UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI LECCE

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione

CREA – Centro Ricerche Energie ed Ambiente

TESI DI DOTTORATO

in Sistemi Energetici ed Ambiente

XVI Ciclo

INFLUENZA DELLA DISTRIBUZIONE DEL COMBUSTIBILE AI FINI DELLA OTTIMIZZAZIONE DEI FENOMENI DI COMBUSTIONE NEI MOTORI ALTERNATIVI

Tutor

Ch.mo Prof. Domenico LAFORGIA

Ch.mo Prof. Antonio FICARELLA

Ch.mo Prof. Dimitrios KYRITSIS

Coordinatore

Ch.mo Prof. Saverio MONGELLI

Dottorando

Ing. Antonio Paolo CARLUCCI

Anno Accademico 2003/2004

Sommario

Introduzione ____ *1*

Capitolo 1 : Stato dell'arte e finalità del presente lavoro ____ *4*

1.1 Iniezione singola ____ 5
1.2 Iniezione doppia ____ 12
1.3 Iniezioni multiple ____ 24
1.4 Finalità del presente lavoro ____ 29

Introduzione

L'utilizzo del sistema di iniezione ad alta pressione common rail a controllo elettronico sui motori Diesel ad iniezione diretta, ed in particolare nella versione sovralimentata, ha permesso una forte diminuzione dei consumi specifici ed un incremento delle potenze specifiche che, insieme, hanno quasi del tutto soppiantato il vecchio motore Diesel a precamera.

Il sistema di iniezione Common Rail, in particolare, permette la regolazione della pressione di iniezione del gasolio, indipendentemente dal regime di rotazione del motore stesso. Tale versatilità, abbinata alle potenzialità degli elettroiniettori, ha dato un forte contributo alla diminuzione dei consumi specifici e, soprattutto, all'abbattimento delle emissioni di particolato, problema, questo, che penalizzava il motore ad accensione per compressione rispetto al motore ad accensione comandata.

La sempre maggiore attenzione che i Governi prestano ai problemi ambientali ha portato, negli ultimi anni, ad una regolamentazione delle emissioni inquinanti e dei consumi specifici riguardanti i motori a combustione interna per autotrazione. I limiti correntemente in vigore, ma soprattutto quelli che si prevede entreranno in vigore negli anni a venire, richiedono alla ricerca un sforzo continuo, al fine, da una parte, di perfezionare ulteriormente i classici motori a combustione interna, dall'altra, di trovare fonti alternative di energia che, a lungo termine, permettano di rimpiazzare adeguatamente i motori oggi disponibili.

Negli ultimi anni, nell'ambito dei motori ad accensione per compressione, sono stati adottati particolari accorgimenti costruttivi che ne hanno permesso un sostanziale

miglioramento delle prestazioni e dell'impatto ambientale. Pertanto, al già citato sistema di iniezione common rail, si devono aggiungere la valvola EGR, che permette di ricircolare parte dei gas di scarico nel collettore di aspirazione, l'iniezione pilota, consistente in una piccola quantità di combustibile (generalmente non più del 10% della quantità di combustibile per ciclo) iniettata poco prima della cosiddetta iniezione principale, e particolari espedienti in fase di design, riguardanti ad esempio la razionale sagomatura sia dei condotti di aspirazione e di scarico che della camera di combustione, al fine di produrre all'interno di quest'ultima un più intimo mescolamento tra aria e combustibile.

Tuttavia, per soddisfare i limiti imposti dalla normativa futura, si rendono necessari ulteriori approfondimenti di ricerca volti, come già sottolineato, a migliorare l'impatto ambientale dei motori stessi. Le vie per ottenere un tale risultato sono generalmente due: la prima consiste nell'abbattimento delle emissioni inquinanti e dei consumi specifici direttamente all'interno della camera di combustione; la seconda, invece, consiste nell'utilizzare particolari dispositivi, cosiddetti di post-trattamento, che, allo scarico del motore, contribuiscano ad abbassarne i livelli di emissioni.

Il miglioramento della combustione direttamente in camera è particolarmente auspicabile specialmente per i motori ad accensione per compressione in quanto, al momento, non esistono post-trattamenti efficaci per essi. I convertitori catalitici, infatti, non possono ridurre efficacemente gli NO_x come nel caso dei motori benzina in quanto, allo scarico dei Diesel, l' ambiente è ossidante. Le trappole per il particolato, inoltre, presentano problemi tecnologici, legati prevalentemente all'accumulo di materiale carbonioso, che ad oggi ne rendono impossibile l'applicazione commerciale.

Gli studiosi in campo motoristico sottolineano da tempo l'importanza della distribuzione del combustibile all'interno della camera di combustione nell'influenzare i consumi e le emissioni inquinanti.

Nell'ambito dei motori Diesel, un metodo efficace per controllare la distribuzione del combustibile può essere rappresentato dalla modulazione dell'iniezione nel ciclo motore, in termini sia di anticipo che di numero di iniezioni, e l'applicazione di strategie innovative di controllo del ricircolo dei gas di scarico. Si è osservato, infatti, che la gestione del sistema di iniezione gioca un ruolo importante sia

nel processo di ottimizzazione delle prestazioni che in quello di minimizzazione delle emissioni gassose e di particolato. Nei passati venti anni, il sistema di iniezione ha subito un notevole sviluppo tecnologico sia con l'aumento consistente della pressione di iniezione, passando da circa 300 bar dei primi motori ad iniezione diretta degli anni 80 ai 1300 bar degli attuali motori common rail, sia con l'aumento della versatilità di attuazione offerta dagli elettroiniettori, che presentano tempi di apertura e di chiusura tali da permettere più iniezioni all'interno dello stesso ciclo.

Scopo della prima parte dell'attività di dottorato è stata quella di analizzare le potenzialità delle iniezioni multiple, in particolare della doppia e della tripla iniezione, analizzandone l'influenza sullo sviluppo della combustione e gli effetti sui consumi specifici e sulle emissioni inquinanti di un motore Diesel iniezione diretta equipaggiato con il sistema di iniezione common rail.

La seconda parte è stata, invece, dedicata ai risultati preliminari ottenuti nel tentativo di applicare la tecnologia degli elettrospray per controllare la distribuzione del combustibile all'interno della camera di combustione di un motore benzina iniezione diretta.

Capitolo 1 : Stato dell'arte e finalità del presente lavoro

Gli studi sul processo di combustione nei motori ad accensione per compressione sono ancora in atto perché alcuni problemi, in particolare quelli legati al controllo delle emissioni di particolato e di NO_x, sono tuttora irrisolti. Sulla base delle conoscenze acquisite sul processo di combustione si può affermare che i propulsori Diesel offrono indubbi vantaggi in termini energetici, vincendo la sfida con i più avanzati sistemi di conversione dell'energia come le fuel cells. Tuttavia, la loro affermazione sul mercato mondiale è condizionata dalla soluzione del problema che lega il particolato alle emissioni di NO_x in modo inversamente proporzionale. Molti sforzi sono stati fatti allo scopo di capire i fenomeni alla base di tale evidenza sperimentale. Tecniche diagnostiche sempre più sofisticate, abbinate alle simulazioni multidimensionali dei fenomeni termofluidodinamici che avvengono all'interno della camera di combustione, hanno evidenziato che la combustione e la formazione delle specie inquinanti sono fortemente condizionati dalla modulazione dell'iniezione di combustibile nel campo turbolento generato dal sistema di aspirazione e condizionato dalla geometria della camera di combustione [1].

In base alle conoscenze classiche sulla formazione del soot e degli NO_x [1], una combustione poco rumorosa e caratterizzata da bassi livelli di emissioni deve iniziare con la combustione di una piccola quantità di combustibile, in modo da limitare la formazione iniziale di NO_x e di soot; deve essere caratterizzata, durante lo sviluppo intermedio, da un sufficiente mescolamento tra aria e combustibile, in modo da ridurre

la formazione di soot; deve, infine, terminare con un forte mescolamento tra l'aria residua ed i gas prodotti dalla combustione in modo da ossidare il soot e gli HC incombusti [3].

Il raggiungimento di tali obiettivi risulta, tuttavia, un compito arduo se si considera che i motori per autotrazione, normalmente, non funzionano in condizioni stazionarie, bensì sono sottoposti a continui transitori. Ciò fa sì che l'efficacia di un qualunque espediente, atto a ridurre le emissioni inquinanti ed i consumi specifici, debba essere verificata per tutte le condizioni di funzionamento alle quali il motore normalmente opera.

Numerosi lavori compiuti in questo campo hanno da tempo sottolineato la possibilità di controllare lo sviluppo della combustione, nei motori ad accensione per compressione, mediante vari parametri di funzionamento del motore stesso. Tra questi parametri, i più importanti sono la pressione di iniezione del combustibile all'interno della camera di combustione, la modalità secondo la quale il combustibile viene iniettato, in termini di flusso istantaneo e di fasatura dello stesso, la distribuzione spaziale del combustibile seguente l'iniezione ed i moti dell'aria aspirata all'interno della camera di combustione, il ricircolo dei gas di scarico (EGR), la sovralimentazione, gli scambi termici tra prodotti della combustione e struttura del motore.

L'effetto di ogni singolo parametro varia sensibilmente al variare degli altri parametri, così come varia al variare delle condizioni operative del motore. Dato che il presente studio approfondisce maggiormente l'effetto delle iniezioni multiple, è rispetto a questo parametro che l'effetto degli altri sarà di seguito rivisitato.

1.1 Iniezione singola

Nei sistemi di iniezione common rail, la velocità di iniezione del combustibile aumenta velocemente nella fase iniziale, mentre la durata dell'iniezione stessa è variata a seconda della potenza richiesta. La fine dell'iniezione è netta, in modo da ridurre le emissioni di THC e di soot derivanti dal combustibile che penetra in camera nelle fasi finali della combustione, quindi con poco sviluppo di spray [4]. Quando il combustibile è iniettato in camera di combustione mediante una sola iniezione, l'effetto di un incremento della pressione di iniezione è normalmente quello di ridurre il particolato

aumentando però il livello degli NO_x. Una maggiore pressione di iniezione, infatti, fa sì che, a parità di combustibile totale iniettato, la durata dell'iniezione diminuisca, quindi, in particolare più combustibile venga iniettato durante l'intervallo temporale che intercorre tra l'inizio dell'iniezione e l'inizio della combustione. Anche il ritardo di accensione diminuisce all'aumentare della pressione di iniezione, tuttavia il primo effetto prevale su quest'ultimo, risultando così in una combustione premiscelata più intensa, alla quale è direttamente legata la produzione di NO_x, ed una diffusiva meno pronunciata, alla quale è, invece, dovuta la produzione di soot [5]. Questo fenomeno è stato visualizzato anche mediante tecniche di imaging applicate direttamente all'interno della camera di combustione [6], che hanno evidenziato un incremento delle zone "brune", che si crede siano sede di prodotti carboniosi, in corrispondenza di una diminuzione della pressione di iniezione. Badami *et al.* [7] e Lapuerta *et al.* [8] hanno rilevato, in corrispondenza di un incremento della pressione di iniezione, un aumento della potenza massima e del rumore di combustione, ed una diminuzione del particolato e dei consumi specifici. Aumentando la pressione di iniezione, infatti, si riduce la durata della combustione [9] a causa delle maggiori velocità e minori durate dell'iniezione, e ciò comporta un aumento della temperatura in camera durante la combustione ed un incremento dell'efficienza termodinamica. Una maggiore pressione di iniezione produce, quindi, una combustione premiscelata più rapida e, pertanto, maggiori pressione e temperatura sul ciclo; di conseguenza gli NO_x aumentano, mentre variano le velocità di formazione e di ossidazione del soot. Koyanagi *et al.* [10], Chi *et al.* [11], e Bianchi *et al.* [12] hanno osservato che, tramite il sistema di iniezione common rail, un aumento della pressione di iniezione porta sempre ad un incremento della velocità di vaporizzazione delle gocce di combustibile. Aumentando la pressione di iniezione, inoltre, più veloce è la disintegrazione delle stesse a causa delle collisioni e delle interazioni col gas circostante. La ridotta dimensione delle goccioline che ne risulta, quindi, ne facilita e ne accelera il processo di vaporizzazione.

Ai bassi carichi, tuttavia, il comportamento fino ad ora descritto si inverte, ovvero il particolato diminuisce al diminuire della pressione di iniezione. Si ipotizza che ciò sia dovuto alla bassa densità della carica d'aria aspirata, che permette che il combustibile ad alta pressione penetri meglio all'interno della camera durante il ritardo d'accensione. Tale fenomeno, associato al fatto che il ritardo d'accensione è maggiore in corrispondenza dei bassi carichi, produce una miscela fine e troppo magra per

autoaccendersi, a cui generalmente corrisponde una forte produzione di HC. La Soluble Organic Fraction (SOF) del particolato allo scarico di conseguenza aumenta. Il peggioramento della combustione è causato dal fatto che quest'ultima avviene maggiormente in prossimità delle pareti della camera, caratterizzate da una più bassa temperatura. Riducendo la pressione di iniezione, invece, la carica resta concentrata più al centro della camera, e presenta di conseguenza un rapporto aria-combustibile (AFR) tale da autoaccendere prima di raggiungere le pareti del cilindro. Ciò è confermato dal fatto che, al diminuire della pressione, anche i consumi specifici diminuiscono [13].

Anche la fasatura dell'iniezione gioca un ruolo importante riguardo alle emissioni ed alle prestazioni offerte da un motore ad accensione per compressione. Ciò è determinato dal fatto che, variando la fasatura, varia il ritardo di accensione del combustibile. Ritardando l'inizio dell'iniezione verso il PMS, infatti, il combustibile viene iniettato in un ambiente a temperatura e a pressione più elevate. Ne risulta che i fenomeni chimici e fisici che determinano il ritardo di accensione avvengono più rapidamente [14]. Kong *et al.* [6] hanno mostrato, mediante esperimenti basati su tecniche di imaging in camera di combustione, che, ritardando l'inizio dell'iniezione da +15 a +5 DCABTDC, il ritardo di accensione diminuisce e, contemporaneamente, lo spot della fiamma diviene progressivamente meno luminoso. Ciò è classicamente associato ad una diminuzione della fase che brucia in premiscelata, con conseguente diminuzione degli NO_x, e contemporaneamente ad un aumento della combustione diffusiva con conseguente aumento delle particelle carboniose allo scarico.

La possibilità di incrementare la pressione di iniezione, che gli attuali sistemi di iniezione offrono, e la conseguente possibilità di diminuire drasticamente il particolato allo scarico hanno permesso di ritardare l'iniezione in modo da ottenere contemporaneamente un contenimento degli NO_x.

Un altro parametro che permette il controllo delle emissioni allo scarico è l'EGR. Generalmente è stato osservato [14] che, aumentando l'EGR, nel caso di iniezione singola, si ottiene una significativa diminuzione degli NO_x e un aumento del particolato. I consumi tendono, tuttavia, a crescere lievemente. L'EGR riduce gli NO_x in quanto anticipa l'accensione dell'iniezione principale, aumenta la capacità termica della miscela gassosa in camera di combustione ed aumenta la quantità di inerti in camera

abbassando la temperatura adiabatica di fiamma. Tuttavia, tale pratica comporta problemi di abrasione nel condotto di aspirazione e di deterioramento della qualità del lubrificante a causa della presenza del particolato nella frazione di gas ricircolati. Inoltre, l'EGR richiede una pressione di sovralimentazione maggiore perché più aria deve essere aspirata. Il particolato aumenta soprattutto agli alti carichi, a causa della ridotta quantità di ossigeno introdotto in camera di combustione. Ciò e' dannoso, in quanto è agli alti carichi che è maggiormente necessario aumentare l'EGR perché il livello di NO_x allo scarico è maggiore.

Se la portata di EGR non viene raffreddata, la temperatura della carica in aspirazione aumenta diminuendo l'efficienza volumetrica. E' per questo che Chan *et al.* [15] hanno dimostrato l'efficacia del raffreddamento dell'EGR nella riduzione delle emissioni. In primo luogo, la temperatura della carica fresca si abbassa, riducendo la temperatura massima in camera. Inoltre, aumenta il flusso di EGR a causa dell'aumento della densità e maggior calore è richiesto per riscaldare questi gas a causa del maggiore calore specifico. L'ultimo effetto è la diminuzione del picco della temperatura in camera, che porta ad una diminuzione dei livelli degli NO_x. Per ciò che riguarda il soot, la sua diminuzione sembra essere legata ad una maggiore quantità di ossigeno che può essere aspirata, che permette un aumento della velocità di ossidazione.

Nei motori Diesel ad iniezione diretta, il combustibile non è distribuito in modo omogeneo all'interno della camera di combustione. Ciò comporta che nelle zone sede di combustione, in cui la concentrazione di combustibile è prossima al valore stechiometrico, la temperatura di combustione è più elevata così come gli NO_x, ma vi è anche l'esistenza di molte zone ricche di combustibile, sedi dei precursori del soot. Ciò ha portato molti ricercatori a testare strategie di iniezione alternative, allo scopo di ottenere miscele più omogenee.

Ad esempio, Takeda *et al.* [16] hanno indagato la possibilità di ottenere una adeguata distribuzione spaziale del combustibile iniettando indipendentemente da tre iniettori, uno montato centralmente rispetto alla camera di combustione (posizione classica), e due montati ai lati del cilindro. E' stato osservato che, con l'80 % del combustile iniettato dal primo iniettore ed il 20 % da quelli laterali è possibile ridurre i livelli di particolato allo scarico ed i consumi specifici. Il primo effetto si ipotizza essere legato ad un migliore utilizzo dell'aria al centro della camera, normalmente poco

utilizzata poiché l'iniezione centrale brucia tendenzialmente in prossimità delle pareti del cilindro. Di conseguenza la durata complessiva della combustione diminuisce e più calore di combustione viene rilasciato in corrispondenza del PMS. Da ciò dipende la diminuzione dei consumi specifici.

Kimura *et al.* [17], invece, basandosi sulla constatazione che la formazione degli NO_x è fortemente dipendente dalla temperatura di combustione, hanno provato ad ottenerne la riduzione abbassando la temperatura sul ciclo. E' stata pertanto sperimentata una nuova combustione, denominata MK (Modulated Kinetics), che riduce gli NO_x grazie a reazioni a bassa temperatura. Nella combustione MK tale obiettivo è ottenuto applicando una elevata percentuale di EGR, che, come detto, innalza la capacità termica dei gas in camera di combustione. Abbassando la concentrazione di ossigeno si hanno, inoltre, minori perdite per scambio termico, grazie a temperature più basse durante il ciclo [18]. Questo, però, generalmente, comporta un aumento del particolato. Si è pensato, quindi, che un modo per eliminare questo inconveniente fosse quello di operare una combustione completamente premiscelata. L'iniezione viene pertanto fortemente ritardata in modo da aumentarne il ritardo d'accensione; iniettando con forte ritardo, infatti, l'iniezione avviene in fase di espansione, quando cioè pressione e temperatura si abbassano nuovamente, rallentando i processi che determinano il ritardo di accensione. Viene, inoltre, applicato un forte moto di swirl in modo da prevenire la produzione di THC e, quindi, di SOF. E' stato, infatti, osservato che con bassi valori di swirl lo spray tende a concentrarsi sulla parete del cilindro, bruciando proprio in corrispondenza di essa. Questa può essere, inoltre, la prima causa che porta ad elevati valori dei livelli di THC. Uno swirl maggiore comporta una maggiore deflessione dello spray, un minore impingement e, quindi, minori perdite per scambio termico. Generalmente, ritardando l'iniezione, l'efficienza termica si abbassa. Nella combustione MK tale inconveniente è compensato dall'elevato swirl e, quindi, dalla bassa produzione di THC, che riporta l'efficienza termica a livelli comparabili se non più elevati del Diesel classico. La combustione MK, inoltre, più lenta nella fase iniziale rispetto a quella classica, comporta una diminuzione del rumore di combustione.

Confrontando infatti la curva di rilascio del calore classica con quella caratteristica della combustione MK, appare che il rilascio MK parte in ritardo, a causa dell'iniezione ritardata. La velocità di rilascio è, inoltre, inizialmente inferiore, tuttavia cresce in modo vigoroso durante la seconda parte della combustione. Ciò fa sì che la

durata della combustione per i due casi risulti comparabile. Tecniche di imaging all'interno della camera di combustione sono state applicate al fine di comparare i risultati relativi alla combustione Diesel classica ed MK. Quello che e' stato osservato è che, a differenza della combustione classica, nella combustione MK non si notano mai spots luminosi.

Ciò che limita la combustione MK è il campo di regimi di applicabilità. Per carichi elevati, infatti, la temperatura dell'EGR aumenta e ciò causa una diminuzione del ritardo d'accensione. Pertanto, l'iniezione è ancora in corso quando la combustione comincia. Gli Autori hanno pensato pertanto di diminuire la durata dell'iniezione, utilizzando un sistema common rail, e di abbassare la temperatura in camera diminuendo il rapporto di compressione e raffreddando l'EGR. Tale combinazione, che sembra estendere l'applicabilità della MK, ha di contro ripresentato problemi ai bassi carichi, soprattutto per la produzione di HC in fase di accensione del motore [18].

Le strategie di iniezione alternative, insieme ad alternative configurazioni degli spray, a volte anche difficilmente riproducibili nella pratica, sono state simulate mediante codici numerici. Ad esempio Uludogan *et al.* [19] hanno simulato iniezioni effettuate da più iniettori che spruzzano in direzione tangente alle pareti del cilindro, allo scopo di analizzare le cause che determinano la produzione degli inquinanti in camera di combustione. Tali simulazioni numeriche hanno mostrano che questo sistema di iniezione porta ad una drastica riduzione del particolato pur mantenendo sostanzialmente invariati gli NO_x. Questo perché, pur incrementando la quantità di combustibile che brucia in fase premiscelata, il sistema MICS (Multiple Injector Combustion System) migliora il mescolamento durante il ritardo di accensione, ottenendo temperature più basse durante la prima parte della combustione diffusiva. Il soot diminuisce drasticamente, sia per l'aumento della temperatura media causato da una maggiore combustione premiscelata, sia perché il maggiore mescolamento tra combustibile ed aria accelera l'ossidazione delle particelle carboniose. Si nota, infatti, che la diminuzione del soot è semplicemente legata alla maggior velocità di ossidazione, non essendo per nulla cambiata la velocità di formazione.

La combustione magra, che comprende anche la combustione HCCI, è considerata una tra le più promettenti strategie di combustione nell'ottica

dell'ottenimento di una adeguata distribuzione spaziale del combustibile in camera di combustione e, quindi, della riduzione di NO_x e soot [18]. Una strategia per ottenere tale combustione consiste nell'iniettare il combustibile in modo fortemente anticipato durante la fase di compressione. Ciò consente l'ottenimento di una miscela omogenea, a causa dell'elevato ritardo d'accensione che ne deriva, con conseguente riduzione di NO_x e soot. Rimura *et al.* [20] hanno, per esempio, dimostrato che, con tale strategia, è possibile ottenere abbattimenti quasi totali di NO_x, ma, contemporaneamente, si osserva un significativo aumento delle emissioni di THC e CO, oltre ad un aumento dei consumi specifici. Tali problemi possono essere risolti, almeno in parte, evitando l'impingement sulle pareti, ciò che consente anche di prolungare la vita media dell'olio lubrificante, altrimenti generalmente accorciata da un'eccessiva diluizione del combustibile che bagna le pareti durante la fase di compressione.

Miyamoto *et al.* [21] hanno dimostrato, mediante simulazioni numeriche di tale strategia di combustione, che una iniezione fortemente anticipata produce buoni effetti grazie sia ad un maggiore tempo disponibile per il miscelamento che alla possibilità di ottenere maggiori lunghezze di penetrazione dello spray. E' stato dimostrato, infatti, che una iniezione molto anticipata produce una miscela più magra. Tuttavia non si osserva variazione nella quantità di massa vaporizzata trai due casi di iniezione ad 80 e 120° di anticipo. Pertanto la differenza nei valori di emissioni registrate può dipendere dalla distribuzione spaziale della miscela al momento dell'autoaccensione. Nel caso di iniezione fortemente anticipata, infatti, il combustibile sembra disperso più omogeneamente in tutto lo spazio a disposizione. Altro fatto importante che è stato evidenziato per via numerica è che la presenza di zone "fredde", all'interno della camera, causa livelli elevati di THC.

Tale fenomeno è stato evidenziato anche da Harada *et al.* [22] ed Akagawa *et al.* [23], che hanno testato tre tipologie di iniettori, caratterizzati da differenti penetrazioni assiali e radiali, e due differenti geometrie di camera di combustione, una più piatta ed una più profonda, mantenendo invariato il rapporto di compressione. L'iniettore intermedio produce i più bassi livelli di HC perché non vi è un forte impingement né sul cilindro né sul pistone. Si osserva una diminuzione dei livelli del particolato passando dalla camera di combustione piatta alla profonda, indipendentemente dalla tipologia di iniettori utilizzati. Bisogna, pertanto, evitare, mediante la registrazione degli anticipi, la

presenza di molto combustibile nella zona di squish, caratterizzata generalmente da temperature più basse.

In tale strategia di combustione, fattori quali moto dell'aria all'interno della camera di combustione e temperatura dei gas residui, giocano un ruolo fondamentale nei meccanismi di autoaccensione del combustibile. Ciò causa un altro dei problemi, ancora insoluti, di questa strategia di iniezione, ovvero l'elevata variabilità ciclo-ciclo della pressione in camera di combustione [24].

1.2 Iniezione doppia

Splittare l'iniezione singola in due iniezioni successive è una tecnica utilizzata già dal 1937 per ridurre il rumore di combustione e, quindi, permettere l'uso di combustibili di qualità più scadente, ovvero a più basso numero di cetano [4]. Recentemente [25], l'efficacia dell'iniezione pilota nella riduzione del rumore e' stata analizzata anche combinandola ad altre tecniche, quali l'EGR. E' stato osservato che, a basso carico, l'iniezione pilota comporta un abbassamento del rumore a parità di particolato prodotto, mentre a carico elevato tale influenza è assente. Anzi, nel caso di elevate quantità di combustibile pilota, il rumore prodotto può addirittura aumentare, essendo legato in prima battuta all'intensità di combustione premiscelata e, quindi, a quanto combustibile è iniettato durante il ritardo d'accensione. Accoppiando l'iniezione pilota con l'EGR, tuttavia, il rumore di combustione diminuisce, proprio grazie alla risultante riduzione del ritardo d'accensione.

Nel corso degli anni, tuttavia, la tecnica dell'iniezione pilota è stata indagata anche allo scopo di controllare le emissioni allo scarico dei motori per autotrazione. Oggi tale pratica è largamente impiegata, grazie anche alla versatilità degli elettroiniettori.

Nell'ambito delle iniezioni doppie, si distinguono l'iniezione pilota e l'iniezione split. L'iniezione pilota consiste nell'iniettare piccole quantità di combustibile (max 10% del totale) generalmente poco prima della cosiddetta iniezione principale, o main. La strategia split, invece, è costituita da due iniezioni di quantità di combustibile generalmente comparabili, effettuate anche a notevole distanza angolare una dall'altra.

Non essendoci, tuttavia, una classificazione precisa, non è raro in letteratura l'utilizzo indistinto del termine "pilota" o del termine "preiniezione".

La letteratura riguardante gli effetti di tale strategia di iniezione è molto ricca, a causa dell'elevato numero di variabili da cui essi dipendono, e spesso contrastante. Al variare dei parametri che la caratterizzano, infatti, la strategia di iniezione che utilizza la pilota presenta caratteristiche del processo di vaporizzazione, accensione, sviluppo della combustione e produzione degli inquinanti, spesso, notevolmente differenti da quelle dell'iniezione singola.

Kong *et al.* [6], hanno evidenziato, mediante tecniche di imaging applicate in camera di combustione allo scopo di analizzare i meccanismi di accensione dell'iniezione pilota al variare della quantità iniettata, che, utilizzando una distribuzione del combustibile 10% - 90%, la combustione della prima iniezione presenta un elevato ritardo d'accensione ed, inoltre, che tale accensione avviene lontano dal foro dell'iniettore. Già a questo livello, il confronto con lo sviluppo della combustione corrispondente all'iniezione singola evidenzia una diminuzione della fase premiscelata, dovuta alla diminuzione del ritardo di accensione della main legato alla combustione dell'iniezione pilota. Distribuendo il combustibile tra pilota e principale secondo 25% - 75%, l'accensione della pilota si verifica più vicino alla punta dell'iniettore rispetto al caso 10% - 90%, ma comunque più lontano da esso rispetto al caso dell'iniezione singola. Tale studio è completato da Ricart e Reitz [26], che visualizzano la combustione di 10, 15 e 20% di combustibile iniettato durante l'iniezione pilota, per 5, 10, 15 °CABTDC. I risultati evidenziano l'assenza di nuclei di accensione in corrispondenza delle zone di impingement quando l'iniezione pilota è caratterizzata da elevati anticipi e basse percentuali iniettate. Ciò può essere dovuto ad una dispersione della piccola quantità di combustibile, iniettata, tra l'altro, in un ambiente a bassa densità, che porta ad una bassa concentrazione locale di combustibile vaporizzato e, quindi, a maggiori ritardi di accensione. Tali risultati sono confermati da quelli riportati da Erlach *et al.* [27]. Quando, invece, l'iniezione pilota è ritardata, si osservano accensioni anche vicino alla bowl. Questo comportamento indica una migliore vaporizzazione ed un ritardo d'accensione ridotto, legato anche alle condizioni più favorevoli di temperatura e pressione. Incrementando la quantità iniettata durante l'iniezione pilota, le caratteristiche della combustione che ne risulta divengono simili a quelle dell'iniezione singola; ad esempio, con l'iniezione pilota al 20%, l'accensione

avviene prevalentemente nelle zone di impingement, anche se, rispetto ai casi precedenti, sono evidenti molti nuclei di accensione. Tuttavia, solo quelle più vicine alle zone di impingement sviluppano successivamente zone di combustione più ampie. Questo aspetto sembra indicare che la maggior parte di combustibile penetra abbastanza nella camera prima di prender parte al processo di combustione. Dopo l'accensione, la fiamma propaga velocemente e la combustione si sviluppa maggiormente nella zona della camera più vicina alle pareti della bowl. Al termine dello "spot" luminoso, generalmente associato alla fiamma premiscelata, sono inoltre evidenti zone "brune", che sembrano indicare che l'ultima parte della combustione è già regolata da fenomeni diffusivi.

A conferma di quanto descritto, Tennison e Reitz [9] hanno indagato in particolare il fenomeno dell'accensione di iniezioni pilota piccole ed anticipate, tramite l'analisi delle curve di rilascio del calore, calcolata mediante il ciclo di pressione acquisito in camera di combustione. In tali condizioni è stato verificato che l'iniezione pilota comincia a bruciare sempre allo stesso angolo di manovella, ovvero non prima che in camera vengano raggiunte determinate condizioni di pressione e temperatura. In tali condizioni, quindi, il ritardo è regolato dai fattori termo-chimici. E' stato, inoltre, osservato che il picco della curva di rilascio di calore relativo all'iniezione pilota diminuisce anticipando l'iniezione. Infatti, se l'iniezione è anticipata, aumenta il ritardo di accensione, avvenendo la combustione sempre allo stesso CA. Può risultare, pertanto, che, quando le condizioni termodinamiche idonee all'accensione sono raggiunte, la miscela aria-combustibile risulti localmente troppo magra per bruciare.

La constatazione che l'intensità della combustione premiscelata e, quindi, per quanto detto a proposito dell'iniezione singola, il livello di produzione degli NO_x, dipendono dalla quantità di combustibile iniettato durante il ritardo d'accensione, ha suggerito ai ricercatori un profilo d'iniezione in cui la fase iniziale fosse caratterizzata da un incremento più graduale. Tale pratica prende il nome di "shaping". Ecco perché Nehmer e Reitz [4] hanno testato differenti profili di iniezione, ottenuti variando, in configurazione split, la percentuale, l'anticipo e la velocità iniziale di iniezione caratterizzanti le due iniezioni. E' stato osservato che basse durate dell'iniezione split, così come un maggiore shaping dell'iniezione, provocano un basso sviluppo dello spray ed una lenta vaporizzazione. Tale fenomeno, inoltre, è ancora più evidente quando sono

utilizzati iniettori a bassa velocità iniziale di iniezione. A causa dei fenomeni fluidodinamici che avvengono all'interno dell'iniettore, è lecito aspettarsi che la variazione dell'intervallo tra le due iniezioni influenzi anche la stessa iniezione principale. Sempre in [4], infatti, è stato mostrato come, variando l'intervallo tra le due iniezioni, il massimo nel profilo di iniezione della main trasli dall'ultima metà alla prima metà della sua durata complessiva. Badami *et al.* [28] hanno correlato l'incremento o il decremento della pressione di iniezione dell'iniezione principale rispetto alla pressione media nel rail, dovuto principalmente alla variazione del ritardo tra le due iniezioni, con le forti variazioni dei livelli di particolato allo scarico osservate.

Schmid *et al.* [29], invece, hanno analizzato l'influenza della doppia iniezione sullo sviluppo dello spray in camera di combustione. E' stato osservato che, se la percentuale di combustibile durante l'iniezione pilota non è troppo elevata, essa, per quanto già visto, non brucia. Tuttavia, vaporizzando prima dell'iniezione principale, ne peggiora le condizioni per una buona vaporizzazione. Inoltre, a causa dell'aumento della temperatura legato alle pre-reazioni dell' iniezione pilota, il ritardo d'accensione della main si accorcia. Ciò fa sì che una maggiore quantità di miscela ricca sia presente nei pressi del polverizzatore, con conseguenti effetti dannosi principalmente sulla produzione di particolato. Tale effetto è ovviamente amplificato per elevate percentuali di combustibile iniettate durante la pilota. Se, tuttavia, quest'ultima è tale da bruciare, il conseguente incremento della temperatura accelera notevolmente il processo di vaporizzazione del combustibile iniettato successivamente.

L'efficacia dell'iniezione pilota riguardo alla riduzione del rumore di combustione risiede nel fatto che, se il combustibile di tale iniezione brucia, il ritardo dell'iniezione principale diminuisce sensibilmente e, quindi, diminuisce l'intensità della combustione nelle sue fasi iniziali, considerata la causa prima del rumore di combustione stesso. L'effetto dell'iniezione pilota sul ritardo della main è stato, pertanto, oggetto di numerosi studi. Ishida *et al.* [30], ad esempio, hanno mostrato come la variazione della durata dell'iniezione pilota vari significativamente il ritardo d'accensione delle main e, quindi, il picco della fase premiscelata, maggiormente in corrispondenza di bassi carichi motore. A carico elevato, tale effetto è meno evidente, mentre è stata osservata una variazione dello sviluppo della fase diffusiva. Si pensa che

tale fenomeno sia legato al fatto che, utilizzando l'iniezione pilota, il combustibile iniettato durante l'iniezione principale atomizzi in difetto di ossigeno poiché viene iniettato in presenza dei gas combusti dell'iniezione pilota [31]. Una pilota molto anticipata incontra una più bassa densità dell'aria in camera e, quindi, penetra meglio, favorendo una maggiore quantità di fase premiscelata rispetto alle pilote posticipate [32]. Posticipando la pilota, invece, la combustione più rapida, accoppiata ad una maggiore turbolenza in camera, incentivano i fenomeni di ossidazione. Di conseguenza la combustione procede più lentamente, portando ad un picco relativo alla combustione premiscelata più basso.

Un altro effetto dell'iniezione pilota sullo sviluppo della combustione è l'abbassamento della temperatura in camera [27]. Ciò probabilmente perché i prodotti dell'ossidazione del combustibile pilota incrementano la capacità termica della miscela gassosa, diminuendo così la temperatura adiabatica di fiamma.

Benajes *et al.* [33], hanno largamente analizzato l'effetto dell'iniezione pilota sullo sviluppo della combustione in corrispondenza di varie condizioni operative del motore. Dall'analisi delle curve GHRR (Gross Heat Release Rate) risulta che, nelle condizioni testate, la velocità di combustione dell'iniezione pilota risulta generalmente comparabile a quella della fase premiscelata dell'iniezione principale. Le massime velocità di combustione dell'iniezione principale in presenza della pilota, inoltre, sono comparabili all'iniezione senza pilota per le condizioni operative più gravose, mentre sono più basse per quelle meno gravose, a conferma del fatto che l'efficacia dell'iniezione pilota si manifesta perlopiù a bassi carichi. Un simile studio è stato fatto da Badami *et al.* [28], che hanno analizzato l'incidenza dell'iniezione pilota sullo sviluppo della combustione per differenti valori dell'anticipo e della durata della stessa. E' stato osservato che la combustione della pilota, così come appare dalla curva GHRR, raggiunge l'intensità massima per un determinato valore dell'intervallo tra di essa e la principale pari a 500 us. Diminuendo tale intervallo fino a 500 μs si osserva una combustione della main anticipata e contemporaneamente una riduzione del picco della combustione principale, mentre ulteriori riduzioni sotto i 500 μs non causano ulteriori spostamenti dell'angolo di manovella al quale avviene l'autoaccensione, provocando tuttavia un trend crescente nel picco di combustione della main.

La sensibilità, che lo sviluppo della combustione dimostra nei confronti dei parametri dell'iniezione pilota, causa una forte variabilità, al variare degli stessi, dei livelli di emissioni inquinanti allo scarico e delle performance del motore. Le potenzialità della doppia iniezione nella riduzione degli inquinanti risiedono sia nella possibilità di "controllare" i ritardi d'accensione della miscela che di modulare l'iniezione in base alla disponibilità di ossigeno in camera di combustione [12]. Parametri significativi in tal senso sono pertanto la fasatura dell'iniezione, l'intervallo tra le due iniezioni, le percentuali di combustibile iniettate in ognuna di esse, la pressione di iniezione, l'inclinazione dello spray, la forma geometrica della camera e l'intensità del moto di swirl.

Nehmer e Reitz [4] hanno analizzato l'effetto della percentuale iniettata durante l'iniezione pilota e dell'intervallo angolare pilota-main sul trade-off NO_x-soot. Ne è risultato che, iniettando 25 e 50% del combustibile durante la prima iniezione, si ottiene una riduzione degli NO_x senza aumentare significativamente il particolato allo scarico. Un'importante osservazione è che, con la split, è possibile ottenere una riduzione del particolato benché dalla curva di rilascio del calore risulti un aumento della durata totale della combustione stessa, osservazione, questa, confermata dai risultati riportati da Tow *et al.* [34]. Ciò risulta in controtendenza rispetto alla correlazione empirica secondo la quale un picco più pronunciato nella combustione premiscelata corrisponde a più elevati livelli di NO_x, mentre una combustione diffusiva più duratura è indice di maggiore produzione di particolato. Man mano, infatti, che viene modulata l'iniezione, la produzione di inquinanti dipende sempre più dai valori locali di pressione, temperatura e rapporto aria-combustibile. Ciò rende inconsistente soprattutto il tentativo di estrapolare informazioni sui livelli di particolato dalle curve del GHRR, mentre, riguardo agli NO_x, legati soprattutto alle temperature raggiunte in camera di combustione, la curva del GHRR continua ad essere un valido indice di valutazione. Incrementando il ritardo tra iniezione pilota e principale, la combustione diffusiva avviene in ritardo e le emissioni tendono a comportarsi come quelle corrispondenti ad una singola iniezione posticipata.

Studi sull'interazione tra anticipo e durata della pilota sono stati effettuati anche da Benajes *et al.* [33]. E' stato osservato che, utilizzando la pilota, i consumi specifici tendono sempre a diminuire, e che tale effetto è maggiormente pronunciato incrementando la percentuale iniettata durante la pilota. Dall'analisi delle curve di

rilascio del calore sembra che ciò sia dovuto ad una riduzione della durata complessiva della combustione. Riguardo, invece, all'impatto che l'iniezione pilota ha sul trade-off NO_x-soot, sembra che, in linea generale, gli effetti siano lievi per tutte le condizioni operative testate del motore, e talvolta è stato osservato addirittura che i livelli di NO_x aumentano quando si effettua l'iniezione pilota rispetto al caso senza. Dato che non sono state osservate variazioni nella velocità di combustione passando dall'iniezione singola alla doppia, è stato ipotizzato che l'aumento negli NO_x sia imputabile all'incremento della temperatura seguente la combustione della pilota.

Mishimura *et al.* in [35] hanno paragonato l'iniezione singola con strategie alternative quali la pilota, la modulata e quella ottenuta variando la pressione di iniezione. Tale ultima strategia è ottenuta commutando due rail sedi di due differenti pressioni di iniezione nell'ambito della stessa iniezione. Con la pilota tradizionale si osserva ad esempio che il ritardo pilota-main influenza poco le emissioni di particolato quando la quantità pilota iniettata è bassa. Con bassi valori di tale ritardo, tuttavia, esso tende a crescere, specialmente per elevate quantità pilota iniettate. Rispetto alla strategia pilota, l'iniezione modulata presenta livelli minori di consumi, di THC e degli NO_x, sebbene il livello di particolato aumenti. Gli Autori hanno ipotizzato che tale effetto possa essere dovuto ad una durata dell'iniezione complessivamente maggiore. L'iniezione modulata, invece, come atteso, permette di ottenere una iniezione più graduale, contribuendo ad una sostanziale riduzione del picco della combustione premiscelata.

Erlach *et al.* [27] hanno confrontato la strategia di iniezione con la pilota con l'iniezione tradizionale. Le due iniezioni con la pilota sono caratterizzate da due differenti valori del timing (5 e 17 °CABTDC), mentre la quantità iniettata è mantenuta costante. E' stato osservato che, benché, come analizzato precedentemente, l'iniezione pilota causi una diminuzione della velocità iniziale di formazione degli NO_x, anticipando la pilota tale beneficio è inferiore. Tale evidenza sperimentale viene giustificata considerando che a 17 DCA di inizio dell'iniezione pilota, essa brucia più completamente, innalzando la temperatura in camera. Una pilota molto anticipata incontra una più bassa densità dell'aria in camera e, quindi, penetra meglio, favorendo

una maggiore quantità di fase premiscelata rispetto alle pilote posticipate e quindi incrementando gli NO_x e diminuendo il soot.

Badami *et al.* [28] hanno analizzato numerose combinazioni di durata ed anticipo dell'iniezione pilota, per differenti condizioni operative. Come precedentemente discusso, dall'analisi delle curve di rilascio del calore era apparso che il dwell presentasse un valore critico (500 μs). Tale soglia risulta importante anche a proposito delle emissioni. Aumentando infatti il dwell fino a 500 μs si registra un aumento del particolato, e contemporaneamente il picco della combustione della fase premiscelata decresce. Incrementando ulteriormente il dwell si osservano delle oscillazioni nei valori del particolato, il picco corrispondente alla combustione dell'iniezione principale aumenta progressivamente, ed in corrispondenza si osserva un incremento dei livelli degli NO_x. Un incremento della quantità di combustibile iniettato durante la pilota causa invece un incremento delle emissioni di particolato ed un decremento delle emissioni di NO_x. Tale risultato è sostanzialmente confermato dai risultati riportati da Minami *et al.* [31] e Chen [32]. Si ipotizza che utilizzando l'iniezione pilota, il combustibile atomizzi in difetto di ossigeno poiché l'iniezione principale avviene in presenza dei gas combusti dell'iniezione pilota. Di conseguenza la combustione procede più lentamente, portando ad un picco relativo alla combustione premiscelata più basso; e, velocità di combustione più basse durante la fase diffusiva causano un aumento delle emissioni di particolato. Viene sottolineato, tuttavia, che gli effetti dell'iniezione pilota sono evidenti solo ai bassi carichi, come tra l'altro confermato da Uchida *et al.* [36], sebbene sia stato osservato sperimentalmente che sia il trade-off NO_x-BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) che quello NO_x-soot possono essere migliorati, anche ai carichi elevati, effettuando iniezioni pilota molto anticipate. La causa di ciò e' da imputare ad un cosiddetto "effetto EGR" derivante dai prodotti della combustione dell'iniezione pilota.

In ultima analisi, l'interesse sempre maggiore che riveste lo studio della distribuzione granulometrica delle particelle carboniose allo scarico accanto al quantitativo complessivo prodotto, distribuzione questa ritenuta la causa di problemi all'apparato respiratorio umano, ha fatto sì che Jaeger et al. [37] studiassero l'influenza dell'iniezione pilota su tale distribuzione. I risultati ottenuti mostrano che la presenza dell'iniezione pilota comporta un aumento del numero di particelle fini (> 50 nm) ed

una diminuzione delle particelle nanometriche (< 50 nm), rispetto al caso senza iniezione pilota.

Alla luce di quanto esposto fino ad ora, l'iniezione pilota deve, quindi, avere le seguenti caratteristiche:

- l'anticipo e la durata dell'iniezione pilota devono essere tali da evitare la mancata accensione della stessa, causa, come abbiamo visto, di un incremento della fase premiscelata, e devono rappresentare il giusto compromesso tra la diminuzione del ritardo d'accensione dell'iniezione principale e l'incremento della temperatura in camera di combustione causato dall'accensione anticipata della miscela [30][38];
- il ritardo tra iniezione pilota ed iniezione principale deve essere tale che, al momento dell'iniezione principale, il moto di swirl sposti i prodotti della combustione pilota, facendo sì che la combustione relativa avvenga in un ambiente ricco di ossigeno ed evitando così una elevata formazione del particolato [11][29];
- la pressione di iniezione della pilota deve essere alta abbastanza da favorire un più intimo mescolamento tra aria e combustibile e, quindi, la riduzione del particolato;
- la quantità della pilota, inoltre, deve essere il giusto compromesso tra la produzione di prodotti della combustione della pilota, che, come visto, abbassano la temperatura in camera di combustione e quindi gli NO_x, e la derivante produzione di particolato. Qualora, infatti, al momento dell'autoaccensione dell'iniezione principale, sia ancora in corso la combustione della pilota, l'interferenza tra particolato formato e spray della main può causare un lieve miscelamento dello spray dell'iniezione principale così come una bassa ossidazione del particolato prodotto durante la combustione dell'iniezione pilota. Nel caso di iniezioni pilota lunghe, piccoli dwell ed incompleto mescolamento della pilota possono provocare la presenza di fiamma mentre la main viene iniettata. Infatti, lunghi dwell generalmente comportano valori più bassi di livelli di particolato [25].

Lo studio sperimentale riguardante la strategia della doppia iniezione finora descritto è stato accompagnato da uno sviluppo dei codici di simulazione termofluidodinamica.

Han *et al.* [39], ad esempio, hanno simulato la doppia iniezione, schematizzando il profilo delle velocità del combustibile con una doppia onda quadra e variando mutuamente le durate e l'intervallo tra di esse. E' stato confermato, come atteso, che la formazione degli NO_x è sensibile alla fase iniziale della combustione in quanto i relativi prodotti di combustione rimangono in un ambiente ad elevata temperatura per molto tempo e le zone sede della combustione non sono raffreddate dalla vaporizzazione del combustibile. Quando la percentuale di combustibile iniettata nella prima iniezione di una strategia split è elevata (75%), la combustione evolve come se si trattasse di una iniezione singola con lo stesso timing. Infatti, gli NO_x non variano. Quando, invece, tale percentuale diminuisce (25%), l'andamento della combustione è simile al caso di iniezione singola ritardata dell'intervallo tra le due iniezioni della split. In tal caso è molto importante la combustione della prima iniezione e l'effetto è generalmente quello di aumentare gli NO_x complessivi. Per ciò che riguarda il soot, l'iniezione singola produce una miscela ricca a basse temperature, portando alla produzione di soot. Con la split, invece, la seconda iniezione, se ritardata rispetto alla prima, avviene in una zona povera di combustibile e ad elevata temperatura. Pertanto, tale seconda iniezione è rapidamente bruciata senza che si possano ottenere in camere zone ricche. Inoltre, i prodotti di combustione della prima iniezione non sono ulteriormente investiti da altro combustibile e, quindi, continuano ad ossidarsi. E' stato, inoltre, confermato in linea teorica che il ritardo tra la prima e la seconda iniezione deve essere abbastanza lungo in modo tale che la regione di formazione del soot corrispondente alla prima iniezione non sia riempita con combustibile fresco, ma corto abbastanza che la temperatura media in camera vista dalla seconda iniezione rimanga alta abbastanza da produrre una combustione rapida.

Uludogan e Reitz [19] hanno verificato l'efficacia del sistema MICS, a cui si è accennato già in precedenza a proposito della singola iniezione, anche facendo l'iniezione split. Con la split si osserva un differente comportamento nel trade-off tra i due sistemi di iniezione. In particolare, con l'iniezione tradizionale, il soot si riduce fortemente. Col sistema MICS, effettuando la split, gli NO_x si riducono grazie alla più bassa temperatura prodotta da un miglior mescolamento tra aria e combustibile nella

prima fase della combustione. Il soot, invece, non diminuisce, in quanto non si notano variazioni nella localizzazione delle regioni di formazione di tale inquinante.

Parlando dell'iniezione singola e' stato accennato all'EGR quale mezzo per ridurre gli NO_x direttamente in camera di combustione. E' stato visto, inoltre, come generalmente tale sistema comporti un incremento del particolato, a meno di non raffreddare i gas esausti prima che questi vengano miscelati con la carica d'aria fresca. Un'altra possibilità riguardo all'abbattimento del particolato allo scarico e' quella di utilizzare la cosiddetta post iniezione, consistente in una seconda iniezione, oltre l'iniezione principale, fortemente posticipata rispetto al PMS. La pratica della post iniezione è nata, come verrà analizzato più diffusamente in seguito, sia per produrre gli idrocarburi necessari ad incrementare l'efficienza di conversione dei catalizzatori attivi $DeNO_x$, sia ad aumentare, quando richiesto, la temperatura delle trappole di particolato al fine di bruciare il materiale carbonioso depositato. Ovviamente tale iniezione esercita la sua influenza anche sui livelli di emissioni e sui consumi specifici.

Chen [32], infatti, ha osservato sperimentalmente che, tramite la post-iniezione, il processo di ossidazione del particolato è agevolato, in quanto aumenta la temperatura e la turbolenza in camera di combustione. Tramite la post-iniezione migliora il trade-off NO_x-particolato senza ledere i consumi e le emissioni di HC. Il ritardo della post non influenza i consumi ed i THC fino ad un certo livello; incrementando tale ritardo, tuttavia, si ha un deterioramento di entrambi perché le condizioni termodinamiche in camera non sono tali da produrre la combustione completa dello spray.

Simili risultati sono stati evidenziati da Payri *et al.* [40], in cui l'efficacia della post-iniezione è giustificata dal maggiore rimescolamento dell'aria in camera di combustione, grazie alla quantità di moto ceduta dal getto, che accelera il processo di combustione di questa parte di combustibile rispetto al caso senza post. In generale, la post ha effetti trascurabili sugli NO_x, essendo questi dipendenti maggiormente dalle prime fasi della combustione.

Benajes *et al.* [33], hanno testato la post-iniezione in corrispondenza di varie condizioni operative del motore. E' stato riscontrato che i consumi tendono generalmente ad aumentare, seppur lievemente, al crescere della massa iniettata e/o del ritardo della post. Tuttavia tali parametri sono meno influenti rispetto alle variazioni

causate dai parametri dell'iniezione pilota. I trade-off NO_x-soot sembrano favorire una diminuzione dei livelli di soot senza una penalizzazione nei livelli di NO_x.

La ricerca indirizzata verso l'ottenimento di forme di combustione alternative si è talvolta servita anche della doppia iniezione. Hashizume *et al.* [41], ad esempio, hanno testato la cosiddetta combustione MULDIC (MULtiple Stage DIesel Combustion). Essa combina combustione premiscelata povera con combustione diffusiva. Esse generalmente avvengono in due momenti ben distinti ed, in particolare, la prima iniezione causa la combustione premiscelata magra, mentre la seconda causa la combustione diffusiva in condizioni di alta temperatura e bassa concentrazione di ossigeno. Per la prima fase, il combustibile è iniettato in modo molto anticipato, dandogli tempo sufficiente per sviluppare una miscela magra e l'accensione spontanea è sfruttata per accendere il combustibile. In questo modo vi è una distribuzione omogenea della temperatura all'interno della camera di combustione, quindi la produzione degli NO_x è molto bassa. Quando finisce questa prima fase, dell'altro combustibile viene iniettato. L'iniezione può essere ritardata senza problemi, senza incorrere nel problema del misfiring, poiché la temperatura in camera è già elevata. Nella configurazione usata in [41], la prima iniezione è effettuata mediante iniettori posizionati lateralmente al cilindro, mentre la seconda fase è effettuata da un iniettore posizionato centralmente.

E' stato osservato che gli NO_x diminuiscono drasticamente rispetto ai livelli riscontrati con l'iniezione tradizionale quando la seconda iniezione viene posticipata. Il particolato, invece, aumenta a causa del più breve ritardo d'accensione, tuttavia mai in modo vistoso. Anche le emissioni di THC sono superiori, seppure di poco, a quelli riscontrati nel funzionamento tradizionale. Di conseguenza peggiorano anche i consumi, sia perché la seconda fase della combustione avviene durante la fase di espansione, sia perché la prima iniezione si accende in fase di compressione.

Tecniche di imaging in camera di combustione sono state utilizzate al fine di confrontare lo sviluppo della combustione in condizioni tradizionali e con la strategia MULDIC. La combustione MULDIC parte a circa +10 BTDC, ma senza mostrare una fiamma luminosa. La fase diffusiva è sicuramente caratterizzata da una maggiore temperatura, che causa una migliore ossidazione e, quindi, un abbassamento del particolato. Dato che la combustione MULDIC avviene maggiormente all'esterno della camera di combustione, maggiori sono le perdite per trasmissione di calore.

Odaka *et al.* [42] hanno testato la combustione HCDC (Homogeneous Charge Diesel Combustion) ottenuta iniettando parte del combustibile nel collettore di aspirazione. E' stata testata la possibilità di ridurre le emissioni allo scarico del motore mediante variazione dell'anticipo di iniezione del combustibile iniettato in camera, la percentuale di EGR e miscelando il gasolio con MTBE. Si osserva che la combustione HCDC riduce gli NO_x posticipando l'iniezione; gli NO_x diminuiscono aumentando la percentuale di combustione premiscelata. Il particolato, invece, non varia o diminuisce solo lievemente. L'EGR non gioca un ruolo fondamentale al variare della percentuale di premiscelata. All'aumentare dell'EGR, gli NO_x diminuiscono ed il particolato aumenta, entrambi a causa della riduzione dell'ossigeno aspirato. Miscelando il gasolio con MTBE, l'accensione è ritardata ed comincia effettivamente in corrispondenza del TDC. L'utilizzo contemporaneo dell'additivo e della percentuale di premiscelata, tuttavia, incrementa i consumi a fronte di una diminuzione sia degli NO_x che del particolato.

1.3 Iniezioni multiple

In base a quanto precedentemente detto, il dosaggio del combustibile nell'ambito dello stesso ciclo riveste un'importanza strategica nel controllo dei consumi e delle specie inquinanti. Il soot, in particolare, si forma maggiormente in corrispondenza del fori dell'iniettore, zona caratterizzata da un elevato rapporto di equivalenza a causa del continuo ricambio di combustibile. Pulsando l'iniezione, invece, è possibile una forte riduzione delle zone ricche di combustibile poiché, vicino all'iniettore, il combustibile non è continuamente rimpiazzato da altro combustibile, grazie agli intervalli tra le iniezioni, ed anche perché il combustibile iniettato dopo l'accensione delle iniezioni precedenti brucia prima, in quanto trova condizioni termodinamiche favorevoli per un'accensione più veloce. L'utilizzo delle iniezioni multiple è, inoltre, un mezzo efficace per migliorare il mescolamento tra l'aria ed il combustibile e produrre pertanto uno smagrimento della miscela, grazie anche all'incremento della turbolenza in camera che così si ottiene [15].

Tali considerazioni hanno portato alla recente apparizione sul mercato del sistema di iniezione Multijet, una evoluzione del sistema di iniezione common rail in

grado di effettuare sino a cinque iniezioni nell'ambito dello stesso ciclo (vedi Figura 1-1).

Il confronto con il sistema di iniezione common rail di 1° generazione evidenzia che l'iniezione pilota, utilizzata sostanzialmente per ridurre la rumorosità tipica della combustione dell'iniezione diretta, è mantenuta anche nei sistemi di 2° generazione. L'iniezione principale è, invece, ripartita fino a tre iniezioni (pre-main-after) al fine di modulare il picco di pressione in camera di combustione e, quindi, limitare la produzione di NO_x.

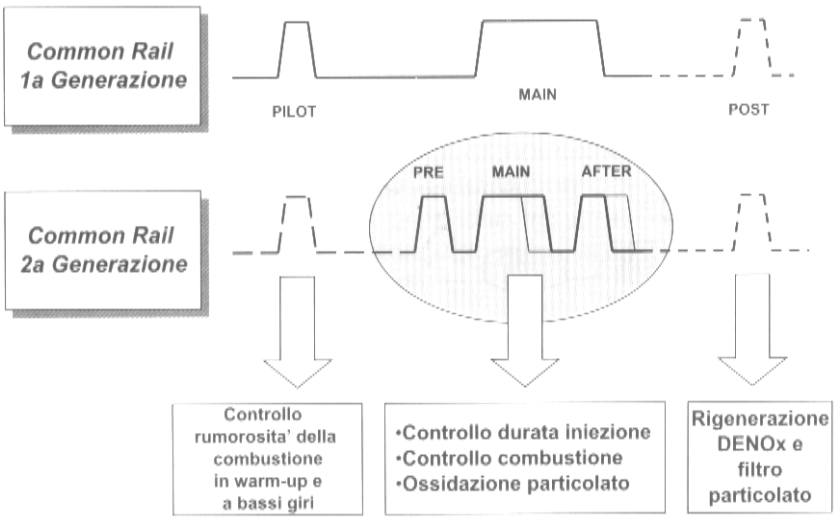

Figura 1-1 – Schematizzazione delle iniezioni effettuate ogni ciclo mediante il sistema di iniezione Multijet

Viene inoltre attivata la post-iniezione. Tra i sistemi di post-trattamento, infatti, la trappola del particolato è uno tra quelli che suscitano maggiore ottimismo ed aspettative. Esso è in definitiva un filtro all'interno del quale si deposita il particolato. L'idea è attraente, ma il problema fondamentale risiede nel fatto che una trappola può accumulare circa 20 g di particolato prima di richiedere la rigenerazione, consistente nella combustione del carbonio accumulato. Ciò vuol dire, considerando la produzione media di particolato dei motori di ultima generazione, che tale processo dovrebbe avvenire ogni 400 km circa. Altrimenti il continuo accumulo impedirebbe lo scarico dei gas combusti, determinando l'arresto del motore per eccesso di contropressione. La

combustione all'interno della trappola presenta tuttavia varie problematiche. Tra di esse, la scarsa resistenza dei materiali costituenti la trappola ai forti gradienti di temperatura e la difficoltà di ubicare la trappola stessa in prossimità della valvola di scarico, dove le temperature presenti innescherebbero il processo di rigenerazione sono gli ostacoli maggiori alla messa sul mercato di tale dispositivo.

Il problema del raggiungimento della temperatura di rigenerazione può essere potenzialmente risolto effettuando la summenzionata post-iniezione. Tale iniezione, infatti, ha lo scopo di aumentare la temperatura dei gas di scarico all'ingresso della turbina, ovviamente solo quando diventa necessario attivare la rigenerazione del filtro. L'attuazione di tale iniezione è, pertanto, avviata da un sensore di pressione differenziale che monitora la caduta di pressione tra monte e valle della trappola stessa.

Le iniezioni multiple, pertanto, rappresentano un modo potenzialmente efficace ed estremamente versatile sia per migliorare la combustione nei motori Diesel che per aumentare l'efficienza dei sistemi di post-trattamento. Il raggiungimento di tali obiettivi è tuttavia complicato dall'elevato numero di variabili che la gestione elettronica del sistema di iniezione consente di regolare. La letteratura esistente a proposito, invece, sottolinea come la tecnica delle iniezioni multiple possa rivelarsi vincente o meno a seconda della corretta o meno regolazione di tali variabili.

Tow *et al.* [34] hanno applicato varie strategie di iniezione per ridurre le emissioni di particolato e di NO_x in un motore Diesel ad iniezione diretta per veicoli pesanti. Sono state analizzate due condizioni operative del motore caratterizzate da una velocità di rotazione di 1600 rpm e da una coppia di 78 Nm e 234 Nm, corrispondenti rispettivamente al 25 e al 75% della coppia massima erogabile dal motore utilizzato. Gli autori hanno trovato che, al 75% del carico ed usando tre iniezioni, le variazioni dei livelli di particolato al variare degli NO_x risultano notevolmente ridotte, effettuando iniezioni triple con una notevole pausa tra la prima e la seconda o tra la seconda e la terza iniezione. Quando tali pause sono molto piccole, invece, le emissioni di particolato risultano maggiori rispetto a quelle riscontrate effettuando l' iniezione singola. Tale riduzione di particolato è tuttavia ottenuta a fronte di un lieve aumento dei consumi (circa il 4%).

Le prove al 25% del carico hanno invece evidenziato che le iniezioni triple permettono un controllo maggiore del processo di combustione. Ciò consente una riduzione delle emissioni di ossidi di azoto e di particolato, in alcuni casi i primi di circa il 40% ed il secondo di oltre il 50% rispetto all'iniezione singola. Le emissioni di particolato dipendono maggiormente dal ritardo tra seconda e terza iniezione piuttosto che da quello tra prima e seconda. Sembra, inoltre, che la percentuale di combustibile iniettato durante l'ultima iniezione abbia un'influenza meno rilevante sul particolato. Inoltre, come accadeva già ai carichi maggiori, nel caso di strategie costituite da tre iniezioni, le curve del particolato sembrano risentire in misura minima della variazione degli NO_x e senza che ciò comporti un incremento dei consumi specifici.

Chen [32] ha studiato gli effetti delle iniezioni multiple sulle emissioni ed i consumi di un piccolo motore Diesel. In particolare sono state confrontate le performance del motore utilizzando l'iniezione tripla realizzando i test a tre differenti condizioni operative del motore caratterizzate dalla velocità di rotazione di 2000 rpm e dalla pressione media effettiva di 2, 5 e 6 bar. E' stato osservato che quando le iniezioni multiple sono usate con più alte percentuali di ricircolo dei gas combusti si ha un notevole miglioramento del trade-off NO_x-particolato. Per quanto concerne i valori di particolato, invece, essi aumentano con più piccole percentuali di EGR e si mantengono praticamente costanti con più elevate percentuali. L'uso delle iniezioni multiple, comunque, sembra essere più efficace ai carichi medi rispetto ai bassi carichi. In particolare ai carichi medi e con un EGR del 19% si trova una riduzione nelle emissioni di NO_x e di particolato rispettivamente del 50% e del 40%, anche in questo caso tuttavia a scapito di un lieve aumento dei consumi.

Yokota *et al.* [43] hanno analizzato le performance di un motore diesel effettuando contemporaneamente la early, la principale e la post-iniezione (EMA). I risultati mostrano che solo per iniezioni della principale molto ritardate, le strategie che usano la early portano effettivamente a dei benefici sia in termini di NO_x che di particolato, a discapito tuttavia di un peggioramento dei consumi. Confrontando la strategia EMA con la strategia pilota, è stato dimostrato che, mediante l'iniezione early, è possibile ottenere sostanziali diminuzioni dei livelli di particolato. Gli autori, tuttavia, hanno puntualizzato che, al fine di sfruttare tutte le potenzialità della combustione

omogenea, è importante controllare il ritardo d'accensione, al fine di evitare le forti variazioni ciclo-ciclo riscontrate, ridurre l'impingement delle pareti della camera a causa dell'utilizzo di iniezioni fortemente anticipate ed, infine, accelerare l'evaporazione ed il miscelamento del combustibile iniettato durante l'iniezione early.

Un confronto tra le due strategie di iniezione è stato fatto anche da Badami *et al.* [44]. Il primo confronto è stato fatto variando gli anticipo della prima e della seconda iniezione pilota. La variazione di entrambi questi parametri causa un incremento del particolato e degli NO_x rispetto alla doppia iniezione. In controtendenza sono, invece, i consumi ed il rumore di combustione.

Il secondo confronto è fatto variando il timing della post-iniezione, per due differenti valori dell'anticipo della pilota. Il timing della post influenza positivamente le emissioni di particolato, mentre NO_x e rumore di combustione non sono influenzati, essendo legati maggiormente alle prime fasi della combustione. Anche i consumi specifici non mostrano una sostanziale dipendenza.

Da un punto di vista termodinamico, la fasatura della post-iniezione non influenza generalmente le prime fasi della combustione. Tuttavia, quando la post è molto vicina all'iniezione principale, la sua vaporizzazione può influenzare la combustione della principale stessa. Il particolato aumenta rispetto alla doppia iniezione per bassi valori dell'intervallo tra principale e post, probabilmente perché aumenta l'effetto del raffreddamento dovuto alla post stessa. Il particolato diminuisce per valori intermedi dell'intervallo tra le due iniezione, che rappresentano pertanto il giusto compromesso tra i vari effetti, mentre aumenta nuovamente per alti valori di tale intervallo, poiché la combustione avviene troppo in ritardo durante la fase di espansione. Il valore ottimo non sembra essere influenzato dalla quantità iniettata durante la post. Gli NO_x non sono influenzati dalla post, tuttavia tendono a diminuire per maggiori valori dell'intervallo tra principale e post.

In [12], infine, è simulata la possibilità di accorciare l'intervallo tra le varie iniezioni ulteriormente rispetto a quanto consentito dagli iniettori presenti sul mercato. Si ritiene che ciò possa apportare dei benefici in quanto un elevato valore del ritardo fa sì, ad esempio, che, nel caso di due iniezioni principali, la seconda debba necessariamente avvenire troppo tardi durante la fase di espansione, in quanto l'anticipo

della prima è generalmente imposto dal contenimento degli NO_x. Questo può comportare difficoltà di combustione della seconda iniezione. Confrontando le simulazioni di due strategie di iniezione (pilota standard e pilota+main+main+post) si osserva una riduzione del picco del rilascio del calore e, quindi, della massima temperatura. Ciò comporta bassi gradienti della pressione e, quindi, meno rumore di combustione. L'interruzione dell'iniezione ha due effetti: rende più magra la miscela e abbassa il rilascio di calore tra le due iniezioni riducendo di conseguenza la massa di miscela ad elevata temperatura. Gli NO_x, quindi, si riducono. La riduzione del soot è, invece, legata alla possibilità di iniettare il combustibile nel momento in cui una maggiore quantità di ossigeno è disponibile per la combustione. In tali simulazioni il ritardo minimo ottenibile con gli attuali iniettori sembra rappresentare una limitazione. Ulteriori simulazioni dimostrano che l'inclinazione dello spray esercita un'influenza secondaria nella produzione delle emissioni.

1.4 Finalità del presente lavoro

In definitiva, nonostante le precedenti analisi condotte sulle iniezioni multiple, rimangono ancora numerosi problemi riguardanti la progettazione di una strategia di iniezione ottimale, che permetta il controllo delle emissioni e dei consumi, specialmente per quanto riguarda i piccoli motori Diesel. Lo scopo di questo lavoro è, quindi, offrire un contributo al fine di definire migliori strategie di iniezione, analizzando l'influenza di differenti parametri di iniezione sulle emissioni e le prestazioni di un motore Diesel ad iniezione diretta per autovetture equipaggiato con un sistema di iniezione common rail.

L'analisi dei lavori precedenti suggerisce che un modo efficace per ottenere una miscela magra prima dell'accensione è iniettare una piccola quantità di combustibile fortemente anticipata rispetto al PMS (iniezione early). D'altra parte, considerando che l'accensione deve avvenire nelle vicinanze del PMS in modo da non penalizzare i consumi specifici, l'iniezione di una ulteriore quantità di combustibile (iniezione pilota) giusto prima dell'iniezione principale potrebbe permettere un controllo migliore dell'accensione stessa. In questo caso, infatti, in base a quanto richiamato

precedentemente, il ritardo di accensione dell'iniezione pilota non sarà molto lungo, e la sua combustione controllerà anche il ritardo di accensione dell'iniezione principale. La quantità di combustibile rimanente, ovvero l'iniezione principale, sarà iniettata dopo l'iniezione pilota. La prima parte della combustione, pertanto, riguarderà una miscela globalmente e localmente magra. Il ritardo di accensione di tale miscela è controllato in modo da controllare la velocità di formazione degli NO_x mediante l'iniezione pilota; di conseguenza, ci si aspetta una riduzione della quantità di combustibile iniettato durante l'iniezione principale, ed una conseguente diminuzione delle zone con presenza di miscela ricca; i livelli attesi di particolato sono quindi più bassi anch'essi.

Le strategie di iniezione basate sull'utilizzo delle iniezioni early, pilota e principale saranno, pertanto, confrontate con le strategie più tradizionali che utilizzano solo una tra la early e la pilota, accoppiata sempre con l'iniezione principale. Tale confronto sarà effettuato in corrispondenza di varie condizioni operative del motore. Saranno, inoltre, valutati gli effetti dei parametri delle iniezioni, quali durata dell'iniezione early, durata ed anticipo dell'iniezione pilota, ed anticipo dell'iniezione principale, sulle emissioni inquinanti allo scarico, in termini di NO_x, particolato e THC, sui consumi specifici e sui livelli di rumore di combustione.

Bibliografia

1. De Risi, A., Donateo, T., and Laforgia, D., "Optimization of the Combustion Chamber of Direct Injection Diesel Engines", SAE Paper 2003-01-1064, 2003.
2. J. B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1988.
3. Dürnholz, M., Endres, H., and Frisse, P., "Preinjection A measure to Optimize the Emission Behavior of DI-Diesel Engine", SAE Paper 940674, 1994.
4. Nehmer, D. A., and Reitz, R. D., "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NO_x Emissions", SAE Paper 940668, 1994.
5. Venkatesan, C. P., and Abraham, J., "An Investigation of the Dependence of NO and Soot Emissions from a Diesel Engine on Heat Release Rate Characteristics – I", SAE Paper 2000-01-0509, 2000.
6. Kong, S., Ricart, L. M., Reitz, R. D., "In-Cylinder Diesel Flame Imaging Compared with Numerical Computations", SAE Paper 950455, 1995.
7. Badami, M., Nuccio, P., and Trucco, G., "Influence of Injection Pressure on the Performance of a DI Diesel Engine with a Common Rail Fuel Injection System", SAE Paper 1999-01-0193, 1999.
8. Lapuerta, M., Armas, O., Hernandez, J. J., "Effect of the Injection Parameters of a Common Rail Injection System on Diesel Combustion Though Thermodynamic Diagnosis", SAE Paper 1999-01-0194, 1999.
9. Tennison, P. J., and Reitz, R. D., "An Experimental Investigation of the Effects of Common-Rail Injection System Parameters on Emissions and Performance in a High-Speed Direct-Injection Diesel Engine", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, January 2001, Vol.123, pp. 167-174.
10. Koyanagi, K., Öing, H., Renner, G., and Maly, R., "Optimizing Common Rail-Injection by Optical Diagnostics in a Transparent Production Type Diesel Engine", SAE Paper 1999-01-3646, 1999.

11. Chi, Y., Cheong, J., Kim, C., and Choi, K., "Effects of VGT and Injection Parameters on Performance of HSDI Diesel Engine with Common Rail FIE System", SAE Paper 2002-02-0504, 2002.
12. Bianchi, G. M., Pelloni, P., Corcione, F. E., and Luppino, F., "Numerical Analysis of Passenger Car HSDI Diesel Engines with the 2nd Generation of Common Rail Injection Systems: The Effect of Multiple Injections on Emissions", SAE Paper 2001-01-1068, 2001.
13. Montgomery, D.T., and Reitz, R. D., "Six-Mode Cycle Evaluation of the Effect of EGR and Multiple Injections on Particulate and NO_x Emissions from a D.I. Diesel Engine", SAE Paper 960316, 1996.
14. Pierpont, D. A., Montgomery, D. T., and Reitz, R. D., "Reducing Particulate and NO_x Using Multiple Injections and EGR in a D.I. Diesel", SAE Paper 950217, 1995.
15. Chan, M., Das, S., Reitz, R. D., "Modeling Multiple Injection and EGR Effects on Diesel Engine Emissions", SAE Paper 972864, 1997.
16. Takeda, Y., and Niimura, K., "Characteristics of Diesel Combustion and Emissions with a Multi-Injector System", SAE Paper 952511, 1995.
17. Kimura, S., Aoki, O., Ogawa, H., Muranaka, S., and Enomoto, Y., "New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficienty Small DI Diesel Engines", SAE Paper 1999-01-3681, 1999.
18. Kimura, S., Ogawa, H., Matsui, Y., Enomoto, Y., "An Experimental analysis of low-temperature and premixed combustion for simultaneous reduction of NO_x and particulate emissions in direct injection diesel engines", JER 02002, 2002, Vol 3, No 4, pp. 249-259.
19. Uludogan, A., and Reitz, R. D., "Exploring the Use of Multiple Injectors and Split Injection to Reduce DI Diesel Engine Emissions", SAE Paper 962058, 1996.
20. Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., and Aiyoshizawa, E., "Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards", SAE Paper 2001-01-0200, 2001.
21. Miyamoto, T., Harada, A., Sasaki, S., Akagawa, H., and Tujimura, K., "A Computational Investigation of Premixed Lean Diesel Combustion – Characteristics of Fuel-Air Mixture Formation, Combustion and Emissions", SAE Paper 1999-01-0229, 1999.

22. Harada, A., Shimazaki, N., Sasaki, S., Miyamoto, T., Akagawa, H., Tsujimura, K., "The Effects of Mixture Formation on Premixed Lean Diesel Combustion", SAE Paper 980533, 1998.
23. Akagawa, H., Miyamoto, T., Harada, A., Sasaki, S., Shimazaki, N., Hashizume, T., and Tsujimura, K., "Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Diesel Combustion", SAE Paper 1999-01-0183, 1999.
24. Takeda, Y., Keiichi, N., and Keiichi N., "Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion with Extremely Early Staged Fuel Injection", SAE Paper 961163, 1996.
25. Zhang, L., "A Study of Pilot Injection in a DI Diesel Engine", SAE Paper 1999-01-3493, 1999.
26. Ricart, L., and Reitz, R. D., "Visualization and Modeling of Pilot Injection and Combustion in Diesel Engines", SAE Paper 960833, 1996.
27. Erlach, H., Chmela, F., Cartellieri, W., Herzog, P., "Pressure Modulated Injection and Its Effect on Combustion and Emissions of a HD Diesel Engine", SAE Paper 952059, 1995.
28. Badami, M., Millo, F., and D'Amato, D., "Experimental Investigation on Soot and NO_x Formation in a DI Common Rail Diesel Engine with Pilot Injection", SAE Paper 2001-01-0657, 2001.
29. Schmid, M., Leipertz, A., and Fettes, C., "Influence of Nozzle Hole Geometry, Rail Pressure and Pre-Injection on Injection, Vaporisation and Combustion in a Single-Cylinder Transparent Passenger Car Common Rail Engine", SAE Paper 2002-01-2665, 2002.
30. Ishida, M., Chen, Z., Luo, G., Ueki, H., "The Effect of Pilot Injection on Combustion in a Turbocharged D.I. Diesel Engine", SAE Paper 941692, 1994.
31. Minami, T., Takeuchi, K., and Shimazaki, N., "Reduction of Diesel Engine NO_x Using Pilot Injection", SAE Paper 950611, 1995.
32. Chen, S. K., "Simultaneous Reduction of NO_x and Particulate Emissions by Using Multiple Injections in a Small Diesel Engine", SAE Paper 2000-01-3084, 2000.
33. Benajes, J., Molina, S., and Garcia, J. M., "Influence of Pre- and Post-Injection on the Performance and Pollutant Emissions in a HD Diesel Engine", SAE Paper 2001-01-0526, 2001.

34. Tow, T. C., Pierpont, D. A., and Reitz, R. D., "Reducing Particulate and NO_x Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine", SAE Paper 940897, 1994.
35. Mishimura, T., Satoh, K., Takahashi, S., and Yokota, K., "Effects of Fuel Injection Rate on Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine", SAE Paper 981929, 1998.
36. Uchida, N., Shimokawa, K., Kudo, Y., and Shimoda, M., "Combustion Optimization by Means of Common Rail Injection System for Heavy-Duty Diesel Enigines", SAE Paper 982679, 1998.
37. Jaeger, L. W., Boulouchos, K., Mohr, M., "Analysis of Factors Influencing Particulate Matter Emissions of a Compression-Ignition Direct-Injection Engine", SAE Paper 1999-01-3492, 1999.
38. Carlucci, P., Ficarella, A., Laforgia, D., "Effects of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common Rail Diesel Engines", SAE Paper 2003-01-0700, 2003.
39. Han, Z., Uludogan, A., Hampson, G. J., and Reitz, R. D., "Mechanism of Soot and NO_x Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine", SAE Paper 960633, 1996.
40. Payri, F., Benajes, J., Pastor, J. V., and Molina, S., "Influence of the Post-Injection Patter on Performance, Soot and NO_x Emissions in a HD Diesel Engine", SAE Paper 2002-01-0502, 2002.
41. Hashizume, T., Miyamoto, T., Akagawa, H., and Tsujimura, K., "Combustion and Emission Characteristics of Multiple Stage Diesel Combustion", SAE Paper 980505, 1998.
42. Odaka, M., Suzuki, H., Koike, N., and Ishii, H., "Search for Optimizing Control Method of Homogeneous Charge Diesel Combustion", SAE Paper 1999-01-0184, 1999.
43. Yokota, H., Kudo, Y., Nakajima, H., Kakegawa, T., and Suzuki, T., "A New Concept for Low Emission Diesel Combustion", SAE Paper 970891, 1997.
44. Badami, M., Mallamo, F., Millo, F., and Rossi, E. E., "Influence of Multiple Injection Strategies on Emissions, Combustion Noise and BSFC of a DI Common Rail Diesel Engine", SAE Paper 2002-01-0503, 2002.