

**Relazione scientifica finale del programma Short Term Mobility 2017 svolto
dal dr. ing. Luigi Sequino (IM-CNR) presso CMT – Motores Térmicos Universitat
Politécnica de València, Valencia (Spagna)**

Introduzione

I motori a combustione interna hanno un ruolo fondamentale nella società moderna come sistemi di propulsione per il trasporto e di produzione di energia. Di conseguenza sono tra i primi responsabili dell'inquinamento atmosferico. Per questa ragione, data la loro larga diffusione, anche un piccolo miglioramento nel controllo della combustione può avere un notevole impatto sulla riduzione globale di emissioni inquinanti.

L'Istituto Motori del CNR di Napoli si occupa di questa problematica con un approccio globale, mediante la ricerca su sistemi di propulsione innovativi, controllo ed ottimizzazione dei sistemi attuali e caratterizzazione delle emissioni inquinanti.

L'ing. Luigi Sequino, ricercatore T.D. presso l'Istituto Motori del CNR di Napoli, è risultato vincitore di una borsa Short Term Mobility (STM) 2017 del CNR, nell'ambito della quale ha svolto un soggiorno di 21 giorni presso CMT – Motores Térmicos Universitat Politècnica de València (d'ora in avanti indicato solo come CMT). Tale periodo di soggiorno è stato svolto dal 13 gennaio 2018 al 3 febbraio 2018.

Il CMT è un centro di ricerca e istruzione, fondato nel 1979, coinvolto nello sviluppo dei futuri sistemi di propulsione e comprende più di 100 persone tra professori, ricercatori, studenti di dottorato, tecnici e amministrativi. Il supervisore nell'ambito del programma STM è stato il professor Josè Vicente Pastor, coordinatore del gruppo di ricerca sulle diagnostiche ottiche. Tale gruppo collabora con diversi centri di ricerca internazionali, come ad esempio i laboratori nazionali Sandia (SNL) negli Stati Uniti, l'istituto francese del petrolio e nuove energie (IFPen) e l'università di Lund in Svezia, punti di riferimento nel campo della ricerca e lo sviluppo di tecnologie innovative per i motori a combustione interna.

Il soggiorno presso i laboratori della struttura ospitante e l'interazione con i ricercatori del CMT hanno permesso allo scrivente di approfondire conoscenze tecniche implicite attraverso la partecipazione attiva a test in laboratorio e di avviare una collaborazione Istituto Motori – CMT su un'attività di ricerca riguardo strategie di combustione innovative, denominate RCCI (Reactive Charge Compression Ignition).

Descrizione attività

La strategia di iniezione dual-fuel, nota anche come RCCI, sta riscuotendo un grande interesse scientifico [1]. Essa consiste nell'iniezione di un combustibile a bassa reattività nel collettore di aspirazione (iniezione indiretta) e di un combustibile ad alta reattività direttamente in camera di combustione [2]. La strategia RCCI garantisce un miglior miscelamento aria-combustibile [3] che permette di abbassare entrambe le emissioni di NO_x e Soot, principali prodotti della combustione nei motori ad accensione per compressione. Questo tipo di strategia ha dimostrato di avere un grande potenziale tra le varie strategie LTC (Low Temperature Combustion) come la HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) e le PPC (Partially Premixed Combustion) [4, 5]. Nonostante ciò, le grandi qualità di autoaccensione del gasolio

(comunemente denominato diesel) non favorisco un facile controllo della combustione. L'utilizzo di un'iniezione indiretta di benzina per aumentare il ritardo all'accensione senza ricorrere ad alti livelli di ricircolo di gas di scarico si è dimostrato essere una buona soluzione da adottare. Ma la benzina ha problemi di accendibilità a basso carico a causa della sua bassa reattività. A tal proposito sono stati sviluppati dei sistemi di accensione assistita. Il più comune è certamente l'utilizzo di una candela, in cui si genera plasma attraverso un arco elettrico tra due elettrodi. Studi recenti su sistemi di accensione assistita da plasma laser hanno permesso di comprendere meglio i fenomeni di ionizzazione e scissione di molecole di gas indotte da un fascio laser [6, 7]. Focalizzando il laser sul gas, è possibile superare la soglia di energia necessaria per la usa auto accensione. Tale sistema di accensione può essere utile per lo sviluppo di nuove strategie di combustione RCCI per superare le problematiche relative al controllo della combustione.

Un altro modo per controllare la combustione senza ricorrere a sistemi di accensione assistita consiste nell'utilizzare una miscela di due combustibili a diversa reattività. La regolazione del ritardo all'accensione, in questo caso, avviene mediante variazione della concentrazione relativa dei due combustibili [8]. Un esempio è una miscela di diesel-benzina, denominata *dieselina*.

Nell'ottica di future attività di ricerca su questi temi all'interno dell'Istituto Motori di Napoli, il progetto STM2017 ha riguardato l'investigazione di sistemi di accensione assistita con plasma indotto mediante laser e l'utilizzo di *dieselina* in motori ad accensione per compressione. L'attività è articolata in due punti:

1. Partecipazione a test di laboratorio per lo studio della combustione di un getto di *dieselina* con plasma indotto da laser mediante diagnostiche ottiche.
2. Pianificazione di un'attività di ricerca sperimentale in collaborazione tra Istituto Motori – CMT per lo studio della combustione RCCI con iniezione indiretta di benzina e iniezione diretta di *dieselina* in un motore light-duty reale (CMT) e otticamente accessibile (Istituto Motori).

Combustione di un getto di combustibile con accensione assistita da plasma indotto da laser

L'obiettivo principale di questa campagna sperimentale è la comprensione del processo di combustione in funzione delle condizioni locali nel punto di accensione. L'accensione assistita mediante plasma indotto da laser garantisce i necessari gradi di libertà per la scelta dell'istante temporale e posizione spaziale sul getto di combustibile. Inoltre, la concentrazione dei combustibili ad alta e bassa reattività è stata variata e tutte le condizioni sono state confrontate con il caso di riferimento con auto-accensione.

In figura 1 si riporta un esempio del motore 2 tempi utilizzato in CMT.

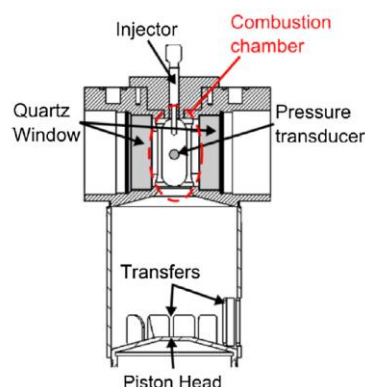


Figura 1. Schema del motore 2t ad accesso ottico presso CMT [9].

Il motore ha una cilindrata di 3 litri, questo garantisce l'accesso ottico attraverso quattro finestre di quarzo montate sui lati della testata. È possibile regolare indipendentemente la pressione, la temperatura e la composizione dei gas nel cilindro, il che permette di riprodurre una vasta gamma di condizioni termodinamiche. Maggiori specifiche sul motore utilizzato in questi test sono riportate in [9].

I test hanno riguardato l'applicazione di più diagnostiche ottiche in simultanea. Sono state eseguite misure di estinzione *Laser Extinction Imaging (LEI)*, per la misura quantitativa della frazione volumetrica di soot (led ON). Al contrario, quando il led è spento (led OFF), l'immagine della luminosità naturale di fiamma, sdoppiata dal *beam splitter*, è stata registrata dalle due telecamere con filtri a lunghezze d'onda differenti al fine di applicare la tecnica della pirometria a due colori, per la valutazione della temperatura di fiamma. Infine la concentrazione del radical OH, indice dell'inizio delle reazioni di combustione a bassa temperatura, è stata visualizzata utilizzando la tecnica della chemiluminescenza con una telecamera intensificata ed un filtro a 310 nm. Durante i test con accensione assistita, un raggio laser a 1064 nm è concentrato in una regione del getto, mentre è spento durante le prove di riferimento con auto-accensione.

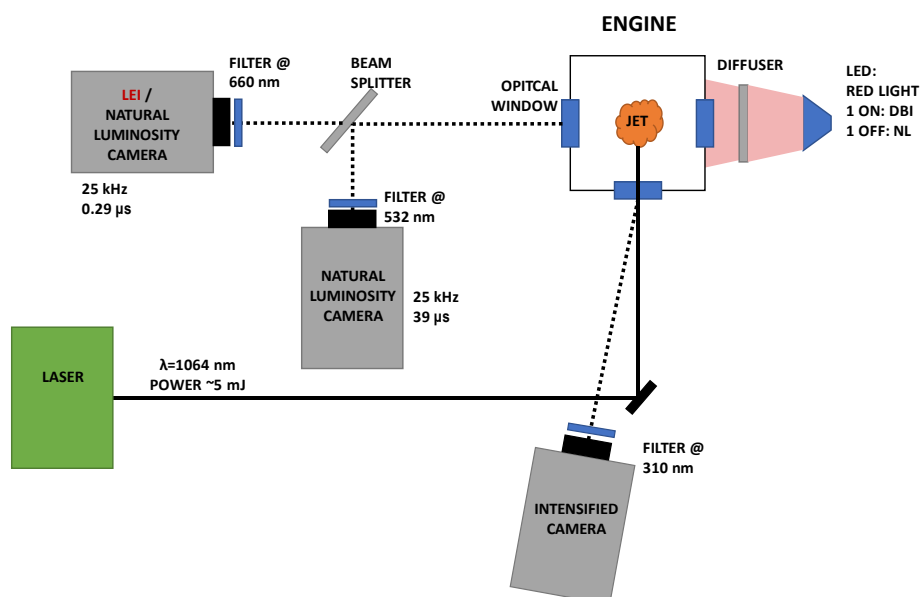


Figura 2. Schema del setup ottico.

I test sono stati eseguiti mantenendo una velocità costante del motore a 500 giri/min ma riproducendo diverse condizioni operative, ottenute variando: la posizione del laser lungo l'asse del getto e l'istante di innesco del laser (tabella 1), la pressione di iniezione combustibile e la qualità della miscela, secondo la tabella 2. Inoltre, per tutte le condizioni, è stato testato anche il caso con laser spento, utilizzato come riferimento.

Tabella 1. Variazione parametri relativi al sistema di accensione laser

		Ritardo laser (tempo dopo inizio energizzazione iniettore) [ms]									
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.4	1.6
Distanza dall'iniettore [mm]	6					x					
	11					x					
	16	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	21					x					
	26					x					

Tabella 2. Variazione parametri relativi al sistema di iniezione

Velocità [giri/min]	Pressione di iniezione [bar]	Miscela [%Diesel-%Benzina]
500	500 / 1000 / 1500	100-0 / 70-30 / 50-50 / 30-70

Poiché i dati raccolti nella campagna di prove seguita nel corso del programma STM2017 fanno parte di una tesi di dottorato in corso, a titolo di esempio si riportano in figura 3 delle immagini relative alle sole visualizzazioni della luminosità naturale di fiamma, utilizzate per la valutazione del soot. Le immagini si riferiscono alle quattro diverse miscele testate ad un tempo di 5800 μ s dopo l'inizio dell'iniezione, con il getto che evolve da sinistra verso destra. Si può notare come la concentrazione di soot (vedere scala di colori) diminuisca all'aumentare della concentrazione di benzina nella miscela.

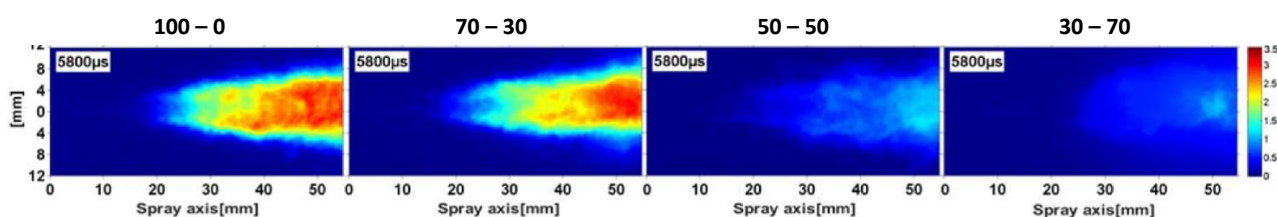


Figura 3. Valutazione della distribuzione di soot a partire da immagini di luminosità naturale di fiamma per quattro diverse miscele.

Modalità di combustione RCCI con dieselina in un motore light-duty reale e otticamente accessibile

Il principale obiettivo del programma STM2017 è stato quello di avviare una collaborazione con il CMT su uno dei temi di ricerca previsti a medio termine nelle linee guida dell'Istituto Motori. Noto il crescente interesse per la modalità di combustione dual-fuel, come anticipato nell'introduzione, ed in particolare per l'utilizzo di combustibili a bassa reattività, come la benzina, in un motore ad accensione per compressione, si è avviata un'attività di ricerca su un motore light-duty reale, presente nei laboratori del CMT, e otticamente accessibile, nei laboratori dell'Istituto Motori (IM-CNR). L'attività è stata possibile innanzitutto grazie alla disponibilità di allestimenti simili.

Apparato sperimentale

Il motore in esame è un quattro cilindri in linea ad accensione per compressione, 1.9 litri di cilindrata, 4 tempi, con sistema di iniezione diretta common rail. Le specifiche dei due motori sono riportate in tabella 3. Come è possibile osservare, sono presenti solo alcune differenze nella cilindrata e nel rapporto di compressione che possono essere compensate regolando la portata e pressione dell'aria aspirata.

Tabella 3. Caratteristiche motori

	Motore reale (CMT)	Motore ottico (IM-CNR)
Cilindrata [cm ³]	477	522
Corsa [mm]	90.4	92
Alesaggio [mm]	82	85
Rapporto di compressione [-]	17.1:1	16.5:1
Sistema di iniezione	Common rail, 7 fori da 0.141 mm, apertura 148°	

Nelle figure 4 e 5 vengono mostrati i due apparati sperimentali per il motore reale e ottico, rispettivamente. Entrambi i sistemi comprendono un riscaldatore e deumidificatore per l'aria aspirata, un misuratore di portata, uno smorzatore di oscillazioni di pressione, un sistema di ricircolo dei gas di scarico (EGR) e una valvola di contropressione allo scarico.

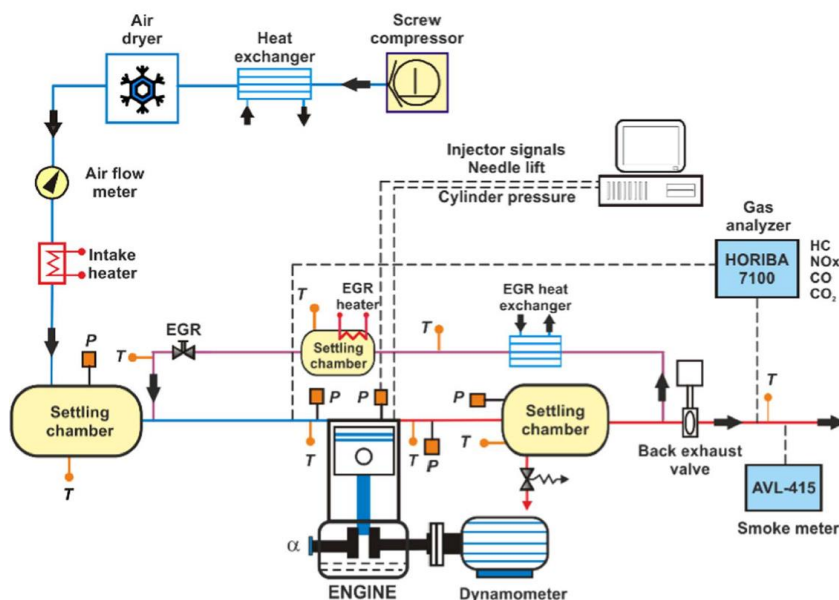


Figura 4. Apparato sperimentale motore reale (CMT).

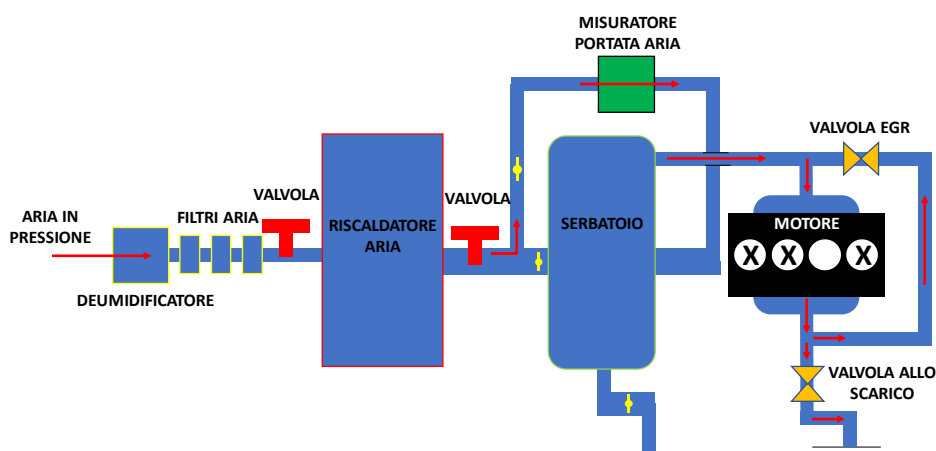


Figura 5. Apparato sperimentale motore ottico (IM-CNR).

La figura 6 evidenzia la particolarità e la struttura del motore ad accesso ottico. La foto a sinistra mostra la testata reale (lato scarico) montata su un sistema monocilindrico allungato con il vano per l'alloggiamento dello specchio a 45°. Nella figura di destra è riportato un disegno 3d del pistone allungato, della finestra ottica e dell'iniettore. Nel riquadro è riportato un esempio della vista dal basso con una porzione delle valvole di aspirazione e scarico.

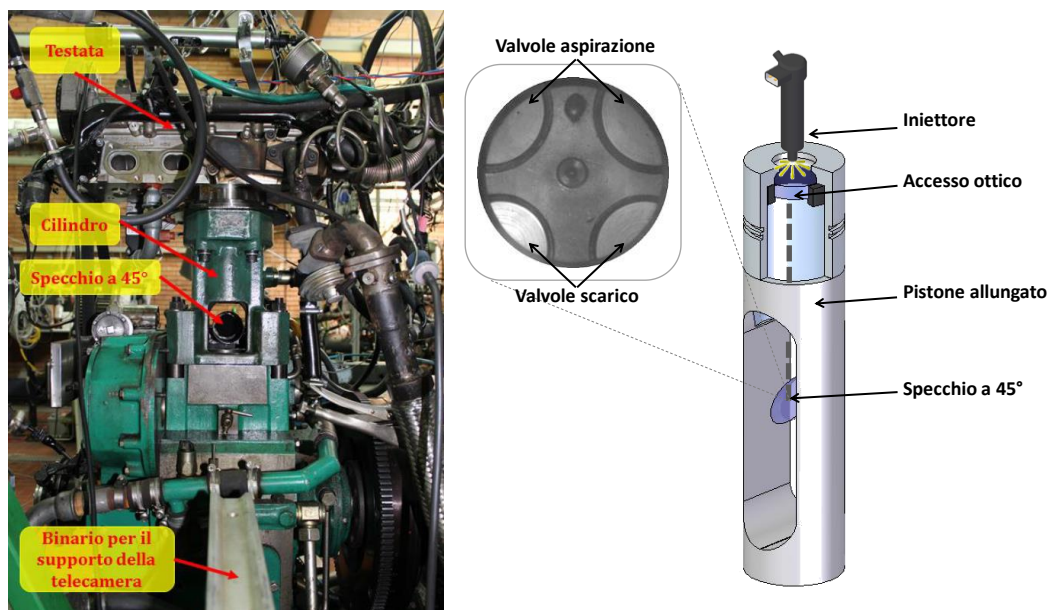


Figura 6. Componenti del motore ad accesso ottico (IM-CNR).

Al fine di eseguire test in modalità dual-fuel, ossia con iniezione indiretta nel collettore di aspirazione e iniezione diretta nel cilindro, in Istituto Motori si sta già procedendo alla modifica del collettore di aspirazione per la creazione di un vano per alloggiare l'iniettore per iniezione indiretta di benzina. Figura 7 mostra lo stato di avanzamento dei lavori, in cui l'iniettore è stato alloggiato nel collettore di aspirazione e incollato a tenuta. Successivamente si procederà al controllo elettronico e la misura della quantità iniettata.

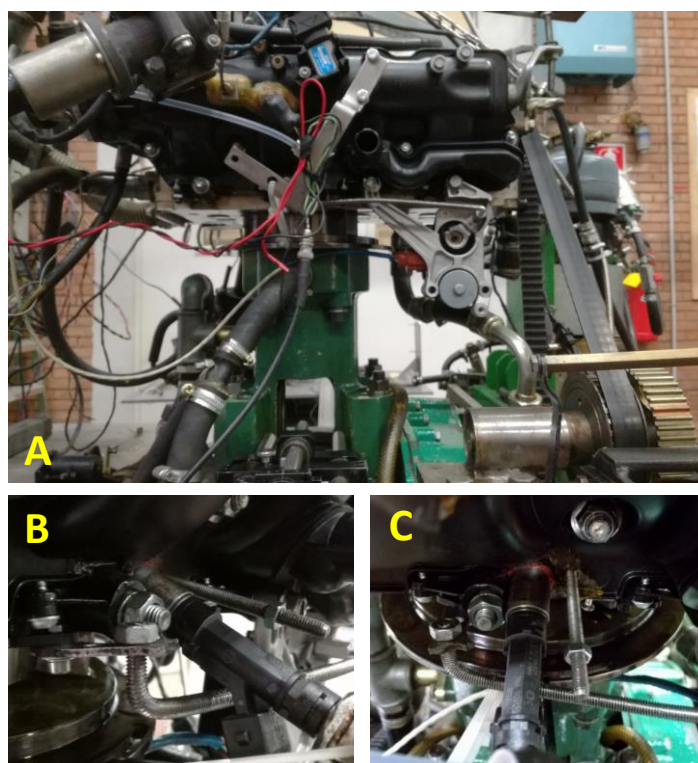


Figura 7. Allestimento motore ad accesso ottico per l'iniezione indiretta di benzina. A: motore lato aspirazione, collettore di aspirazione (ca). B: Vista laterale dell'iniettore alloggiato nel ca. C: Vista dall'alto dell'iniettore alloggiato nel ca.

Condizioni operative

Sul motore reale è stata eseguita una mappatura completa come riportato in figura 8 [10]. Per l'investigazione sul motore otticamente accessibile sono stati selezionati due punti motore del limite inferiore della mappa (riquadri in rosso in figura 8): a 1500 giri/min e 2 bar di IMEP (*Indicated Mean Effective Pressure*) e a 2000 giri/min e 3 bar di IMEP. Tali punti sono stati selezionati poiché la zona inferiore della mappa è limitata da fenomeni di *misfire*, mancata accensione, che sono interessanti da investigare mediante diagnostiche ottiche. Allo stesso tempo, i limiti operativi del motore ad accesso ottico richiedono condizioni operative con pressioni di picco inferiori a 90 bar, come nel caso dei due punti motore scelti.

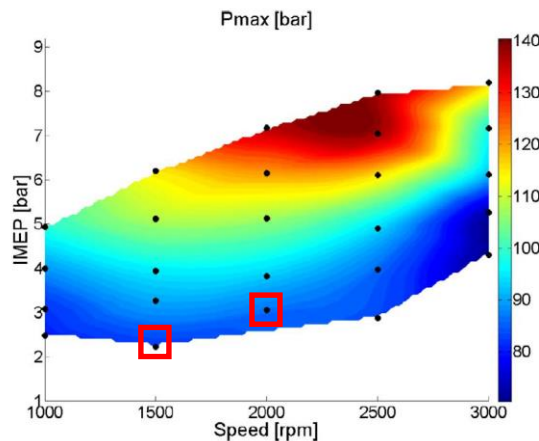


Figura 8. Mappa del motore reale, valori di pressione di picco nel cilindro. Nei riquadri, i punti motore per cui eseguire l'indagine ottica.

I test da eseguire nel motore ad accesso ottico consistono nell'iniezione indiretta di benzina nel collettore di aspirazione (vedi figura 7) mentre due diversi combustibili saranno usati per l'iniezione diretta: 100% diesel, utilizzato come caso di riferimento, e una miscela in volume al 50% diesel e 50% benzina (*dieselina*).

Le diagnostiche ottiche da applicare consistono della visualizzazione della luminosità naturale di fiamma con telecamera ad alta velocità e sensibilità nello spettro del visibile e chemiluminescenza nell'ultravioletto con telecamera intensificata a bassa velocità (una immagine per ciclo di combustione) con un filtro passabanda a 310 nm per il rilievo del radicale OH (indice di reazioni a bassa temperatura).

Analisi preliminare sul rilascio del calore

Al fine di riprodurre in modo affidabile in Istituto Motori i risultati ottenuti presso il CMT, è stato necessario innanzitutto confrontare le metodologie di analisi dei dati acquisiti. La curva di rilascio del calore, ROHR (*Rate Of Heat Release*) è fondamentale per conoscere l'istante di inizio, fine, durata e baricentro della combustione e il picco di calore rilasciato. In CMT questa elaborazione è eseguita da un software interno chiamato CALMEC. Per le quattro condizioni operative scelte, le curve di ROHR ottenute da CALMEC in CMT sono perciò state ricalcolate con il metodo utilizzato in Istituto Motori e confrontate tra loro. Come si può osservare in figura 9, i due metodi sono equivalenti. Si può quindi affermare che i dati che saranno raccolti presso l'Istituto Motori saranno elaborati allo stesso modo di quelli in CMT.

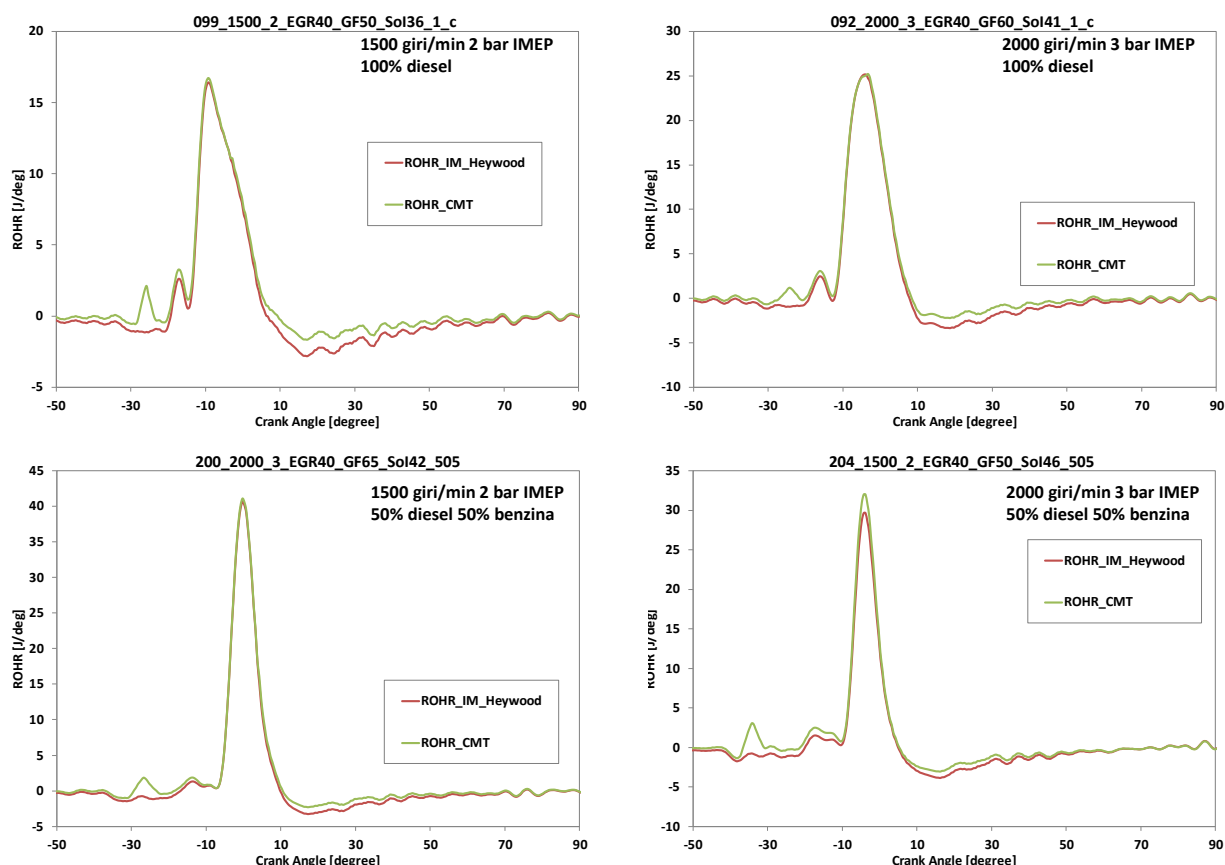


Figura 9. Confronto curve di rilascio del calore (ROHR) calcolate col metodo CMT e IM-CNR per le quattro condizioni operative da testare.

In seguito, si procederà alla messa in funzione del sistema di iniezione indiretta, formazione delle miscele e verifica sistema di iniezione diretta, setup motore e allestimento per applicazione di diagnostiche ottiche.

Conclusioni

Il programma STM si è dimostrato un ottimo strumento per gli enti di ricerca per aumentare la qualità della ricerca e le competenze dei proprio ricercatori. Le attività svolte durante il programma STM2017 dall'ing. Luigi Sequino presso CMT – Motores Térmicos Universitat Politècnica de València gli hanno permesso di entrare in contatto con un ambiente di ricerca internazionale, dinamico e di alto livello qualitativo. Di approfondire conoscenza utili per le future attività di ricerca in Istituto Motori. E di avviare una collaborazione a livello internazionale atta alla produzione di pubblicazioni scientifiche.

Bibliografia

1. Kokjohn SL, Hanson RM, Splitter DA, Reitz RD. Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): a pathway to controlled high-efficiency clean combustion. Int J Engine Res June 2011; 12:209–26.
2. Benajes J, García A, Monsalve-Serrano J, Balloul I, Pradel G. Evaluating the reactivity controlled compression ignition operating range limits in a high-compression ratio medium-duty diesel engine fueled with biodiesel and ethanol. Int J Engine Res 2017;18(1–2):66–80.

3. Park S, Shin D, Park J. Effect of ethanol fraction on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether-ethanol dual-fuel reactivity controlled compression ignition engine. *Appl Energy* November 2016; 182:243–52.
4. Shi L, Deng K, Cui Y, Qu S, Hu W. Study on knocking combustion in a diesel HCCI engine with fuel injection in negative valve overlap. *Fuel* April 2013; 106:478–83.
5. Jain A, Singh A, Agarwal A. Effect of fuel injection parameters on combustion stability and emissions of a mineral diesel fueled partially premixed charge compression ignition (PCCI) engine. *Appl Energy* March 2017;190(15):658–69.
6. Raizer PY. Heating of a gas by a powerful light pulse. *Sov Phys JETP* 1965;17. p. 21:1009.
7. Lee J, Knystautas R. Laser spark ignition of chemical reactive gases. *AIAA J* 1969;7. p. 7:312.
8. Li J, Yang W, Goh T, An H, Maghbouli A. Study on RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine by means of statistical experimental design. *Energy* 2014; 78:777–87.
9. Pastor, José V., et al. "Effect of laser induced plasma ignition timing and location on Diesel spray combustion." *Energy conversion and management* 133 (2017): 41-55.
10. Benajes, Jesús, et al. "Exploring the limits of the reactivity controlled compression ignition combustion concept in a light-duty diesel engine and the influence of the direct-injected fuel properties." *Energy Conversion and Management* 157 (2018): 277-287.