

Sintesi di:

Messa a punto sperimentale di un motore due tempi AC
a iniezione diretta con stratificazione della carica

di

Stefano Benedetti

Christian Niccolai

Tesi proposta per il conseguimento del
titolo accademico di

DOTTORE IN INGEGNERIA MECCANICA

Presso la

Facoltà di Ingegneria

della

Università degli studi di Pisa

1 marzo 2006

Autori:

Stefano Benedetti

Christian Niccolai

Approvata da:

Roberto Gentili

Giuseppe Forasassi

Stefano Frigo

1. Introduzione

Lo studio effettuato in questa tesi rientra nell'ambito di un contratto stipulato fra il Dipartimento di Energetica dell'Università di Pisa e la Dell'Orto S.p.A., indirizzato allo studio e alla messa a punto sperimentale di un piccolo motore a due tempi di 50 cm³ ad iniezione diretta e carica stratificata.

È noto che gli inconvenienti principali dei motori a due tempi ad A.C. “*tradizionali*” sono principalmente due:

- fuoriuscita di parte della miscela fresca allo scarico per cortocircuito durante la fase di lavaggio e per pulsione da parte dello stantuffo;
- mancate accensioni e comunque combustioni lente, irregolari ed incomplete con elevata dispersione ciclica ai bassi carichi, poiché in queste condizioni rimane intrappolato nel cilindro molto gas combusto, dando luogo ad una forte diluizione della modesta massa di carica fresca immessa.

Entrambi gli inconvenienti danno luogo ad elevate emissioni inquinanti allo scarico, oltre che ad elevati consumi di combustibile e l'introduzione delle ultime normative antinquinamento (*normativa 2002/51/CE*) ha reso indispensabile risolverli.

Per quanto riguarda la fuoriuscita della miscela fresca dallo scarico, la soluzione tecnica naturale risiede in un sistema di iniezione diretta del combustibile in modo da effettuare il lavaggio con sola aria. Per migliorare invece la combustione ai bassi carichi si deve puntare verso la “*stratificazione della carica*”. Essa consiste nella realizzazione, con opportune strategie, di una miscela aria-combustibile stechiometrica in prossimità della candela, ma complessivamente povera in modo da mantenere basso, grazie all'eccesso d'aria, il rapporto tra gas combusti e carica fresca. In questo modo viene garantito un buon innesco della combustione ed il suo progredire fino al coinvolgimento di tutto il combustibile presente in camera.

Numerose sono le difficoltà che si incontrano nell'applicare un sistema di iniezione diretta del combustibile ad un piccolo motore a 2T. Prima di tutto la messa a punto di un iniettore capace di portate ridotte e frequenze di iniezione elevate che oltrepassano, in un 2T di 50 cm³, i 150 Hz. È indispensabile adottare un sistema di iniezione ad alta pressione, che garantisce tempi di iniezione ridotti e la possibilità di iniettare poco prima dello scoccare della scintilla (*late injection*) per ottenere una corretta stratificazione. Inoltre, dovendosi ottenere la stratificazione della carica a diversi carichi e regimi di rotazione, è necessario il contributo sinergico di caratteristiche dello spray, fluidodinamica del motore e geometria della camera di combustione. A tal fine questo studio sperimentale è stato preceduto da un'attività computazionale, svolta anch'essa presso il dipartimento di Energetica dell'Università di Pisa,

che ha permesso la definizione di una camera di combustione diversa dall'originale e appropriata alle nostre esigenze. La geometria ideata, visibile in *figura 1*, è capace di mantenere un moto di *tumble*, che favorisce la risalita delle gocce di combustibile dallo stantuffo verso la testa della camera durante tutta la fase di compressione, in particolar modo nella zona ove è posizionata la candela. Il cielo dello stantuffo ha una forma non convenzionale, essendo dotato di un deflettore a cucchiaio, *figura 2*, studiato per agevolare il *tumble*.

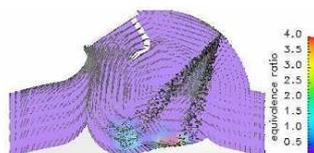


Fig. 1 geometria della camera di combustione



Fig. 2 geometria del cielo del pistone

2. Descrizione dell'attività svolta

La ricerca sperimentale è stata condotta su un motore monocilindrico di 50 cm³ di produzione Piaggio attualmente utilizzato su numerosi scooter. La testa ed il pistone di tale motore sono stati sostituiti in modo da rispettare le indicazioni ottenute con lo studio computazionale.

L'iniettore, prodotto da *Siemens* e denominato *DEKA XLI*, viene montato di serie su alcune auto ad iniezione diretta liquida. Anch'esso è stato modificato in accordo con le specifiche risultanti dall'attività computazionale.

La sperimentazione ha avuto le seguenti fasi principali:

- Caratterizzazione dello spray, suddivisa in due parti. La prima riguarda la *visualizzazione dello spray*, per il rilevamento delle caratteristiche geometriche quali: angoli caratteristici del cono, velocità di uscita e profondità di penetrazione, il tutto con vario ritardo rispetto all'apertura dello spillo ed al variare del tempo di mantenimento di apertura dell'iniettore. Le prove sono state eseguite seguendo le direttive della normativa SAE J-1832. Nella seconda fase si è eseguita la *misura della portata*, in funzione del tempo di mantenimento, oltre che dalla frequenza di pilotaggio. La caratterizzazione completa dell'iniettore si è resa necessaria per verificare che l'iniettore fornitoci rispettasse a pieno le specifiche tecniche richieste e per fornire ulteriori dati da utilizzare in sede computazionale per affinare il modello di calcolo.
- Interfacciamento e montaggio del motore al banco prova (*freno dinamometrico*); valutazione del rendimento della trasmissione interposta tra albero motore e freno; montaggio del sistema di pressurizzazione del combustibile e di rilevamento del consumo;

applicazione al motore di strumentazione per il rilievo di pressioni, temperature, inquinanti allo scarico.

- Prove al freno dinamometrico per l'ottimizzazione dei vari parametri motoristici. In particolare le prove si sono divise in alcuni step quali:

- 1) scelta del rapporto di compressione;
- 2) ottimizzazione dell'accensione;
- 3) scelta della pressione di alimentazione;
- 4) ottimizzazione del pilotaggio dell'iniettore;

- Prove al freno dinamometrico per la valutazione delle prestazioni. In pratica, definita la configurazione ottimale, sono state eseguite numerose prove atte a stabilire una caratterizzazione completa del motore a vari regimi di rotazione e carichi.

Da notare che in questa fase di sperimentazione si è scelto di eseguire tutte le prove al freno dinamometrico a *valvola di aspirazione completamente aperta*. Il fatto che ciò sia stato possibile senza problemi conferma l'ottima stratificazione della carica raggiunta con la configurazione motoristica adottata.

3. Caratterizzazione dello spray

Attraverso l'impianto schematizzato in *figura 3*, si sono potute acquisire immagini dello

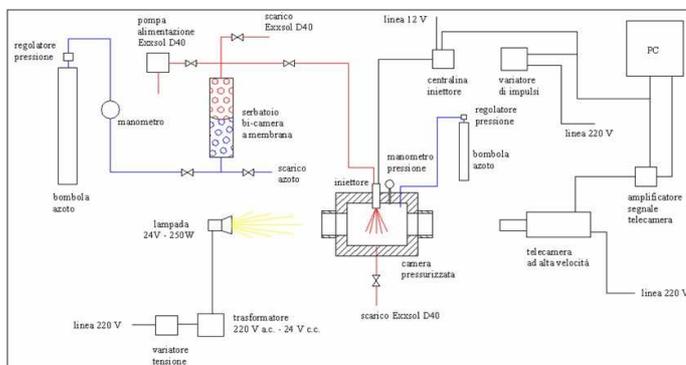


Fig.3 schema dell'impianto

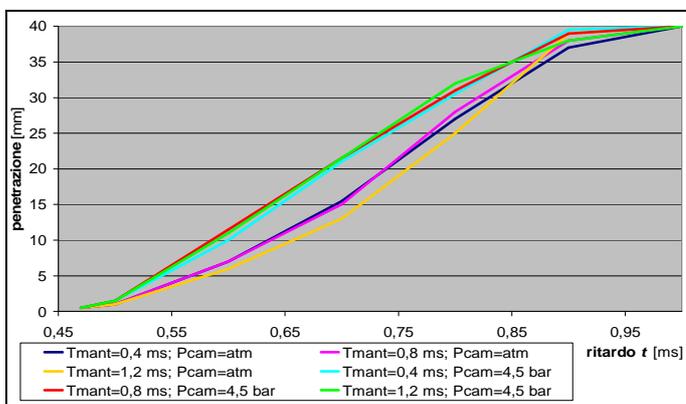


Fig.4 penetrazione del getto a vari instanti

spray con vario ritardo rispetto all'apertura dello spillo. Inoltre, variando il tempo di mantenimento, si è misurata la distanza di penetrazione (*figura 4*), sempre con vario ritardo rispetto all'apertura dello spillo, nonché l'angolo del cono. I rilievi sono stati eseguiti con due pressioni in camera di visualizzazione: la prima è quella atmosferica; la seconda, pari a 5 bar, è più o meno quella presente in camera di combustione durante un'iniezione ritardata.

La pressione del combustibile è stata fissata a 80 bar. Si nota dagli andamenti del grafico che la

penetrazione non è influenzata dal tempo di mantenimento. Risente invece, in misura apprezzabile, della pressione a valle dell'iniettore. L'aumento di questa determina inoltre un restringimento del cono di circa 10°. Le foto ed i risultati sono stati poi utilizzati per la simulazione, sia per affinare i parametri del modello dello spray che per verificare

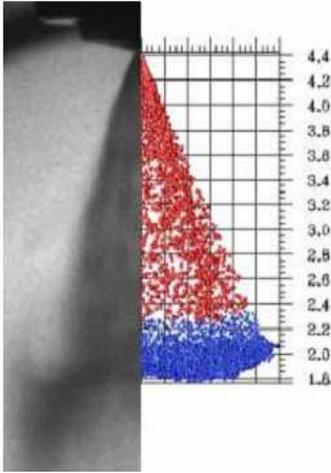


Fig.5 Spray

l'attendibilità delle previsioni numeriche, come mostrato in figura 5.

Le prove di visualizzazione dello spray sono state ripetute dopo circa 20 ore di funzionamento dell'iniettore sul motore, non mostrando differenze significative con quelle iniziali, a conferma del mantenimento delle caratteristiche originali durante la sperimentazione del motore al banco.

Le prove di portata sono state eseguite con frequenze di pilotaggio di 50 e 100Hz, (rispettivamente corrispondenti a 3000 e 6000 giri/min del motore), mantenendo la pressione di

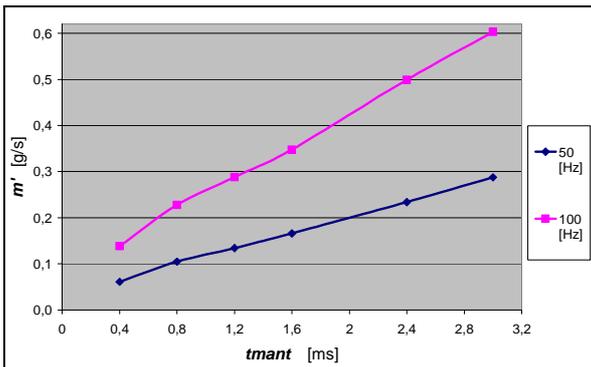


Fig.6 portata media dinamica

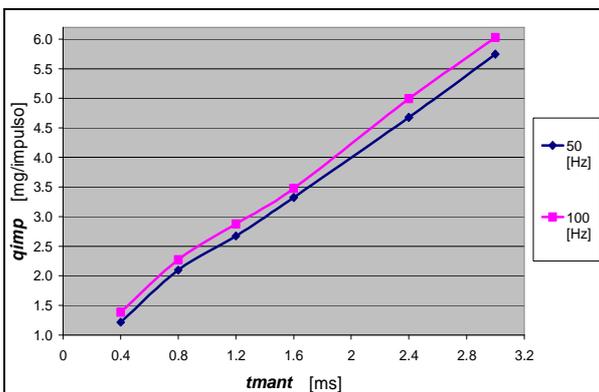


Fig.7 portata ad impulso

alimentazione a 80 bar e variando il tempo di mantenimento. Misurando la massa totale del combustibile P e conoscendo la frequenza di pilotaggio, si possono calcolare: la portata media dinamica \dot{m} e la portata a impulso q_{imp} , definite nella normativa SAE J-1832. I risultati sono sintetizzati nei grafici di figura 6 e 7. Le figure mostrano una sufficiente linearità della portata anche variando la frequenza di pilotaggio dell'iniettore. I risultati della sperimentazione eseguita hanno permesso di convalidare l'adeguatezza dell'iniettore, sia a livello di caratteristiche geometriche dello spray, sia a livello di portata del combustibile.

4. Montaggio al banco prova

Si è eseguito il montaggio del motore al banco prova e il suo collegamento al freno. Per quest'ultimo, a causa della bassa velocità dell'albero di uscita dal carter motore rispetto a quella necessaria per un corretto funzionamento del freno a correnti parassite, è stato realizzato un sistema corona-pignone visibile in *figura 8*. Si è valutato che l'intera trasmissione (sistema variatore con cinghia elastica del motore più sistema corona-pignone) abbia un rendimento del 75%. Si è provveduto poi al cablaggio elettrico, all'allestimento del sistema di alimentazione benzina ad alta pressione, di derivazione automobilistica, come schematizzato *figura 9*, nonché al posizionamento del sistema di acquisizione dati, di tutti i sensori e della sonda per il rilievo degli inquinanti, come schematizzato in *figura 10*.

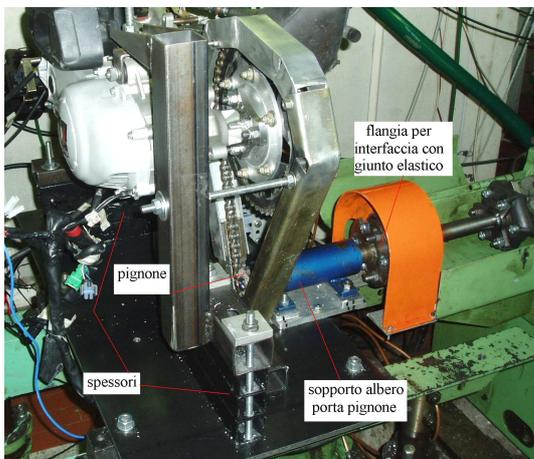


Fig.8 Vista del collegamento motore-freno

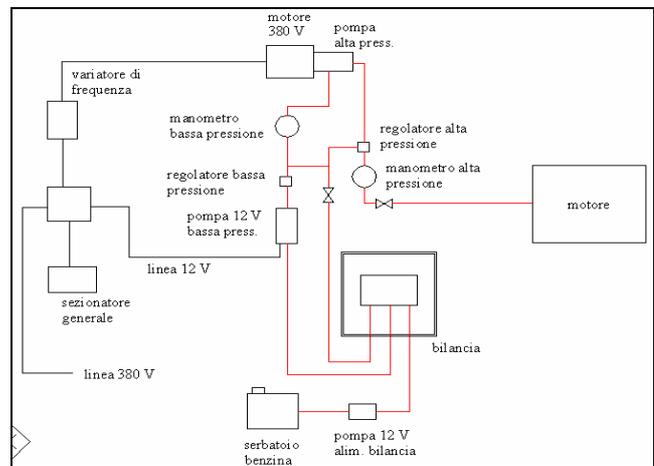


Fig.9 impianto alimentazione benzina

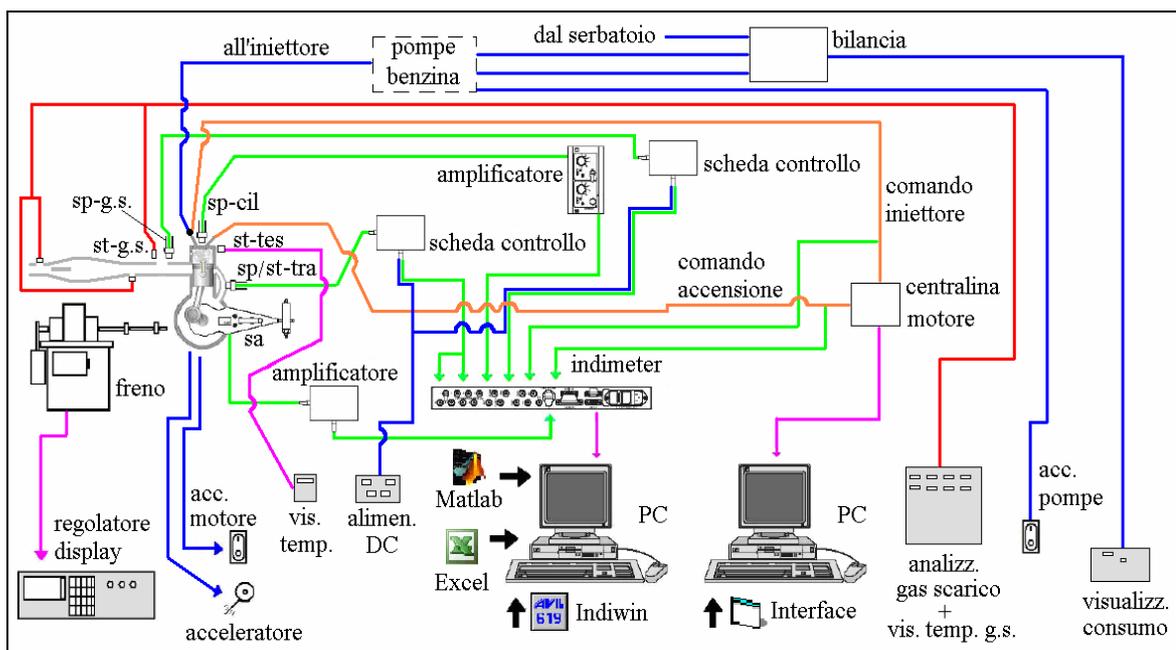


Fig.10 Schema della strumentazione adottata per le prove al banco, dove *sa* = sensore angolare albero motore, *sp-cil* = trasd. di press. cilindro, *sp-g.s.* = trasd. di press. gas di scarico, *sp/st-tra* = trasd. di press. / di temp. travaso, *st-tes* = trasd. di temper. testa, *st-g.s.* = trasd. di temper. gas di scarico

5. Ottimizzazione del motore al banco

È stata eseguita una serie di prove preliminari, a diversi regimi di rotazione e carichi, per ottimizzare i diversi parametri di controllo in gioco (rapporto di compressione, pressione di iniezione, pilotaggio dell'iniettore, sistema di accensione ecc.), allo scopo di ottenere elevata potenza a pieno carico, nonché bassi consumi e basse emissioni inquinanti in tutto il campo di funzionamento del motore. I parametri acquisiti durante le varie prove sono stati: potenza e coppia al freno, consumo medio, pressione dell'aria in corrispondenza del travaso laterale, pressione dei gas di scarico in corrispondenza del collettore di scarico, pressione in camera di combustione, concentrazione degli inquinanti nei gas di scarico, temperatura della testa e nello scarico.

5.1 Scelta del rapporto di compressione ottimale

Il rapporto di compressione è un parametro di fondamentale importanza in quanto agisce in modo diretto sul rendimento del motore e sulle prestazioni ottenibili in termini di potenza e coppia. Nella configurazione iniziale, con rapporto di compressione geometrico 10,87, le prove effettuate, hanno condotto ai risultati illustrati nelle figure 11 e 12. Sono stati provati rapporti di compressione via via crescenti sino al limite della detonazione. Il rapporto di compressione che ha dato i risultati migliori in termini di potenza, emissioni inquinanti e consumi è stato 12,98, ottenuto sia sostituendo la guarnizione della base del cilindro sia operando una leggera spianatura della parte superiore del cilindro.

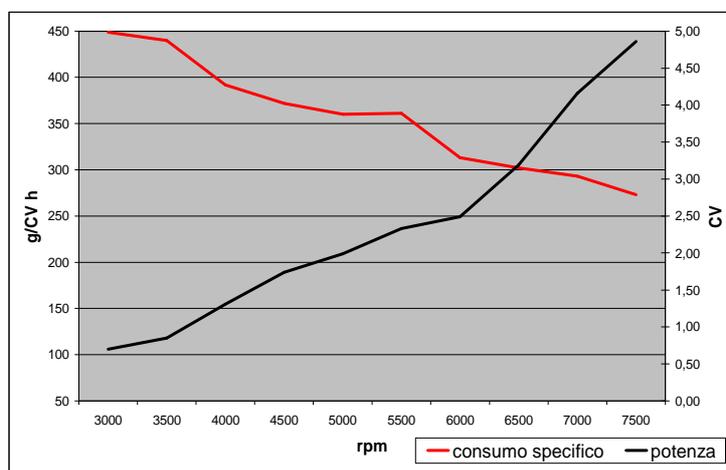


Fig. 11 potenza e consumo specifico della configurazione originale

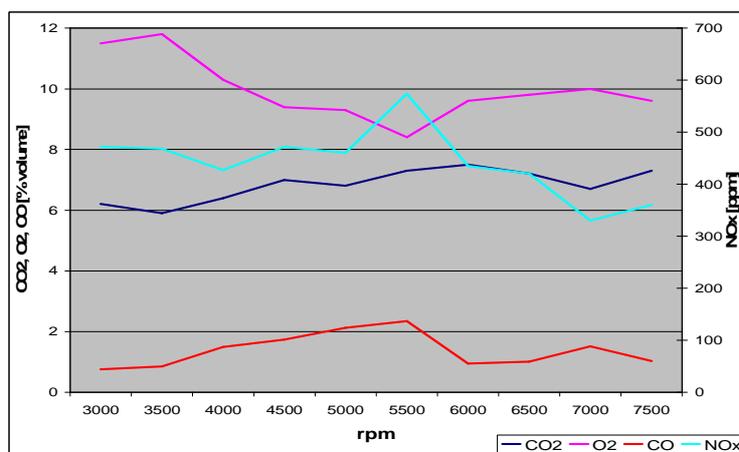


Fig. 12 andamento degli inquinanti

5.2 Ottimizzazione dell'accensione

Fissato il rapporto di compressione, il passo successivo è stata l'ottimizzazione dell'accensione. Il prototipo è dotato di un sistema di innesco di tipo induttivo, capace di fornire un'energia maggiore, a parità di voltaggio, di un comune sistema capacitivo. Avendo una fase di scarica luminosa prolungata, esso necessita di una candela con bassa resistenza interna, per non limitare quest'ultima fase, caratterizzata da bassa potenza, ma relativamente lunga durata. La candela originale del *PUREjet* ha una resistenza interna di $1M\Omega$, eccessiva rispetto alle citate esigenze. Pertanto si è provveduto a modificarla portandone la resistenza a $600k\Omega$ ed a 2Ω . Successivamente si sono eseguite prove anche con una candela di resistenza $5k\Omega$ ma con elettrodi in platino-iridio di forma cuneiforme al fine di sfruttare il principio di concentrazione delle cariche. I risultati vengono riportati nelle *figure 13 e 14*.

Si noti come l'impiego della candela con gli elettrodi di platino dia i migliori risultati sia a livello prestazionale sia nel contenimento degli incombusti allo scarico.

5.3 Scelta della pressione di alimentazione

Grazie alla flessibilità consentita dall'impianto di alimentazione combustibile, *figura 9*, è stato possibile eseguire prove atte a determinare la pressione di alimentazione più favorevole; la pressione di alimentazione influisce in maniera diretta sulla qualità del getto, in particolare, pressioni di iniezione maggiori determinano uno spray

maggiormente polverizzato e penetrante. Le prove sono state eseguite con quattro diverse pressioni: 80, 85, 90 e 100 bar. Non si è andato oltre i 100 bar sia perché l'iniettore sopporta una pressione massima di 110 bar, sia perché è attualmente in fase di realizzazione una pompa meccanica, da applicare al motore, con pressione massima di 100 bar. I grafici della potenza sono riportati in *figura 15* dove si nota come, incrementando la pressione, le prestazioni migliorano.

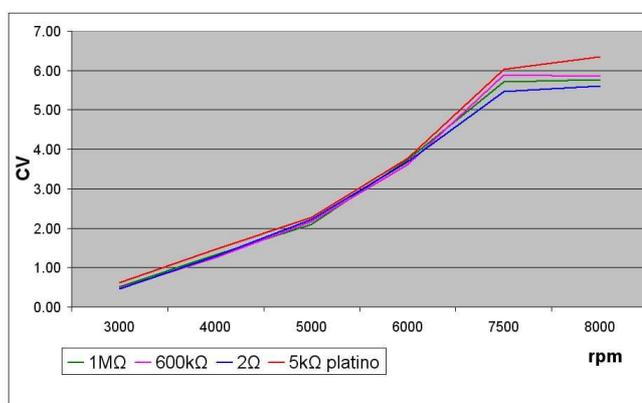


Fig. 13 andamento della potenza al variare della candela

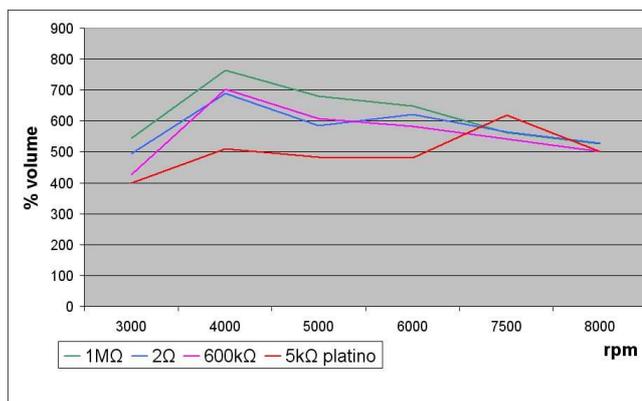


Fig. 14 andamento degli HC al variare della candela

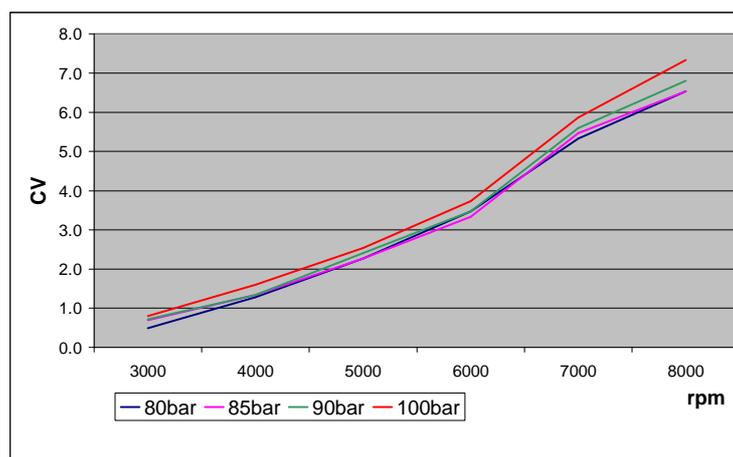


Fig. 15 andamento della potenza

5.4 Ottimizzazione dell'iniettore e del sistema di pilotaggio

Durante le prove eseguite ad alte velocità di rotazione (oltre i 7000 giri/min) e a pressioni di iniezione elevate (oltre i 90 bar), ci siamo resi conto che il sistema di iniezione non rispondeva in modo appropriato agli aumenti di

pressione. Indagando in modo approfondito, si è scoperto che la centralina non era capace di fornire la necessaria energia per l'apertura corretta dell'iniettore ad alte pressioni ed alte frequenze. Una prima modifica è stata apportata dal costruttore della centralina stessa, modificando opportunamente l'hardware in modo da fornire una quantità di energia sufficiente per il corretto pilotaggio. Giunti a questa evoluzione e non notando miglioramenti sensibili alle alte

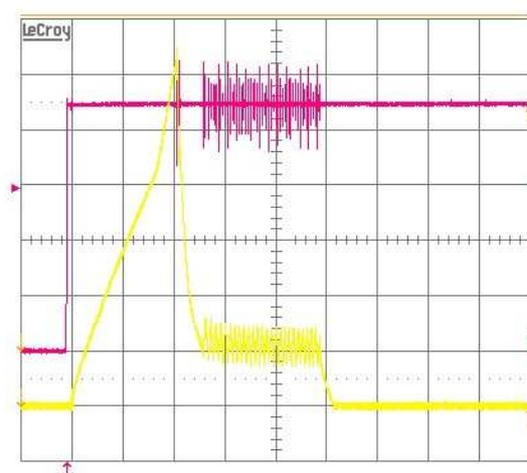


Fig. 16 pilotaggio dell'iniettore

frequenze, abbiamo esteso l'indagine anche alle caratteristiche elettriche dell'iniettore, accorgendoci che anche queste non erano appropriate. Dopo un'attenta analisi, si è deciso di sostituire il solenoide originale con uno appositamente realizzato e dotato di caratteristiche elettriche adeguate (più spire e filo di diametro maggiore) alle elevate frequenze e pressioni di lavoro dell'iniettore. Si ricorda infatti che l'iniettore è progettato originariamente per un impiego su motori a 4 tempi di normale produzione, con frequenze di funzionamento notevolmente ridotte rispetto a quelle per noi necessarie.

Il corretto pilotaggio dell'iniettore con il solenoide modificato ha fornito il diagramma di corrente in funzione del tempo riportato in *figura 16*, linea gialla.

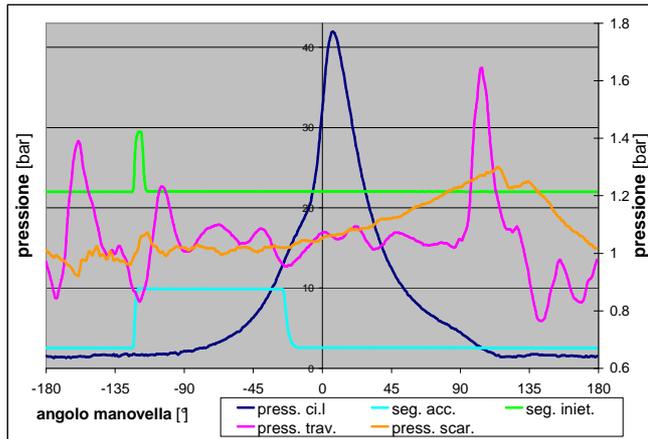


Fig.17 segnali acquisiti ogni grado di manovella

Grazie al sistema di acquisizione dati, è stato possibile monitorare i diversi parametri, come mostrato in *figura 17*. I risultati a pieno e metà carico sono riportati nelle *figure 18 e 19*. A pieno carico la messa a punto è stata dettata dalla necessità di raggiungere un compromesso tra una potenza elevata ed una bassa quantità di inquinanti allo scarico.

7. Conclusione e sviluppi futuri

Lo sviluppo subito dal progetto ha dato buoni risultati dal punto di vista delle prestazioni del motore, soprattutto dal punto di vista degli inquinanti. I livelli di incombusti allo scarico sono un ordine di grandezza inferiore rispetto ad un motore funzionante con miscela precarburata. Ottimi sono stati anche i risultati relativi alla stratificazione della carica, in quando si riesce ad ottenere un funzionamento regolare del motore ad ogni carico e velocità con la valvola a farfalla completamente aperta, variando la potenza solo tramite la regolazione quantità di carburante iniettata e dell'anticipo di iniezione.

Nella prossima fase di sviluppo saranno adottati un sistema di pressurizzazione del combustibile (già realizzato) adatto ad essere montato su un veicolo di serie, un nuovo sistema di lubrificazione a comando elettronico (già disponibile presso la Dell'Orto S.p.A.), costituito da una pompa volumetrica controllata in frequenza in modo da minimizzare il consumo di olio, ed infine sarà valutata l'opportunità o meno di adottare un comando della valvola in aspirazione (meccanico o elettronico) per ottimizzare le temperature allo scarico permettendo così il corretto funzionamento di un eventuale catalizzatore ossidante.

6. Valutazione delle prestazioni

Dopo aver eseguito l'ottimizzazione di tutti i parametri, è stata effettuata una serie di prove a diversi carichi e regimi, atte a fornire una mappatura di massima delle prestazioni del motore. Durante le prove si sono ottimizzati i parametri motoristici quali anticipo di accensione e iniezione, oltre al tempo di mantenimento dell'iniezione, tempo da cui dipende la quantità di carburante

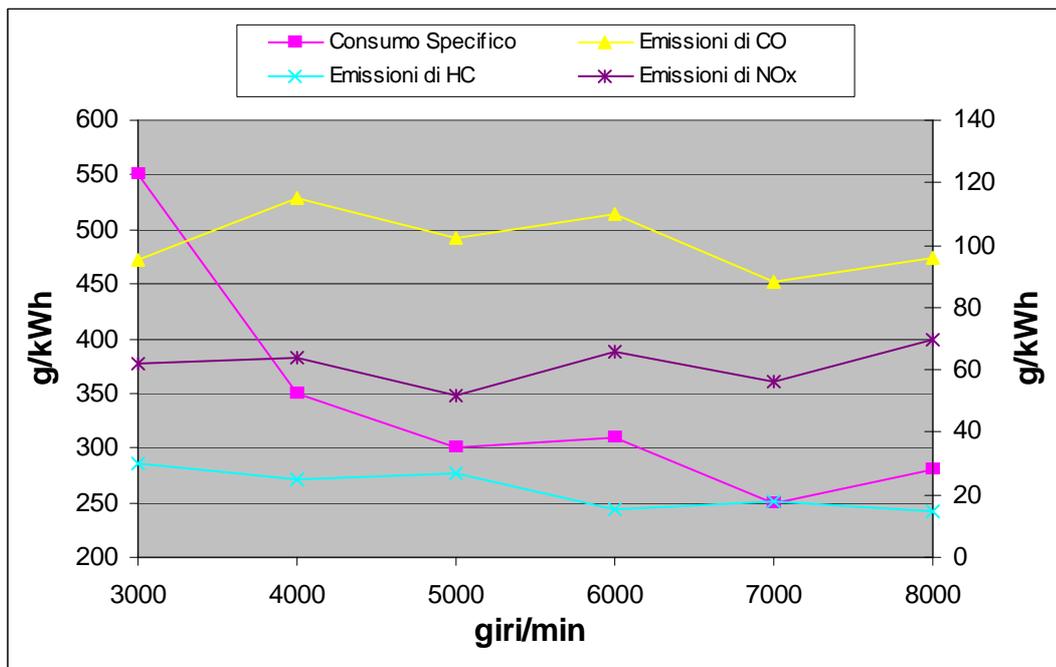


Fig.18 Prestazioni del motore a pieno carico

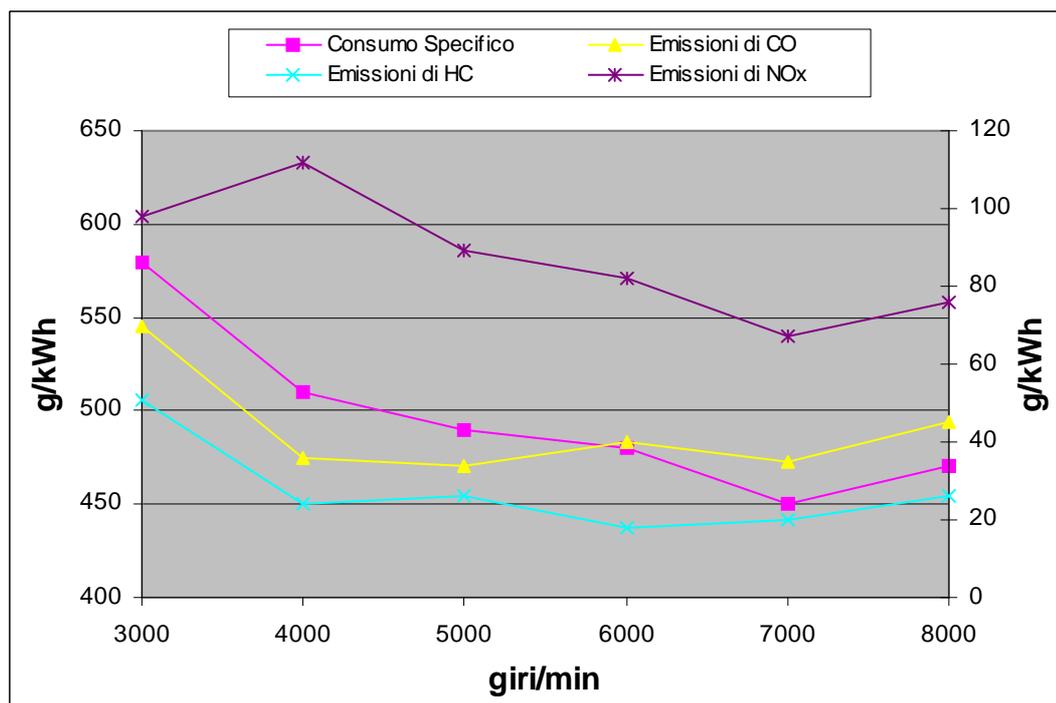


Fig.19 Prestazioni del motore a mezzo carico