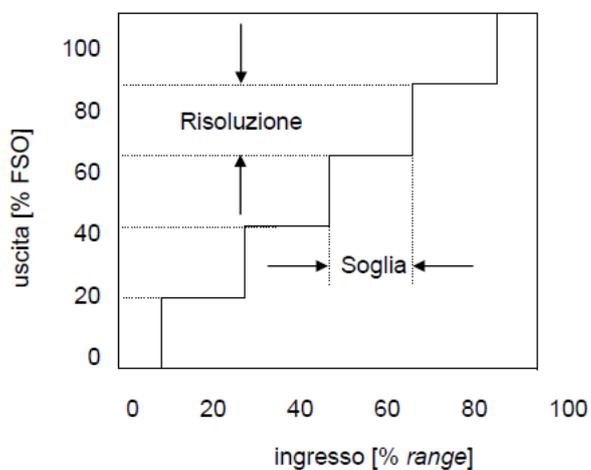


Figura 32 – Risoluzione

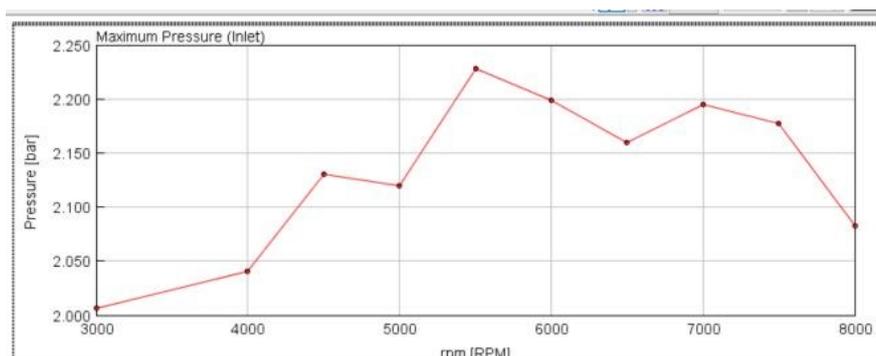
Le caratteristiche dinamiche invece descrivono il comportamento del sensore per variazioni rapide dell'ingresso con il tempo, in condizioni normali ed in assenza di sollecitazioni. Il sensore non sempre risponde in maniera istantanea a stimoli di ingresso variabili nel tempo e questo determina un errore nella sua risposta. L'errore è dipendente

dal tempo e può produrre delle oscillazioni se il sensore è inserito in un sistema di controllo. Una caratteristica dinamica è sicuramente la risposta in frequenza che rappresenta la variazione con la frequenza del rapporto fra ampiezza di uscita e ampiezza di ingresso. Un'altra caratteristica dinamica è la risposta nel tempo, la quale caratterizza la risposta del dispositivo ad una variazione dell'ingresso con il tempo.

Tutte queste caratteristiche possono essere ritrovate nei datasheet degli strumenti utilizzati.

4.2.1. Scelta dei trasduttori di pressione

La scelta dei sensori è effettuata osservando le simulazioni monodimensionali elaborate con il software di simulazione *GT SUITE*. *GT SUITE* fornisce un set completo di librerie di componenti che simulano la fisica del flusso dei fluidi, termica, meccanica, elettrica, magnetica, chimica e dei controlli. Da queste librerie, è possibile costruire modelli accurati di quasi tutti i sistemi di ingegneria, inclusi veicoli e motori. Il modello della P4 Evoluzione è stato ottenuto combinando tra loro i principali elementi che compongono il sistema propulsivo e caratterizzando ognuno di loro, fisicamente e termicamente. I punti da analizzare sono quelli sopra citati; dalla simulazione è possibile vedere i valori simulati di pressione nelle varie posizioni e nelle varie condizioni per avere un'idea sulle grandezze che si andranno ad acquisire in modo da effettuare una scelta adeguata degli strumenti impiegati nelle rilevazioni. In particolare, è importante concentrarsi sui valori massimi di pressione nei vari nodi da osservare. I punti da osservare sul modello *GT SUITE* sono i seguenti: intercooler, runner di aspirazione, a monte della valvola di aspirazione, in camera di combustione e a valle della valvola di scarico. Di seguito sono riportati i valori di pressione simulati su *GT SUITE* (fig. 33).



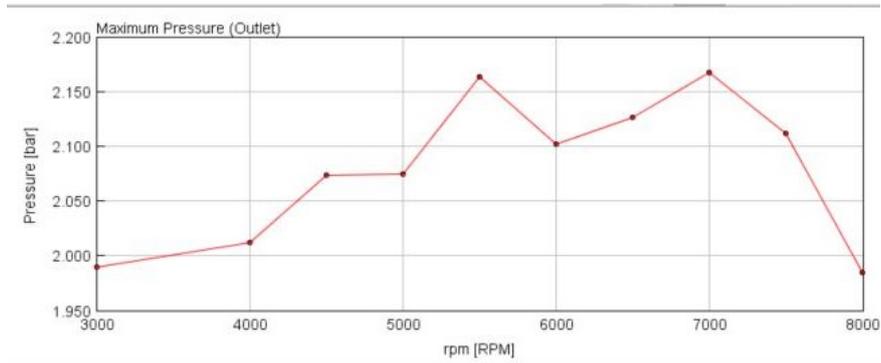


Figura 33.1 – Andamento pressioni intercooler

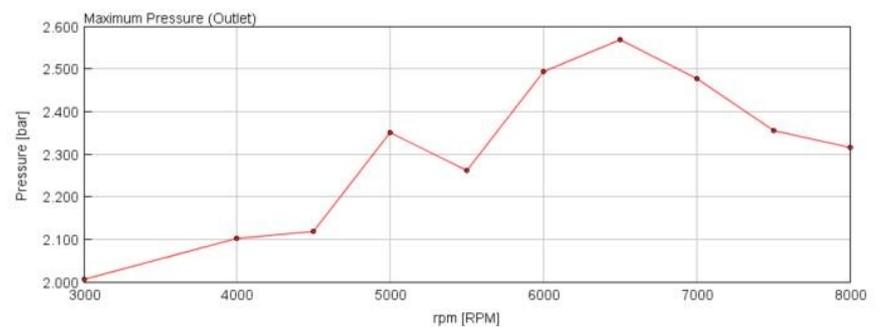
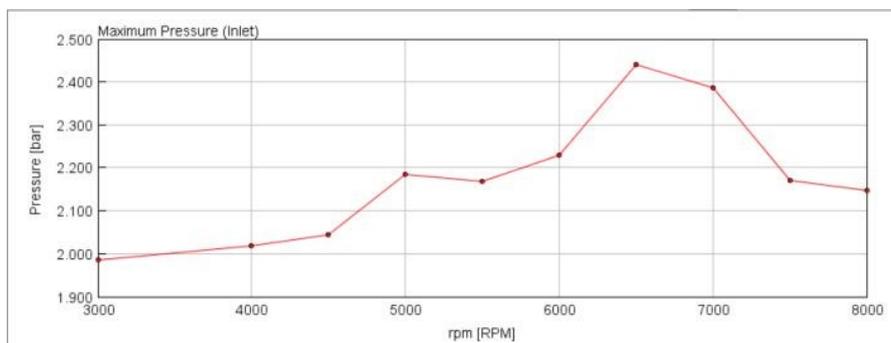
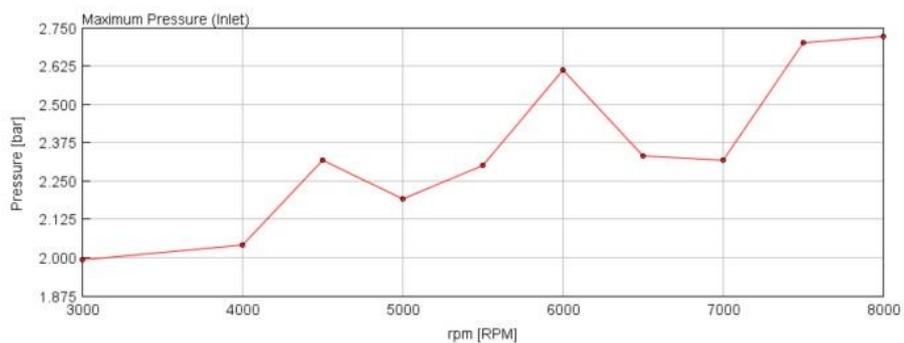


Figura 33.2 – Andamento pressioni runner



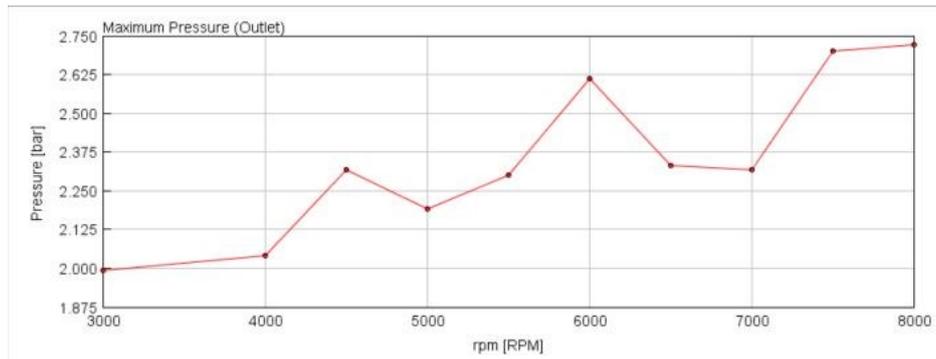


Figura 33.3 – Andamento pressioni a monte della valvola di aspirazione

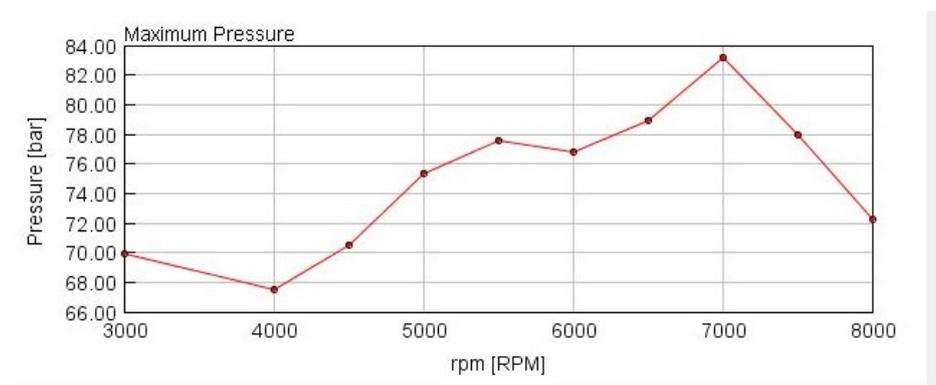


Figura 33.4 – Andamento pressioni in camera di combustione

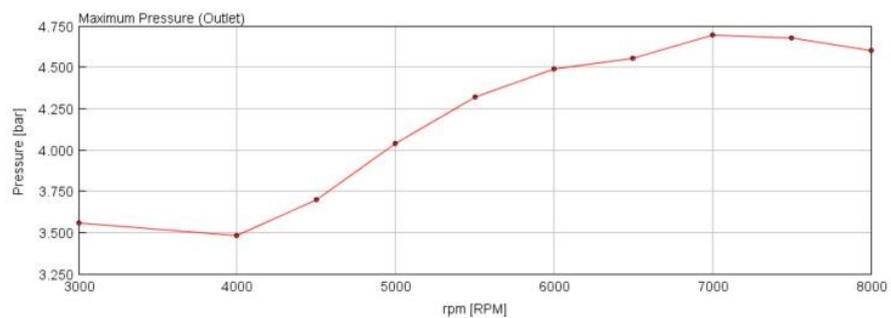
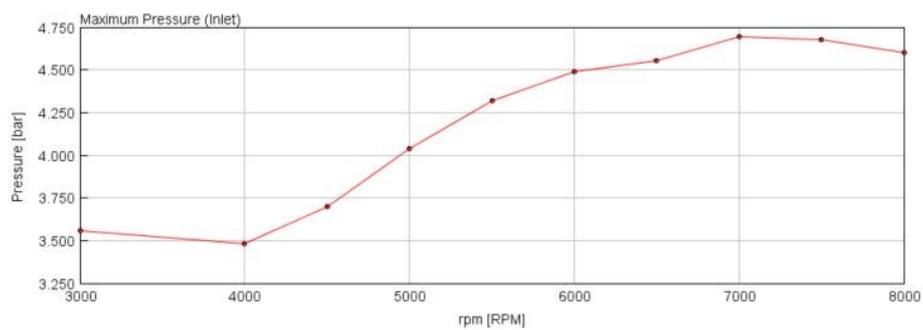


Figura 33.5 – Andamento di pressione a valle della valvola di aspirazione

Dall'analisi effettuata si possono osservare i valori massimi di pressione che sono stati tabellati come segue.

Posizione	P_{max}
Intercooler	2,2281 bar
Runner di aspirazione	2,5690 bar
Monte della valvola di aspirazione	2,7712 bar
Camera di combustione	83,1851 bar
Valle della valvola di scarico	4,6925 bar

Questi valori saranno la base sulla quale verrà scelta la strumentazione che permetterà di ottenere i valori desiderati.

4.2.2. Trasduttore di pressione in camera

Il sensore di pressione in camera di combustione è decisamente il più importante perché, oltre ad essere utile per le analisi delle onde di pressione e degli effetti dinamici, è quello che permetterà di effettuare un'analisi precisa e dettagliata della combustione. In camera avviene il processo di combustione dunque, successivamente alla fase di compressione e all'accensione, i livelli di pressione e temperatura sono notevolmente alti come si è potuto osservare dall'analisi precedentemente effettuata.

L'analisi della combustione e il rilevamento del knock sono di particolare interesse, in modo particolare nel mondo del motorsport, per questo motivo sono svariate le aziende che hanno messo appunto apposite strumentazioni per effettuare questo tipo di studi.

Ci sono due possibilità principali per inserire il sensore di pressione in camera di combustione:

- Sensori di perforazione;
- Sensore integrato nella candela.

Questi tipi di sensori hanno sia vantaggi che svantaggi. Bisogna sempre considerare che la selezione di un tipo di sensore potrebbe avere un'influenza sulla traccia della pressione della camera di combustione catturata. Pertanto, tutti i risultati raccolti devono essere

valutati di conseguenza. A causa di questi fatti, il tipo di sensore dovrebbe essere selezionato per le esigenze della data applicazione. La verità generale dell'ingegneria si applica qui, non esiste una soluzione perfetta, è necessario trovare il miglior compromesso.

Per i sensori di perforazione le principali caratteristiche sono:

- Contatto diretto con la camera di combustione, dunque, maggiore risoluzione e maggiore risposta in frequenza;
- La testata del cilindro deve essere modificata: non tutti i tipi di testata del cilindro consentono di montare sensori;
- A causa della maggiore precisione e della necessità di lavorazione, viene utilizzato principalmente per la convalida termodinamica e lo sviluppo del motore della prima fase.

Le principali caratteristiche dei sensori montati su candela ad incandescenza sono:

- Di solito il sensore non ha un contatto diretto con la camera di combustione, perciò, si ha una risoluzione inferiore a causa della risposta in frequenza limitata;
- Facile da montare in quanto non è necessaria alcuna lavorazione.

Dopo un'importante analisi delle proposte sul mercato è stata effettuata una prima scrematura dei prodotti. La prima selezione ha portato ad avere una lista dei prodotti più interessante e adatti al progetto. Le proposte sono le seguenti:

- Optrand drill-in;
- Optrand spark-plug;
- Piezoelettrici.

Optrand Spark-plug si tratta di un sensore di pressione miniaturizzato, dalle dimensioni di circa 1.5 mm, integrato con la candela di produzione. Il sensore montato a filo elimina gli errori di canale (fig. 34). E' possibile combinare una candela di produzione modificata e selezionata dall'utente con il sensore di pressione Optrand basato su fibra ottica con diametro di 1.5 mm montato a filo nel guscio della candela. Montando in modo permanente il trasduttore con compensazione della temperatura nella candela, si ottiene

la precisione di lettura della pressione in uscita a ± 1 %, inclusa linearità, isteresi, shock termico, ripetibilità e stabilità della calibrazione.



Figura 34 – Optrand spark-plug

Gli Optrand Drill-in sono sensori di perforazione che devono essere applicati direttamente in camera di combustione (fig. 35).



M5 x 0.5mm

Figura 35 – Optrand drill-in

Per quanto riguarda i sensori piezoelettrici il discorso è notevolmente più complesso. Questi tipi di trasduttori usano un cristallo piezoelettrico come elemento elastico del

sensore. Il quarzo è il materiale piezoelettrico più utilizzato perché ha un alto modulo di elasticità, frequenza di risonanza, buona linearità e piccola isteresi (fig. 36). Si possono raggiungere frequenze di risonanza fino a 0.5 MHz pur mantenendo alta sensibilità. Il cristallo di quarzo è racchiuso in un guscio cilindrico che ha ad un'estremità un sottile diaframma, l'elemento elastico sensibile alla pressione, e dall'altra un supporto rigido su cui poggia il cristallo. In genere il cristallo è precaricato per avere una migliore linearità. Quando viene applicata la pressione sulla faccia del cristallo in contatto con il diaframma si genera una carica elettrostatica che dipende dalla pressione, dalla dimensione del cristallo e dall'orientamento dell'asse sensibile.

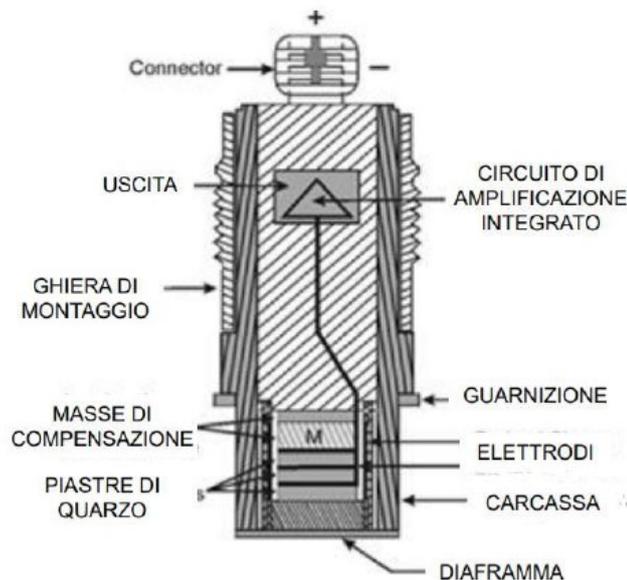


Figura 36 – Trasduttori di pressione piezoelettrici

I trasduttori piezoelettrici hanno un'alta impedenza di uscita e pertanto occorre usare un amplificatore di carica che converte la carica in tensione, la amplifica e riduce l'impedenza in uscita. Altrimenti esistono sensori con circuito integrato di alimentazione (IEPE) che non richiedono amplificazione del segnale in uscita. Questi sensori sono particolarmente adatti per misure dinamiche ma sono limitati in bassa frequenza (0.2 Hz) dalla costante di tempo del sensore piezoelettrico e dalla resistenza e capacità dell'amplificatore di carica o dall'elettronica del circuito ICP. Nella tabella successiva sono riportate le principali caratteristiche dei sensori piezoelettrici.

CARATTERISTICHE DEI SENSORI	
Frequenza propria	fino a 100kHz
Sensibilità	10-100 pC/bar
Portata	fino a circa 7000 bar
Linearità	< 1 %
Sensibilità all'accelerazione	<0,005 bar/G

Se si volessero misurare pressioni con dinamiche elevate si dovrebbe montare il trasduttore direttamente nel punto di misura, montaggio a filo, evitando per quanto possibile tubi e camere ovvero montare il sensore arretrato rispetto alla zona in cui si vuole misurare la pressione (fig. 37).

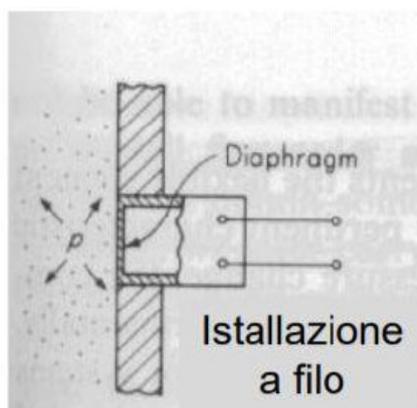


Figura 37 – Installazione a filo

Il banco prova APICOM è in possesso di vari sensori di pressione che possono essere sfruttati per effettuare misurazioni. Il problema di questi sensori è che sono collocati in un box che comunica direttamente con la torre di controllo. Il problema di questo box è che i trasduttori, essendo vincolati ad esso, devono essere messi in comunicazione con i vari punti nel motore tramite l'utilizzo di tubi e raccordi; il sistema diventa dunque equiparabile ad un sistema massa – molla – smorzatore. Perciò si comporterà con un sistema del 2° ordine. Trattandosi di una misurazione di gas con tubi e raccordi, la frequenza propria del sistema varia e limita il limite superiore del range di frequenza in accordo con la seguente formula:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l + \frac{1}{2}\sqrt{\pi a})}}$$

Essendo:

f : frequenza propria del sistema

C : velocità del suono nel gas

a : area del tubo di collegamento

V : volume della cavità dello strumento di misura

A : area della sezione della cavità dello strumento di misura

l : lunghezza del tubo di collegamento

Questa strada, presentando difficoltà in termini di variabili e di apparato, sembra quella meno percorribile considerando anche il fatto che, avendo il motore KTM LC4 un sistema a doppia candela, si potrebbe escludere una candela per potervi inserire il sensore ed effettuare le misurazioni dirette.

Il sensore in camera di combustione è stato scelto tra i quattro modelli precedentemente elencati dando un voto da 0 a 5 ad alcuni parametri. Il sensore con il valore totale maggiore sarà quello più adeguato alla misurazione.

	Optrand drill-in	Optrand spark-plug	Piezolettrici
Signal quality	4	3	5
Frequency range	4	4	5
Knock	4	2	5
Dimensions	4	3	4
Price	3	3	1
Total	19	15	20

Come non era difficile immaginare, i trasduttori di pressione che meglio si adattano per questa applicazione sono i sensori di pressione piezoelettrici. Tra i marchi di sensoristica più importanti e adatti sicuramente ci sono *Kistler* (fig. 38) e *AVL*. Queste aziende

producono sensori caratterizzati da una qualità manifatturiera estremamente elevata e da prestazioni dinamiche eccellenti. Nel capitolo dei “materiali a supporto” è possibile trovare i datasheet di alcuni sensori scelti per questa applicazione.



Figura 38 – Sensore di pressione *Kistler*

Avendo ora un’idea più chiara sulla strumentazione che si andrà ad utilizzare, è possibile fare un’indagine sul mercato per trovare i prodotti in commercio che maggiormente si adattano alle esigenze del progetto. Per trovare trasduttori piezoelettrici con prestazioni piuttosto elevate è possibile affidarsi a due case produttrici: Kistler e AVL. Sono tra i principali produttori di sensori che si occupano anche della produzione di sensori adatti alle misurazioni di temperatura e pressioni in condizioni estreme, come possono essere quelle all’interno della camera di combustione.

Tra i due marchi si è scelto di puntare principalmente su strumenti prodotti da Kistler, principalmente per una questione di budget. Kistler propone strumenti per misurazioni precise della pressione nel cilindro e nell’angolo di manovella. Kistler offre un portafoglio prodotti completo ed esaustivo con tecnologia di analisi per un’ampia gamma di applicazioni. Gli strumenti di pressione sono piezoelettrici e realizzati con

raffreddamento ad acqua. I prodotti ad alte prestazioni comprendono inoltre sistemi di condizionamento dei segnali SCP.

Per il rilevamento della traccia di pressione all'interno del cilindro è stato scelto il trasduttore di pressione Type 6044 (fig. 39).

Technical data

Measuring range	bar	0 ... 300
Calibrated partial ranges	bar	0 ... 100, 0 ... 150, RT, 250, 350 °C 0 ... 200, 0 ... 300
Overload	bar	350
Sensitivity	pC/bar	≈-30
Natural frequency	kHz	≥100
Linearity, all ranges (at 23 °C)	%/FSO	≤±0.3
Acceleration sensitivity		
axial	bar/g	≤0.002
radial	bar/g	≤0.0002
Operating temperature range	°C	-20 ... 350
Temperature, min./max.	°C	-40 ... 400
Sensitivity shift		
RT ... 350 °C	%	≤±1
250 °C ±100 °C	%	≤±0.5
Thermal shock error		
(at 1 500 1/min, IMEP = 9 bar)		
Δp (short-term drift)	bar	≤±0.2
ΔIMEP	%	≤±1
Δp _{max}	%	≤±1
Insulation resistance at 20 °C	Ω	≥10 ¹³
Tightening torque, greased	N·m	6
Capacitance, without cable	pF	10
Weight sensor	g	8
Connector, sapphire	-	M4x0.35

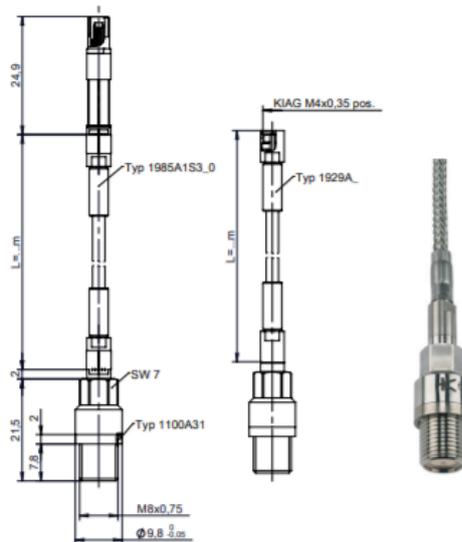


Figura 39 – Datasheet Type 6044

Come è possibile osservare dal datasheet del prodotto, le caratteristiche del sensore sono perfette per le applicazioni alle quali è destinato. Il range di pressione massimo è 300 bar ed è ampiamente superiore al valore massimo atteso che si riesce ad osservare nelle simulazioni monodimensionali, circa 85-90 bar. Inoltre, è in grado di resistere ad elevate temperature. La sensibilità è perfetta perché rientra nel range dei 100 pC/bar, la linearità è ottima in quanto non supera nemmeno lo 0.3%, la frequenza naturale è molto elevata e la sensibilità non subisce variazioni alle alte accelerazioni.

4.2.3. Trasduttori di pressione per gli effetti dinamici

La scelta dei sensori piezoelettrici può benissimo ricadere anche sulla scelta dei trasduttori di pressione per valutare gli effetti dinamici, in particolare per valutare le onde

di pressione. Come visto dall'analisi sulle simulazioni monodimensionali fatte su GT SUITE, la pressione massima che si ha lungo la linea di misurazione, esclusa la misurazione nel cilindro, è relativamente bassa e non si superano i 5 bar, per la precisione 4.7 bar. Sul mercato sono presenti diverse soluzioni: ovviamente non si necessitano di qualità costruttive elevate o di materiali prestazionali, però allo stesso tempo si punta ad ottenere una qualità dei dati più pulita e precisa possibile.



Figura 40 – Sensore di pressione *AVL*

Case produttrici come *Honeywell* o *Rs Components* propongono strumenti dai costi contenuti e dalla qualità non troppo elevata. Per questo tipo di applicazione rimangono comunque più adatti sensori come quelli proposti da *Kistler* e *AVL* (fig. 40) che sono decisamente più prestazionali e accurati, soprattutto per quanto riguarda la risposta dinamica.

Come già ragionato nel paragrafo precedente si andranno a scegliere sensori di pressione piezoelettrici prodotti da *Kistler*. Per questo tipo di applicazione si sceglieranno sensori sicuramente più semplici e meno prestazionali, si andrà ad operare in condizioni più favorevoli. Non è necessario misurare pressioni elevate a temperature elevate quindi, in termini economici è possibile preservare una parte del budget per questa applicazione. E' altresì vero che si vuole disporre di caratteristiche dinamiche molto elevate, come un'ottima linearità, un'elevata sensibilità ed un'importante frequenza propria. Per il rilevamento delle tracce di pressione per lo studio dei fenomeni dinamici è stato scelto il trasduttore di pressione Type 601CBA00014.0 (fig. 41).

Technical data – IEPE sensors¹⁾

Type 601CBA...		00001.5	00003.5	00007.0	00014.0	00035.0	00070.0	00250.0
Output signal	V	Voltage (IEPE)						
Pressure range	bar / psi	1.5 / 22	3.5 / 50	7 / 100	14 / 200	35 / 500	70 / 1 000	250 / 3 626
Maximum pressure	bar / psi	250 / 3 626						
Overload	bar / psi	300 / 4 350						
Sensitivity (nom.)	mV/bar / mV/psi	3 333 / 230	1 429 / 99	714 / 49	357 / 25	143 / 9.9	71 / 4.9	20 / 1.4
Linearity	%FSO	≤±1.0						
Operating temperature range	°C / °F	-55 ... +120 / -67 ... +248						
Rise time (10 ... 90%)	µs	<1.4						
Natural frequency ²⁾	kHz	>215						
Time constant (nom.)	s	2		3				
Low frequency response -3 dB	Hz	0.080		0.053				
-5%	Hz	0.242		0.161				
Noise (1 Hz ... 10 kHz) (typ.)	µbar _{rms}	3.5	8	16	32	79	160	567
Acceleration sensitivity (axial) (typ.)	bar/g / psi/g	0.0020 / 0.0290						
Acceleration sensitivity (radial) (typ.)	bar/g / psi/g	0.0001 / 0.0015						
Supply voltage (by IEPE-Coupler)	VDC	22 ... 30						
Supply current (by IEPE-Coupler)	mA	2 ... 20						
Output bias voltage (nom.)	VDC	11						
Output voltage FSO	V	±5						
Weight	gram	3.6						
Housing and diaphragm material	-	17-4 S.S.						

¹⁾ Indications are valid for 23°C / 73°F (if not specified otherwise)

²⁾ Calculated from rise time



Figura 41 - Datasheet Type 601CBA00014.0

4.6. Posizione dei sensori

Oltre al tipo di sensore, anche la posizione di montaggio del sensore potrebbe influenzare la traccia della pressione acquisita. Nella maggior parte delle applicazioni, le possibilità geometriche di una determinata testata del cilindro definiscono le posizioni di montaggio accessibili di un sensore di perforazione. A causa del profilo stazionario formato nella camera di combustione, i sensori di pressione montati in posizioni diverse registreranno diversi valori di pressione dinamica. C'è da aggiungere però, che il calcolo del rilascio di calore o altri parametri di ciclo come le curve PMI o MFB non sono così sensibili al posizionamento.

4.6.1. Posizione sensore di pressione in camera di combustione

Come è possibile osservare dal cad di una parte del motore (fig. 42) il KTM LC4 di serie predispone di doppia accensione. Dopo svariati test e svariate DOE è stato possibile affermare che il motore è in grado di girare senza alcun problema anche in una configurazione con una sola candela. Ciò permette di evitare perforazioni; andando a operare una foratura sulla testata del motore si rischiano vari problemi. Il primo aspetto da considerare è che meccanicamente la parte verrebbe indebolita sensibilmente, in secondo luogo c'è da dire che il fissaggio su una parte perforata non garantirebbe una tenuta eccezionale, essa costituirebbe una perdita concentrata. Il posizionamento più

corretto dove inserire il sensore di pressione è perciò nel foro della seconda candela, quella più esterna. Il foro è da 12 mm, dunque, essendo la maggior parte dei sensori piezoelettrici *Kistler* o *AVL* da M5, basterebbe l'impiego di riduttori e raccordi per poterla fissare correttamente. C'è da aggiungere che magari la posizione preferibile per la misurazione è quella più centrale possibile in corrispondenza del cilindro.

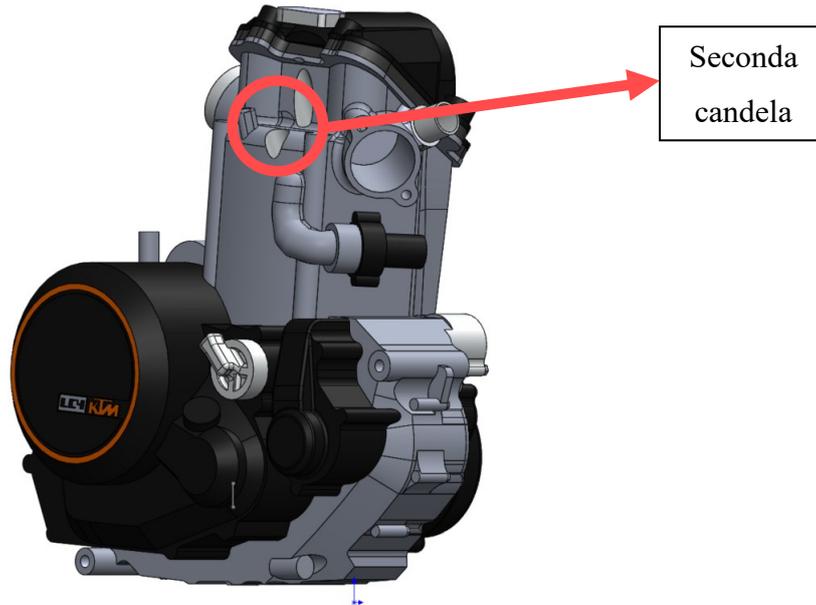


Figura 42 – KTM LC4 con doppia accensione

4.6.2. Posizione sensori per effetti dinamici

Il sensore di pressione dell'intercooler ha già una predisposizione in corrispondenza del runner in quanto è già equipaggiato in macchina per il monitoraggio continuo della centralina, *Motec M800* (fig. 43).

Il sensore di pressione nel condotto di aspirazione è posizionato lungo il runner. Il runner è sostanzialmente un tubo, un condotto, che ha lo scopo di convogliare l'aria dall'uscita del plenum dell'intercooler fino all'ingresso delle valvole. Lungo questo condotto sono posizionati anche gli iniettori. Proprio prima del punto dove sono posizionati gli iniettori è possibile posizionare il trasduttore di pressione.

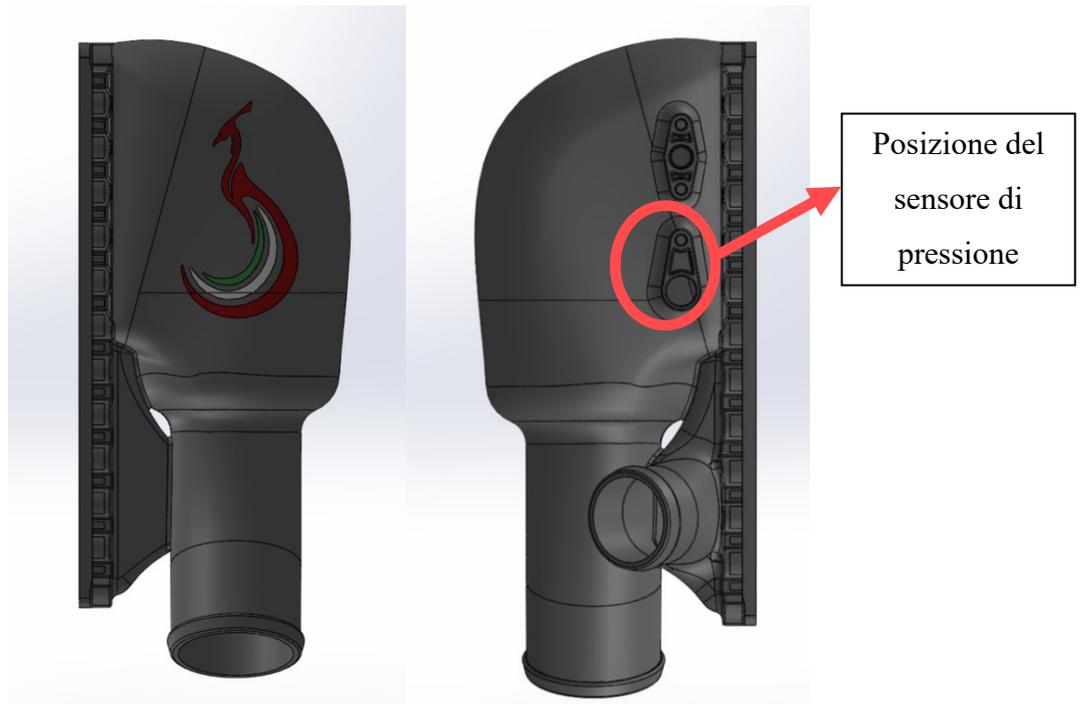


Figura 43 – Cad plenum collegato all'intercooler

Di seguito è riportato il cad del runner di aspirazione con l'alloggio per il sensore. Dato che i trasduttori che si utilizzeranno hanno una filettatura M5 il foro realizzato ha un diametro di 5.55 mm. Il pezzo sarà poi realizzato tramite un processo in stampa 3D. Il materiale utilizzato è il nylon (fig. 44).

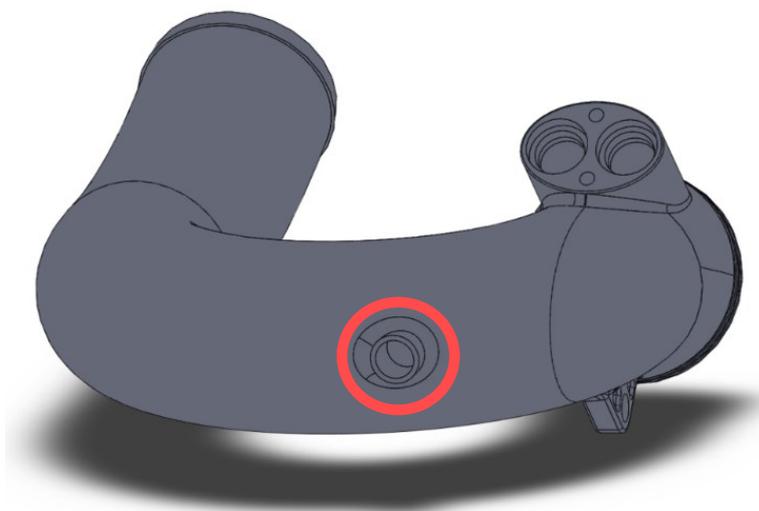


Figura 44 – Cad runner di aspirazione con alloggiamento per sensore piezoelettrico

Si procede ora a visualizzare il punto esatto dove posizionare il sensore a monte della valvola di aspirazione. Per collocare lo strumento in quella posizione si dovrebbe effettuare sul monoblocco nella posizione più vicina alla valvola di aspirazione. In corrispondenza della sezione di ingresso dell'aria il motore *KTM LC4* predispone di un piccolo foro che può essere sfruttato per rilevazioni di pressione (fig. 45).

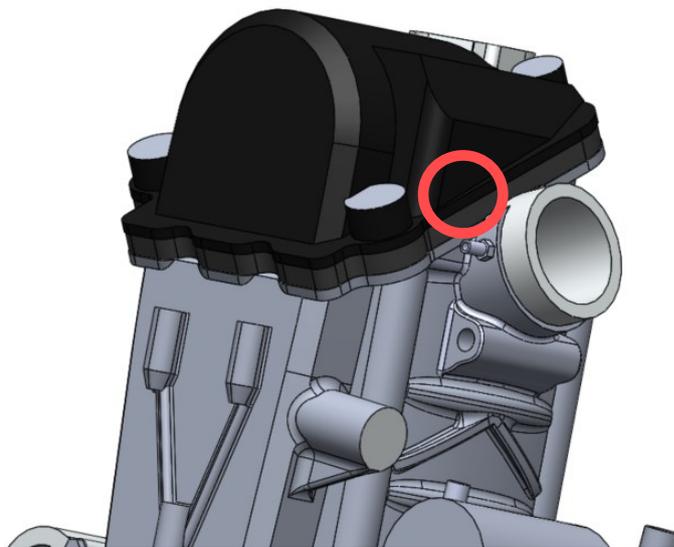


Figura 45 – Foro per la misura della pressione

La zona in questione è sicuramente difficile da lavorare. Cercando di realizzare un foro per l'alloggiamento diretto del sensore si potrebbe correre il rischio di danneggiare altre componenti o di indebolire la struttura. Perciò sfruttare quel foro originale è sicuramente la soluzione migliore. Tramite un tubo ad alte prestazioni per il trasporto di aria potrebbe risultare più conveniente effettuare un collegamento indiretto tra sensore e zona da misurare. Bisogna altresì ricordarsi della teoria sulla frequenza propria del sensore evidenziata nel capitolo precedente.

L'ultimo punto dove collocare il trasduttore di pressione per l'analisi degli effetti dinamici è a valle della valvola di aspirazione (fig. 46). In questa zona operare dei fori per l'alloggiamento dei sensori risulta molto più complicata: lo spazio è sicuramente poco e nella zona superiore, dove c'è un minimo di superficie libera, l'ingombro è occupato dall'uscita del circuito di raffreddamento dell'acqua. Perciò la zona migliore per

alloggiare il sensore di pressione è in corrispondenza della prima zona utile del condotto di scarico. Le pressioni lì non superano i 5 bar ma le temperature sono molto elevate quindi i sensori dovranno avere una qualità costruttiva estremamente elevata e devono essere in grado, senza stararsi, di lavorare in quelle condizioni.

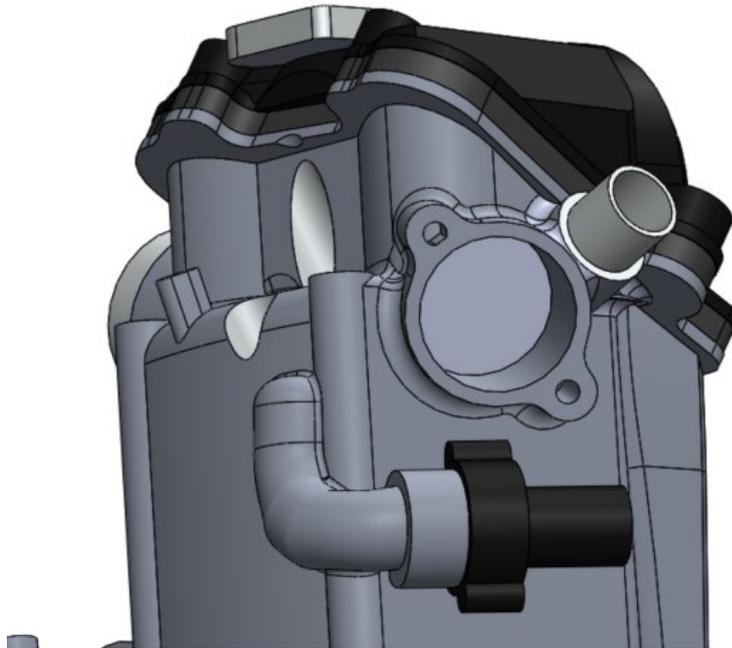


Figura 46 – Zona a valle della valvola di scarico

4.6.3. Posizione sensore di battito in testa

E' molto importante il fissaggio di questo tipo di sensore; potrebbe accadere che il trasduttore e il motore dove è fissato si accoppino, entrambi avrebbero la stessa frequenza di risonanza. Così facendo il sensore rileverebbe picchi di frequenza molto elevati pur non presentandosi il fenomeno del battito in testa. Solitamente questi strumenti sono collocati esternamente al blocco motore.

Per vedere il punto migliore dove applicare il sensore si sceglie una posizione abbastanza rigida; in questi punti c'è una migliore trasmissione delle vibrazioni e si riesce a limitare il livello di rumore in ingresso del sensore. I luoghi che reagiscono alle vibrazioni con movimento significativo sono stati anche eccessivamente inclini a rumore proveniente da altre fonti.

5. ACQUISIZIONE DATI

In questo capitolo è possibile osservare il processo di progettazione di un'interfaccia di acquisizione dati con l'ausilio del programma *LabVIEW*.

5.1. Introduzione a LabVIEW

Da oltre vent'anni, scienziati ed ingegneri di tutto il mondo utilizzano *LabVIEW* per la creazione di applicazioni sempre più avanzate. Sviluppato da NI-National Instruments, *LabVIEW* è l'unico software di progettazione, in grado di fornire tutti gli strumenti necessari per lo sviluppo di sistemi di controllo e di misura, includendo funzioni avanzate, che permettono di accelerare la produttività con lo sviluppo di applicazioni innovative. Ecco perché tutt'ora le aziende che operano nel campo della mecatronica e dell'automazione, richiedono sempre più esperienza nel campo software, che comprende numerosi applicativi, tra cui *LabVIEW*.

LabVIEW è l'acronimo di: *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, ed è un ambiente di sviluppo per applicazioni orientate essenzialmente all'acquisizione dati, analisi di segnali e gestione della strumentazione. L'ambiente è di semplice utilizzo o user friendly poiché fornisce una programmazione di tipo grafico ad oggetti, denominato "G language", il quale permette di programmare attraverso diagrammi a blocchi. È molto simile agli ambienti di programmazione tradizionali, perché presenta tutti i tipi di dati, permette di generarne di nuovi e di controllarne l'esecuzione facendo ricorso a strutture di controllo del flusso dati, tramite cicli e strutture, per un'esecuzione selettiva del codice. Il programmatore è supportato da una serie di librerie di funzioni che in caso di necessità possono essere richiamate all'interno dei programmi: come le funzioni aritmetico/statistiche, cioè funzioni specializzate per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali, per il controllo di strumentazione numerica o la trasmissione dati, tramite l'utilizzo di porte seriali.

Rispetto ad uno strumento di misurazione tradizionale con funzioni già note e con un pannello frontale fisso, questo linguaggio di programmazione consente di personalizzare l'elaborazione dei dati, così come il pannello frontale stesso. Questo aspetto conferisce una flessibilità senza precedenti, ove il calcolatore sarà parte integrante del sistema di misura adottato permettendo una vera e propria interazione tra il calcolatore stesso e la

strumentazione di misura, offrendo contemporaneamente all'utente un pannello frontale grafico come finestra di dialogo. In tal modo l'utente è supportato da questo nuovo dispositivo, formato dal calcolatore, da interfacce utente, strumenti reali di banco e dal programma, il quale presenta un aspetto molto più interessante, anche rispetto ai classici strumenti di misura, essendo all'interno di una realtà virtuale, aspetto questo che spiega il significato del nome Virtual Instrument VI per un programma in *LabVIEW*.

In poche parole, operazioni che tradizionalmente si eseguono tramite strumentazione di misura (oscilloscopio, generatore di forme d'onda, etc.) come ad esempio: la determinazione della risposta in frequenza di un dispositivo elettronico, procedura molto impegnativa in termini di tempo e che potrebbe richiedere una certa familiarità con la strumentazione di laboratorio, utilizzando *LabVIEW* è possibile costruire uno strumento virtuale per eseguire automaticamente la misura. Lo scopo è quello di eseguire le stesse operazioni di misura effettuate in precedenza da strumenti reali "da banco", riuscendo così ad impostare i parametri utili alla misura, per poi visualizzare a monitor i risultati della misurazione.

5.2. VI utilizzati nel progetto

La libreria LabView mette a disposizione vari VI, Virtual Instruments, che l'utente può adoperare per realizzare i propri progetti. Nel caso in questione le VI saranno utilizzate per l'acquisizione dati e per il conseguente salvataggio.

5.2.1. Acquisizione dei segnali

I segnali che si intendono acquisire sono tutti analogici, si tratta dunque di voltaggi. Questi segnali necessitano di essere digitalizzati e amplificati per poter essere letti. E' proprio questo il compito della scheda di acquisizione DAQ NI – 6009USB. LabView permette di acquisire i segnali dai canali di questa scheda di acquisizione. Prima di poter leggere i sensori è necessario scaricare ed installare il pacchetto di driver NI DAQmx Data Acquisition. Questo pacchetto offre all'utente la possibilità di far comunicare il proprio calcolatore con tutti i modelli di scheda di acquisizione della serie DAQmx.

Il passo successivo è quello di ricordare quali sono i segnali da acquisire:

- 5 segnali di pressione;
- 1 segnale di accelerazione;
- 1 segnale di posizione.

Il primo VI da inserire ha l'obiettivo di creare il canale di acquisizione che poi andrà a leggere i segnali che arrivano via bus dai trasduttori. Il VI in questione è DAQmx Create Virtual Channel (fig. 47).

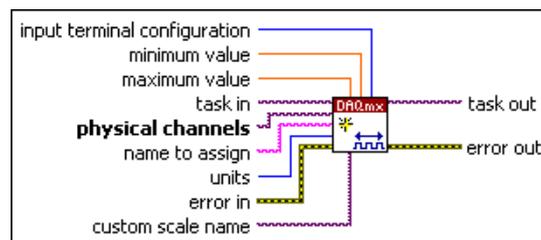


Figura 47 – DAQmx Create Virtual Channel VI

Questa VI crea un canale virtuale o un insieme di canali virtuali e li aggiunge a un'attività. Le istanze di questo VI polimorfico corrispondono al tipo di I/O del canale, come ingresso analogico, uscita digitale o uscita del contatore.

Per prima cosa si opera con la configurazione dei terminali di ingresso: in questo caso il segnale analogico è settato con RSE, ovvero si sceglie un metodo di misurazione single – ended referenziato. Successivamente sarà possibile necessario impostare il physical channel, ovvero dovrà essere selezionato canale della scheda di acquisizione nel quale il programma LabView andrà a ricercare il segnale. Settati questi parametri il VI creato risulterà funzionante a dovere per acquisire i segnali desiderati. Non sarà inoltre necessario impostare i valori massimi o minimi che le misurazioni dovranno assumere.

Il VI che seguirà la creazione del canale virtuale è il DAQmx Trigger (fig. 48). Questo VI configura il trigger, ovvero una sorta di innesco che ha lo scopo di sincronizzare tutti i segnali acquisiti. Il dispositivo scelto, DAQ NI-6009USB è molto limitato per quanto riguarda le funzioni di triggering. L'unica funzione che è possibile realizzare, infatti, è quella di un trigger digitale da utilizzare al fine di determinare l'istante in cui inizia l'acquisizione di campioni analogici. In altre parole, il sistema rimane in attesa fino a

quando non si verifica un evento che fa “scattare” il trigger, e solo in quel momento il dispositivo inizia ad acquisire i campioni. E’ importante studiare e configurare correttamente tutte le istanze che corrispondono a questo VI in quanto è uno dei blocchi più importanti che permette per l’appunto di evitare segnali sfalsati, i quali non sono per nulla graditi specialmente perché si mira ad ottenere tutte le tracce sincronizzate e in funzione dell’angolo di manovella.

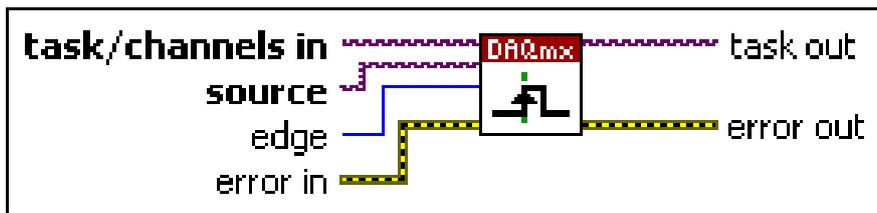


Figura 48 – DAQmx Trigger VI

La prima istanza da configurare è l’edge che permetterà di specificare su quale fronte del segnale digitale iniziare ad acquisire campioni. Per l’acquisizione dei dati in questa trattazione è necessario impostare uno Start Digital Edge. Infine, è sufficiente impostare la sorgente per far sì che questo blocco sia configurato adeguatamente. Per i limiti della scheda di acquisizione non è possibile scegliere il terminale fisico al quale collegare il segnale del trigger, che deve essere necessariamente il canale PFIO, il quale è impostato mediante una costante LabView.

Il VI successivo utilizzato nel programma è il DAQmx Timing (fig. 49).

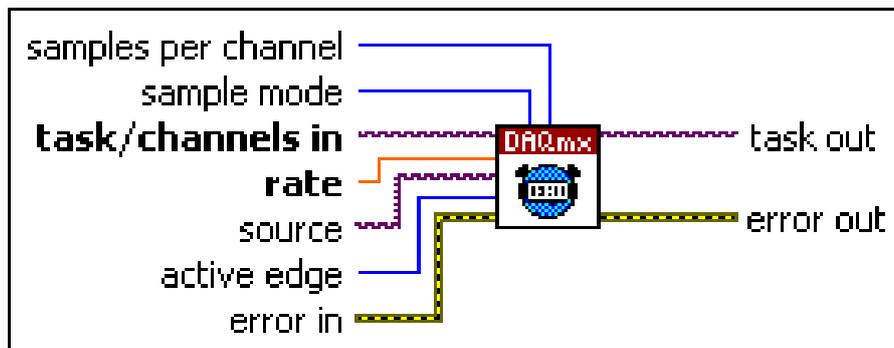


Figura 49 – DAQmx Timing VI

Questo VI permette di configurare il numero di campioni da acquisire e genera un buffer quando necessario. Le istanze di questo VI polimorfico corrispondono al tipo di temporizzazione da utilizzare per un qualsiasi compito specifico. Per questo VI le istanze da valutare sono più complesse e richiedono più attenzione. Le istanze da configurare sono esattamente 6:

- 1) Active edge, che specifica su quali fronti degli impulsi del sample clock acquisire. In questo specifico caso sarà impostato su Rising;
- 2) Rate, specifica il sampling rate ovvero la frequenza di campionamento, misurata in campioni per canale al secondo. La scheda di acquisizione della quale si dispone ha una frequenza di campionamento pari a 48 kS/s; dunque, ogni canale avrà una frequenza di campionamento pari a $48/n$ kS/s. E' importante ricordare il teorema di Nyquist – Shannon, che impone di campionare esclusivamente segnali con frequenza minore di 12 kHz, pena la presenza di effetti di aliasing in frequenza.
- 3) Sample mode, specifica all'attività di acquisire campioni in modo continuo;
- 4) Sample per channel, specifica il numero di campioni da acquisire per ciascun canale nell'attività se la modalità campione è finita. Se l'attività è configurata in campioni continui, NI – DAQmx utilizza questo valore per determinare la dimensione del buffer;

Oltre alla configurazione di questi valori è necessario calcolare altri parametri che saranno d'aiuto per non avere problemi di disturbo del segnale, quale aliasing per esempio;

- Periodo di campionamento, che è dato dal rapporto inverso della frequenza di campionamento;
- Finestra segnale acquisito, è il tempo totale di acquisizione del segnale espresso in secondi ed è il prodotto tra numero di campioni da acquisire e il periodo di campionamento.

Per osservare la posizione del pistone si può sfruttare, come già ampiamente discusso nel capitolo 4, il sensore di posizione di tipo hall che misura la velocità del motore in rpm. Il volano della frizione sarà riprogettato in modo da aumentare il numero di denti al fine di aumentarne la risoluzione. Il nuovo volano avrà 59 denti, il dente mancante indica la posizione del PMS; perciò, il numero di sample da acquisire è $2*n$.

Il blocco successivamente utilizzato è *DAQmx Start Task* (fig. 50), il quale passa l'attività allo stato di esecuzione per iniziare la misurazione o la generazione. L'utilizzo di questo VI è richiesto per alcune applicazioni ed è facoltativo per altre. L'utilizzo di questi VI è accompagnato dall'utilizzo *DAQmx Stop Task* (fig. 51), che arresta il task e lo riporta allo stato in cui si trovava prima dell'esecuzione del VI *DAQmx Start Task*.

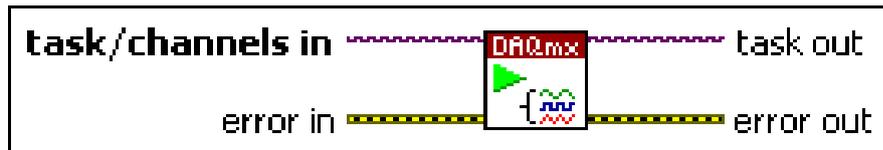


Figura 50 – *DAQmx Start Task*

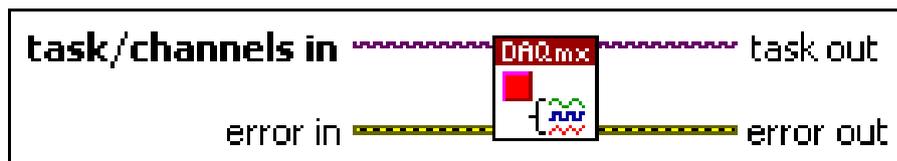


Figura 51 – *DAQmx Stop Task*

L'ultimo blocco fondamentale per la progettazione del sistema VI di acquisizione dati è il *DAQmx Read* (fig. 52) che legge i campioni dell'attività o dai canali virtuali specificati. Le istanze di questo VI polimorfico specificano quale formato di campioni restituire, se leggere un singolo campione o più campioni contemporaneamente e se leggere da uno o più canali.

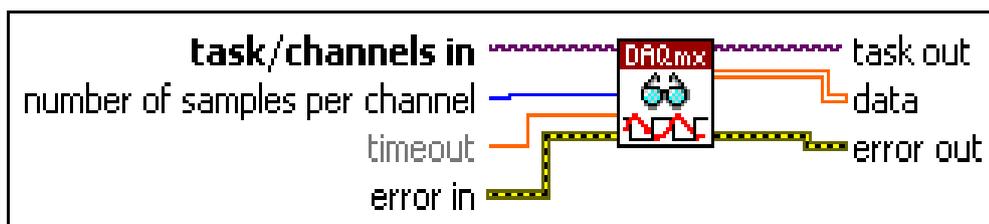


Figura 52 - *DAQmx Read* block

I parametri da settare per questo blocco sono sostanzialmente 3:

- Timeout, specifica il tempo in secondi di attesa prima che i campioni diventino disponibili. Se il tempo trascorre, il VI restituisce un errore e tutti i campioni letti prima dello scadere del timeout. Il timeout predefinito è di 10 secondi;
- Number of sample per channel, che specifica il numero di campioni da leggere. Se si lascia questo ingresso non cablato o lo si imposta su -1, NI-DAQmx determina il numero di campioni da leggere in base al fatto che l'attività acquisisca campioni continuamente o acquisisca un numero finito di campioni;
- L'ultimo parametro da settare è la modalità di lettura, in questo caso vengono letti dati analogici monodimensionali in forma d'onda di canali multipli a sample multipli.

5.2.2. Salvataggio dati

Può essere utile salvare i dati ottenuti dalle acquisizioni dei vari segnali in modo da poterli processare successivamente.

Un programma che potrebbe rivelarsi utile nella fase di post processing dei dati è sicuramente Excel, che permetterà di svolgere calcoli e di estrapolare ulteriori informazioni dalle acquisizioni.

Il blocco che può aiutare a salvare i file come .xls o .txt è Export Waveforms to Spreadsheet File VI. Questo VI converte una forma d'onda in una stringa di testo e scrive la stringa in un nuovo file di flusso di byte o aggiunge la stringa ad un file esistente.

E' necessario collegare i dati all'input delle forme d'onda per determinare l'istanza polimorfica da utilizzare o selezionare manualmente l'istanza. Il VI di salvataggio dei dati si presenta in questa forma (fig. 53) ed è identico sia per il file sull'analisi dei fenomeni d'onda in aspirazione, sia per l'analisi della combustione.

I file Excel che *LabVIEW* andrà a creare sono due per ogni acquisizione. In uno saranno salvati i valori sull'asse x e nell'altro saranno salvati i dati sull'asse y, nel caso in questione rispettivamente tempo e pressione. In figura sono riportate due immagini che

mostrano una parte del foglio di calcolo Excel dove si possono osservare i valori d'esempio plottati sull'asse x e sull'asse y del grafico. (fig. 54).

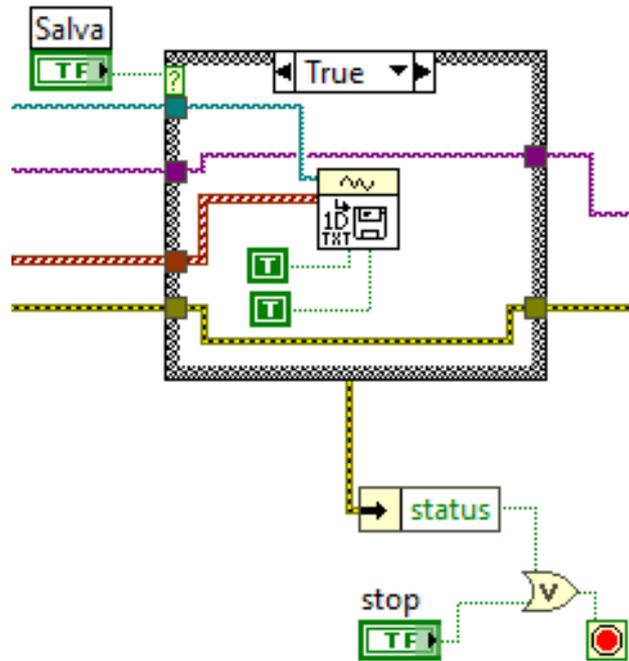


Figura 53 – VI di salvataggio dei dati

	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F
1	waveform	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	4						
2	t0	22:47,3	22:47,3	22:47,3	22:47,3	22:47,3	5	time					
3	delta t	0,000104	0,000104	0,000104	0,000104	0,000104	6	waveform	P_intercoc	P_runner	P_intake	P_cylinder	P_exhaust
4							7	t0	22:47,3	22:47,3	22:47,3	22:47,3	22:47,3
5	time	Y[0]	Y[1]	Y[2]	Y[3]	Y[4]	8	delta t	0,000104	0,000104	0,000104	0,000104	0,000104
6	22:47,3	4,52E-02	5,60E-01	1,03E+00	1,37E+00	1,71E+00	9						
7	22:47,3	7,20E-02	6,82E-01	1,11E+00	1,31E+00	1,80E+00	10	time	P_intercoc	P_runner	P_intake	P_cylinder	P_exhaust
8	22:47,3	1,00E-01	6,45E-01	1,10E+00	1,45E+00	1,77E+00	11	22:47,3	-1,50E-01	4,41E-01	7,50E-01	1,35E+00	1,68E+00
9	22:47,3	1,21E-01	6,14E-01	1,11E+00	1,26E+00	1,72E+00	12	22:47,3	-6,10E-03	3,78E-01	9,61E-01	1,35E+00	1,73E+00
10	22:47,3	1,32E-01	5,70E-01	8,87E-01	1,27E+00	1,65E+00	13	22:47,3	-9,77E-02	5,30E-01	9,05E-01	1,26E+00	1,60E+00
11	22:47,3	1,42E-01	6,60E-01	1,01E+00	1,27E+00	1,65E+00	14	22:47,3	-1,45E-01	3,00E-01	8,02E-01	1,15E+00	1,56E+00
12	22:47,3	3,66E-02	6,05E-01	1,08E+00	1,50E+00	1,87E+00	15	22:47,3	1,46E-01	4,07E-01	7,29E-01	1,11E+00	1,51E+00
13	22:47,3	2,08E-02	6,21E-01	1,04E+00	1,43E+00	1,81E+00	16	22:47,3	-3,54E-02	4,33E-01	8,64E-01	1,29E+00	1,69E+00
14	22:47,3	7,81E-02	4,03E-01	1,10E+00	1,49E+00	1,83E+00	17	22:47,3	-9,89E-02	4,73E-01	8,28E-01	1,21E+00	1,53E+00
15	22:47,3	1,57E-01	5,97E-01	8,31E-01	1,49E+00	1,91E+00	18	22:47,3	3,30E-02	5,09E-01	9,34E-01	1,26E+00	1,60E+00
16	22:47,3	3,66E-03	4,99E-01	1,09E+00	1,37E+00	1,85E+00	19	22:47,3	1,15E-01	4,93E-01	9,81E-01	1,38E+00	1,67E+00
17	22:47,3	2,29E-01	4,28E-01	1,06E+00	1,24E+00	1,80E+00	20	22:47,3	-1,05E-01	4,13E-01	7,65E-01	1,37E+00	1,57E+00
18	22:47,3	2,06E-01	5,51E-01	1,06E+00	1,39E+00	1,77E+00	21	22:47,3	8,55E-02	5,28E-01	9,93E-01	1,41E+00	1,69E+00
19	22:47,3	2,11E-01	5,68E-01	9,40E-01	1,40E+00	1,81E+00	22	22:47,3	-3,05E-02	3,55E-01	7,84E-01	1,36E+00	1,52E+00
20	22:47,3	7,69E-02	6,06E-01	9,91E-01	1,31E+00	1,91E+00	23	22:47,3	-3,42E-02	3,03E-01	8,98E-01	1,12E+00	1,51E+00
21	22:47,3	1,78E-01	5,98E-01	9,31E-01	1,29E+00	1,69E+00	24	22:47,3	1,28E-01	3,58E-01	7,77E-01	1,28E+00	1,72E+00
22	22:47,3	8,55E-03	4,30E-01	8,83E-01	1,43E+00	1,65E+00	25	22:47,3	1,04E-01	4,94E-01	8,41E-01	1,17E+00	1,73E+00
23	22:47,3	1,92E-01	4,60E-01	1,08E+00	1,31E+00	1,62E+00	26	22:47,3	-6,10E-03	4,14E-01	9,80E-01	1,33E+00	1,54E+00
24	22:47,3	2,55E-01	6,04E-01	8,16E-01	1,50E+00	1,68E+00	27	22:47,3	3,30E-02	3,92E-01	9,16E-01	1,29E+00	1,68E+00
25	22:47,3	2,36E-01	4,31E-01	8,22E-01	1,41E+00	1,85E+00	28	22:47,3	-3,78E-02	3,22E-01	7,64E-01	1,24E+00	1,75E+00

Figura 54 – Salvataggio dati su Excel

5.3. Acquisizione dei fenomeni dinamici

Con i VI precedentemente elencati e configurati sarà possibile assemblare la struttura completa del block diagram e del front panel per la valutazione dei fenomeni dinamici all'interno del motore ad alte prestazioni di Formula SAE KTM LC4 equipaggiato per la P4 Evoluzione del Polimarche Racing Team.

5.3.1. Block Diagram

La struttura del block diagram è riportata in figura (fig. 55).

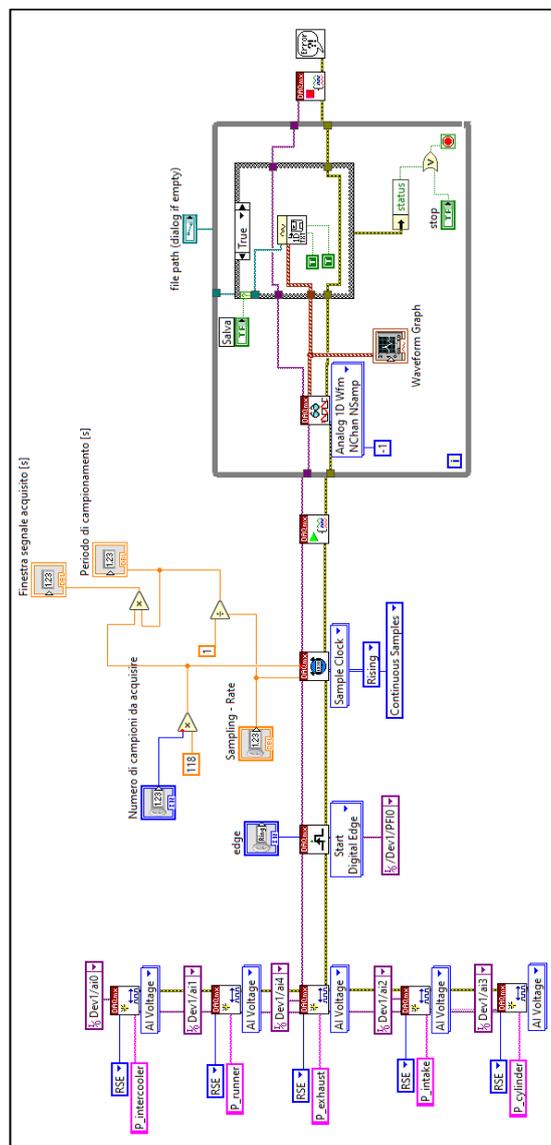


Figura 55 – Block Diagram

5.3.2. Front panel

Di seguito è riportata la struttura completa del front panel per la visualizzazione dei fenomeni dinamici all'interno del motore ad alte prestazioni di Formula SAE KTM LC4 (fig. 56). La struttura è molto semplice; per facilità di lettura sono stati riportati all'interno di un solo grafico le tracce delle pressioni d'interesse.

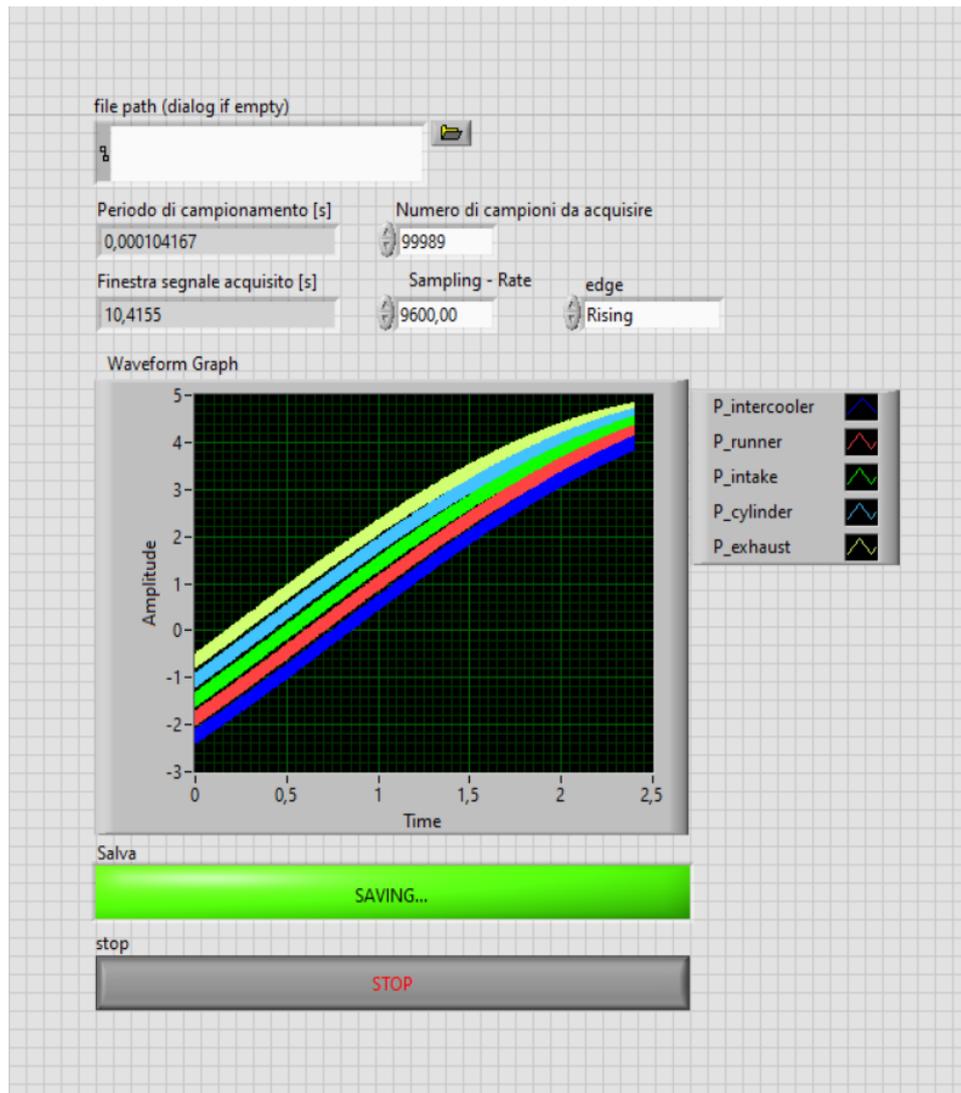


Figura 56 – Front Panel

5.4. Acquisizione dei segnali per l'analisi della combustione

Con i VI precedentemente elencati e configurati sarà possibile assemblare la struttura completa del block diagram e del front panel per la valutazione dei fenomeni dinamici

5.4.2. Front Panel

Di seguito è riportata la struttura completa del front panel per l'analisi della combustione del motore ad alte prestazioni di Formula SAE KTM LC4 (fig. 58). La struttura è molto semplice; per facilità di lettura sono stati riportati all'interno di un solo grafico le tracce delle pressioni d'interesse e di accelerazione.

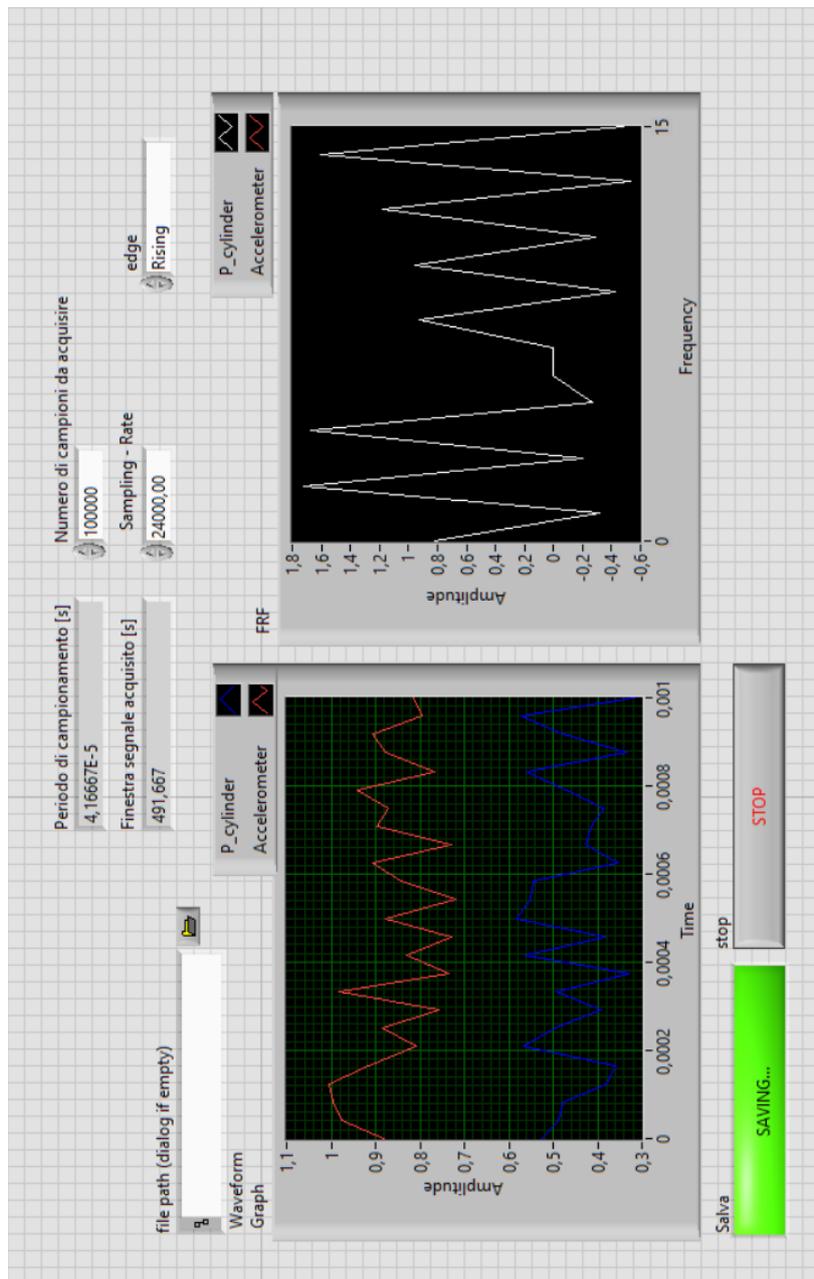


Figura 58 – Front Panel

6. POST PROCESSING

La fase di post processing è fondamentale per estrapolare ulteriori dati, specialmente per quanto riguarda l'analisi della combustione. E' importante, ad esempio, valutare valori come il rilascio di calore oppure la traccia di pressione per effettuare una corretta taratura del motore.

6.1. Calore rilasciato

Come già accennato nel capitolo sull'analisi di pressione, la traccia di pressione permette di avere informazioni anche sull'andamento di altri due parametri fondamentali:

- Rilascio di calore [J/deg];
- Rilascio di calore cumulato [J].

6.1.1. Calcolo del calore rilasciato

In accordo con il I primo principio della termodinamica, o principio di conservazione dell'energia:

$$\frac{dQ_b}{d\theta} + \sum_i h_i \frac{dm_i}{d\theta} = \frac{dE}{d\theta} + \frac{dL}{d\theta} + \frac{dQ_r}{d\theta}$$

Da questo principio può essere estrapolata la quantità di energia, in questo caso calore, liberata dal processo di combustione:

$$\frac{dQ_b}{d\theta} = \frac{k}{k-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dp}{d\theta} + \frac{dQ_r}{d\theta}$$

Una volta misurato accuratamente l'andamento della pressione nel cilindro $p = p(\theta)$, essendo nota la variazione del suo volume $V = V(\theta)$, la seguente equazione permette di

determinare l'evoluzione della temperatura media dei gas nel cilindro, da cui si possono dedurre molte informazioni.

6.1.2. Modello per il post processing dei dati

Per poter definire le tracce delle pressioni in funzione dell'angolo di manovella e per osservare le tracce del rilascio di calore può essere d'aiuto l'implementazione di un nuovo software, Excel. Per creare un foglio di calcolo come prima cosa occorre riportare i valori di pressione ottenuti dalle misurazioni.

Ricordando che le prove sul banco sono effettuate in condizioni di WOT, wide open throttle, ad un regime di giri fisso, si conosce anche l'angolo di manovella: sapendo che l'angolo zero è in corrispondenza del PMS e grazie anche all'encoder, si può arrivare a conoscere l'angolo di manovella grazie alla seguente formula.

$$\theta = \omega t$$

Dove omega rappresenta la velocità angolare e può essere espressa in funzione del numero di giri.

$$\theta = 2\pi n t$$

Avendo pressioni e angoli di manovella, inserendoli su Excel è possibile ricostruire la traccia della pressione nel cilindro (fig. 59).

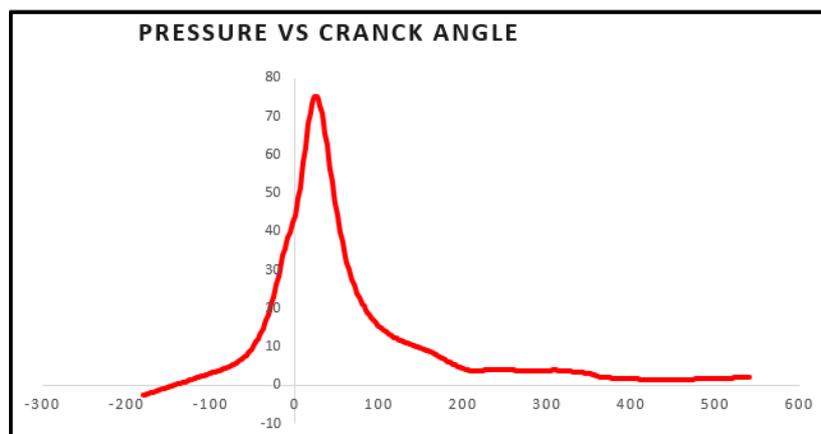


Figura 59 – Pressure vs. Cranck Angle

Excel permette di calcolare facilmente altri fattori utili che potranno essere impiegati per poter osservare l'andamento del calore rilasciato durante la combustione.

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{V}{2} \left[\sin \theta + \frac{\Lambda \sin 2\theta}{2\sqrt{1 - \Lambda^2 \sin^2 \theta}} \right]$$

$$V = V \left[\frac{1}{r-1} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\Lambda} - \cos \theta - \frac{1}{\Lambda} \sqrt{1 - \Lambda^2 \sin^2 \theta} \right) \right]$$

$$r = \frac{(V + V_c)}{V_c}$$

$$\Lambda = \frac{Rm}{Lb} = \frac{\text{Raggio di manovella}}{\text{Lunghezza di biella}}$$

Il passo successivo è possibile riportare le formule su Excel in modo da ottenere un ambiente di lavoro ordinato per il calcolo del calore rilasciato, in figura è riportato il foglio di calcolo con dei valori di esempio simulati (fig. 60).

ANGOLO DI MANOVELLA	dV/dθ	Λ	θ [RAD]	sinθ	sin2θ	HEAT RELEASED
-180	0	Raggio di manovella/ Lunghezza di biella	-3,141592654	0	0	33,33333333
-178	-8,466884154	0,3	-3,106686069	-0,034899497	0,069756474	116,7743346
-176	-16,9355118		-3,071779484	-0,069756474	0,139173101	190,5040706
-174	-25,40758528		-3,036872898	-0,104528463	0,207911691	254,5343474
-172	-33,88472463	CILINDRATA	-3,001966313	-0,139173101	0,275637356	308,8724035
-170	-42,36842619	693	-2,967059728	-0,173648178	0,342020143	353,5208512
-168	-50,8600211	r	-2,932153143	-0,207911691	0,406736643	388,4776153
-166	-59,36063352	Rapporto di compressione	-2,897246558	-0,241921896	0,469471563	413,7363483
-164	-67,87113862	11	-2,862339973	-0,275637356	0,529919264	429,2865713
-162	-76,39212025	V/2	-2,827433388	-0,309016994	0,587785252	435,1143579
-160	-84,92382835	Meta cilindrata	-2,792526803	-0,342020143	0,64278761	431,2028009
-158	-93,46613619	346,5	-2,757620218	-0,374606593	0,69465837	417,5328564
-156	-102,0184973		-2,722713633	-0,406736643	0,743144825	394,0843851

Figura 60 – Foglio di calcolo per il calcolo del calore rilasciato

Una volta eseguiti tutti i calcoli è possibile procedere con l'analisi analitica di tutti i dati ottenuti e il *Polimarche Racing Team* è in grado di avere ottimi strumenti per la calibrazione del motore ad alte prestazioni *KTM LC4*.

6.2. Taratura del motore

Dalle misurazioni si possono ottenere dati interessanti per la taratura del motore: per eseguire questo passaggio è necessario osservare quasi esclusivamente la traccia di pressione all'interno del cilindro. Osservando la traccia si può vedere l'effetto teorico dell'alterazione della fasatura di accensione. La pressione di picco ne risulta influenzata.

La curva cambia sia prima del PMS sia dopo dunque un'analisi della sola traccia di pressione non è sufficiente. Per avere un'idea più chiara si osserva la pressione media effettiva per tutte le impostazioni.

$$pme = \frac{60 \cdot i \cdot P_{mot}}{n \cdot V} = \frac{C \cdot 2\pi}{V} \cdot i$$

Anche la temperatura è influenzata dalla pressione di picco del cilindro.

Per poter realizzare un'ottima regolazione dei parametri di combustione, ovvero ottenere tracce di pressione diverse, si possono studiare diversi rapporti di aria-combustibile e variazione di tempi di accensione.

Il rapporto aria-combustibile influisce sulla durata della combustione a causa del calore latente di evaporizzazione, il quale influenza la pressione di picco durante l'accensione, dunque, avvicinandosi al limite di autoaccensione.

La variazione dei tempi di accensione ha effetto su entità e posizione del picco massimo della pressione.

MATERIALE A SUPPORTO

In questa sezione sono riportati i datasheet dei trasduttori di pressione e del sensore di battito in testa che sono stati scelti in fase di progettazione.

Pressure



High-temperature pressure sensor for combustion engine measurements

Type 6044A...

The uncooled precision high-temperature pressure sensor with its anti-strain design has very high sensitivity and excellent thermodynamic characteristics. It is shoulder sealing mounted in an M8x0.75 through thread bore.

It is suitable for different mounting situations and can be fitted without a mounting sleeve. Pronounced installation insensitivity due to the decoupled measuring element from the sensor housing allows installation which dispenses of mounting sleeves but still achieves very good results. Therefore it is perfect for powerful and compact engines with little space for the installation of measuring technology.

- Mounting dimensions compatible with pressure sensors Type 6041... and 6045A with M8x0.75 (through thread)
- Anti-strain design, ideal for direct mounting
- Low thermal shock error
- Low sensitivity shift over the whole temperature range
- High accuracy and high sensitivity
- Very low linearity deviation
- Long service life with pressure-resistant crystal-package

Description

The Type 6044A... uses a PiezoStar crystal for high sensitivity in a compact form. Thanks to its high nominal pressure range 300 bar and crystal package with an improved pressure-resistant design it can withstand higher pressure peaks.

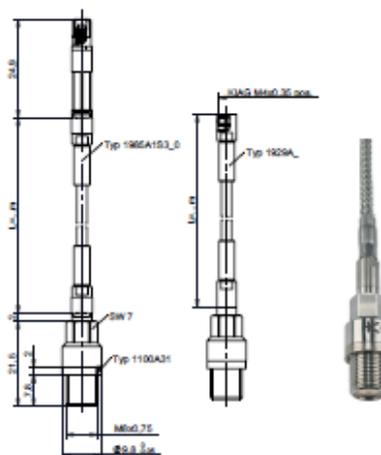
In addition to the minimum sensitivity change over the temperature range (TKE) and a very small linearity deviation the Type 6044A... is characterized by a low thermal shock error.

The new development Type 6044A... mountable in the bore of the uncooled sensors type 6045... and the cooled sensor Type 6041... with an M8x0.75 through-hole thread.

Application

The sensor Type 6044A... is a multi-applications sensor, which can be used during the complete development process of engines – from validation to calibration.

As an uncooled design it is also ideally suited for on-board use in in-vehicle testing.



Technical data

Measuring range	bar	0 ... 300
Calibrated partial ranges	bar	0 ... 100, 0 ... 150, 0 ... 200, 0 ... 300
Overload	bar	350
Sensitivity	pC/bar	≈-30
Natural frequency	kHz	≥100
Linearity, all ranges (at 23 °C)	%/FSO	≤±0.3
Acceleration sensitivity		
axial	bar/g	≤0.002
radial	bar/g	≤0.0002
Operating temperature range	°C	-20 ... 350
Temperature, min./max.	°C	-40 ... 400
Sensitivity shift		
RT ... 350 °C	%	≤±1
250 °C ±100 °C	%	≤±0.5
Thermal shock error (at 1 500 1/min, IMEP = 9 bar)		
Δp (short-term drift)	bar	≤±0.2
ΔIMEP	%	≤±1
Δp _{max}	%	≤±1
Insulation resistance at 20 °C	Ω	≥10 ¹¹
Tightening torque, greased	N·m	6
Capacitance, without cable	pF	10
Weight sensor	g	8
Connector, sapphire	-	M4x0.35

Page 1/4

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

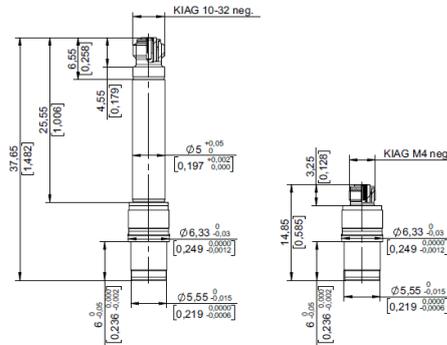
©2020, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, Info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler Group products are protected by various intellectual property rights. For more details visit www.kistler.com

Piezoelectric pressure sensor for Test & Measurement applications

Type 601C...

The miniature pressure sensors of the Type 601C series are, due to their high sensitivity, suited for a variety of applications where very small pressure pulsations need to be measured. In addition, the optimized diaphragm ensures accurate dynamic pressure measurements, even when the diaphragm is simultaneously exposed to a high thermal shock.

- Pressure range up to 250 bar (3 626 psi)
- High sensitivity
- Membrane optimized for high thermal shocks
- Small sensor size
- Short rise time & high natural frequency
- Extremely wide operating temperature range
- Charge (PE) or Voltage (IEPE) output



Technical data – PE sensors ¹⁾

Type 601CA...

Output signal	pC	Charge (PE)
Pressure range	bar	0 ... 250
	psi	0 ... 3 626
Calibrated partial range	%	2; 20; 100
Overload	bar	300
	psi	4 350
Sensitivity (nom.)	pC/bar	-37.0
	pC/psi	-2.6
Linearity (typ.)	%FSO	≤±0.1
	%FSO	≤±0.3
Operating temperature range	°C	-196 ... +350
	°F	-321 ... +662

Rise time (10 ... 90%)	µs	<1.4
Natural frequency ²⁾	kHz	>215
Noise (1 Hz ... 10 kHz) (typ.)	µbar _{rms}	15
Acceleration sensitivity (axial) (typ.)	bar/g	0.0020
	psi/g	0.0290
Acceleration sensitivity (radial) (typ.)	bar/g	0.0001
	psi/g	0.0015
Insulation resistance	Ω	≥10 ¹³
Weight	Type 601CAA / 601CAB	gram
Housing and diaphragm material		17-4 S.S.

Technical data – IEPE sensors ¹⁾

Type 601CBA...

		00001.5	00003.5	00007.0	00014.0	00035.0	00070.0	00250.0
Output signal	V	Voltage (IEPE)						
Pressure range	bar	1.5	3.5	7	14	35	70	250
	psi	22	50	100	200	500	1 000	3 626
Maximum pressure	bar / psi	250 / 3 626						
Overload	bar / psi	300 / 4 350						
Sensitivity (nom.)	mV/bar	3 333	1 429	714	357	143	71	20
	mV/psi	230	99	49	25	9.9	4.9	1.4
Linearity	%FSO	≤±1.0						
Operating temperature range	°C / °F	-55 ... +120 / -67 ... +248						
Rise time (10 ... 90%)	µs	<1.4						
Natural frequency ²⁾	kHz	>215						
Time constant (nom.)	s	2						
Low frequency response	-3 dB	0.080						
	-5%	0.242						
Noise (1 Hz ... 10 kHz) (typ.)	µbar _{rms}	3.5	8	16	32	79	160	567
Acceleration sensitivity (axial) (typ.)	bar/g	0.0020						
	psi/g	0.0290						
Acceleration sensitivity (radial) (typ.)	bar/g	0.0001						
	psi/g	0.0015						
Supply voltage (by IEPE-Coupler)	VDC	22 ... 30						
Supply current (by IEPE-Coupler)	mA	2 ... 20						
Output bias voltage (nom.)	VDC	11						
Output voltage FSO	V	±5						
Weight	gram	3.6						
Housing and diaphragm material	-	17-4 S.S.						

Knock Sensor KS4-P



- ▶ Frequency: 3 to 25 kHz
- ▶ Weight: 48 g
- ▶ Height sensor head: 18 mm

This sensor is used for detecting structural born vibrations in spark ignition engines due to uncontrolled combustion. This sensor is suitable for operation in extreme conditions.

Due to the inertia of the seismic mass, the sensor moves in correlation to the engine block vibration; this motion results in a compressive force which is converted into a voltage signal via a piezoceramic sensor element. As a result, upper and lower voltage thresholds can be defined directly correlating to an acceleration magnitude.

The main benefits of this sensor are its robust mechanical design, compact housing and precise determination of structure-related noise. The small packaging is accomplished by integrating the connector directly to the sensor.

Application

Application	3 to 25 kHz
Operating temperature range	-40 to 150°C
Storage temperature range	-30 to 60°C
Max. vibration	≤ 800 m/s ²

Technical Specifications

Mechanical Data

Male thread (for cast)	M8x25
Male thread (for Al)	M8x30
Installation torque	20±5 Nm
Weight w/o wire	48 g
Protection	IP X9K

Electrical Data

Range of frequency	3 to 25 kHz
Sensitivity at 5 kHz	26 ± 8 mV/g
Max. sensitivity changing (lifetime)	-17 %
Linearity between 5 to 15 kHz (from 5 kHz value)	-10 to 10 %
Linearity between 15 to 20 kHz (linear increasing with freq)	20 to 50 %
Main resonance frequency	30 kHz
Impedance	> 1 MΩ
Temperature dependence of sensitivity	0.04 mV/g°C
Capacity field	1,150 ± 200 pF

Connectors and Wires

Mating connector 2-pole	2-Pin RB-Kp.1 (F 02U B00 966-01) Or 2-Pin Jetronic (D 261 205 288-01)
Pin 1	Sig+
Pin 2	Sig-

Installation Notes

The KS4-P can be connected to all Bosch Motorsport ECUs featuring knock control

The sensor must rest directly on the brass compression sleeve during operation.

CONCLUSIONI

La progettazione del sistema di misurazioni permetterà di arrivare ad ottenere i dati ricercati all'inizio della trattazione.

Un obiettivo molto importante, che si spera essere stato raggiunto, è anche quello di rendere universale questo sistema di misurazione; per universale si intende la possibilità di usare questa trattazione per espandere il sistema di misurazione anche per altri modelli propulsivi e non solo per il *KTM LC4* del *Polimarche Racing Team*. Si mira ad avere l'opportunità, qualora il team abbia necessità di utilizzare un motore diverso, di poter utilizzare lo stesso sistema di misurazioni o quanto meno la stessa teoria che vi è dietro. Ovviamente gli ordini di grandezza di valori come pressioni o accelerazioni sono diversi in base al tipo di motore che si utilizza ma la base di studio potrebbe essere benissimo la stessa. Anche nella fase di post processing sono molte le variabili che entrano in gioco, questo non deve essere di preoccupazione per chi andrà ad elaborare i dati acquisiti in quanto i valori dei parametri sono facilmente calcolabili e spesso sono forniti direttamente dalle case produttrici del motore.

La progettazione del data acquisition system è stata realizzata nel massimo delle possibilità ma le criticità restano comunque molte. Per problemi di budget e tempi di sviluppo questo è il massimo del livello progettuale ottenuto in questa trattazione. Sono molte le considerazioni che si possono tentare per implementare innovazioni o novità, al fine di confezionare un prodotto che potrebbe anche essere immesso sul mercato essendoci una grande richiesta, soprattutto nel campo del motorsport. Una soluzione che può ottimizzare la misurazione può essere l'utilizzo di una scheda di acquisizione wireless: questo porterebbe a poter ottenere dei valori e tutte le tracce di pressione anche con il veicolo in movimento e confrontando i dati considerando anche tutto il carico stradale. In termini di efficienza il sistema di acquisizioni presenta delle criticità migliorabili. Per ottenere dati sperimentali con questo sistema è necessario utilizzare più programmi: *LabView*, *GT SUITE*, *Excel* o addirittura *MatLab*. E' possibile implementare tutte le funzioni utilizzate, specialmente nella fase di post processing, in *LabVIEW*. Con budget e tempi diversi tutto ciò sarebbe realizzabile.

BIBLIOGRAFIA

- Pignone G. A., Vercelli U. R., Motori ad alta potenza specifica, Giorgio Nada editore, Vimodrone (MI), 2016;
- Ferrari G., Motori a combustione interna, Esculapio, Bologna, 2020;
- Dues S. M., Adams J. M., Shinkle G., Combustion knock sensing: sensor selection and application issues, SAE Technical Paper No:900488, 1990;
- Stadler D. J., Walter D. T., Wolfer D. P., Ag K.I., Gossweiler C., Pressure sensors, Winterthur;
- Ludescher N., Defining real-time combustion control strategies using in-cylinder pressure measurement, Cranfield University, 2020;
- Corrigan, D. and Fontanesi, S., “Knock: A Century of Research,” SAE Int. J. Engines 15(1):2022, doi:10.4271/03-15-01-0004.
- Chalet D., Mahe A., Migaud J., Hetet J.F., A frequency modelling of the pressure waves in the inlet manifold of internal combustion engine, ScienceDirect, 2011;
- Szabo B., Vass D., Ludescher N., Introduction to combustion analysis, BDN Automotive, 2021.

