

Brevi considerazioni sui sistemi di iniezione diretta GDI

Nella figura 1 che segue si riporta a grandi linee lo sviluppo del sistema di alimentazione nei motori ad accensione comandata

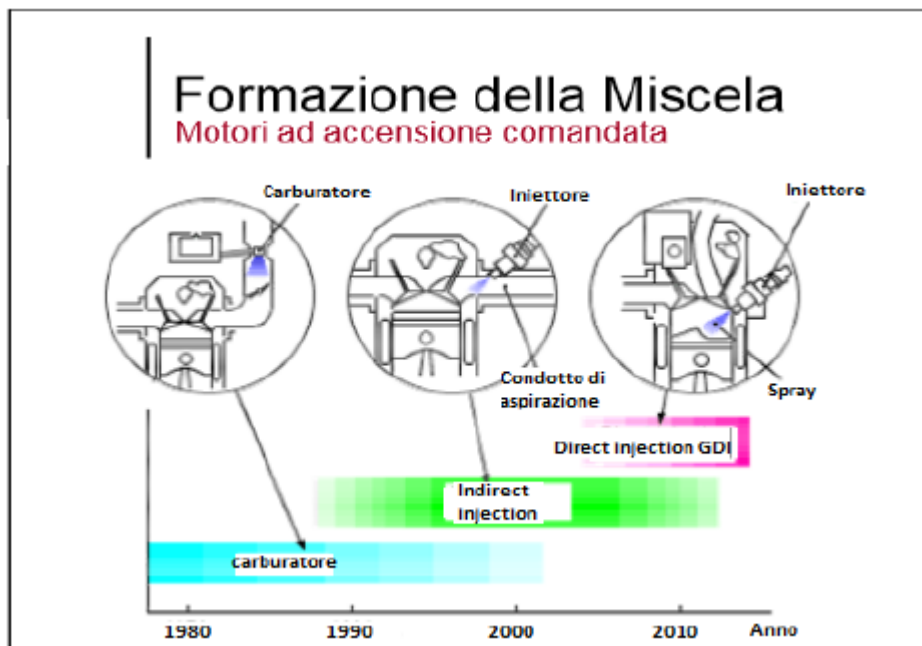


Figura 1.- Sviluppo del sistema di alimentazione nei motori ad accensione comandata

Nella figura 2 che segue si riporta uno schema di installazione di un iniettore in un sistema di iniezione indiretta (PFI) che è caratterizzato da pressioni di iniezione basse (3÷5 bar).

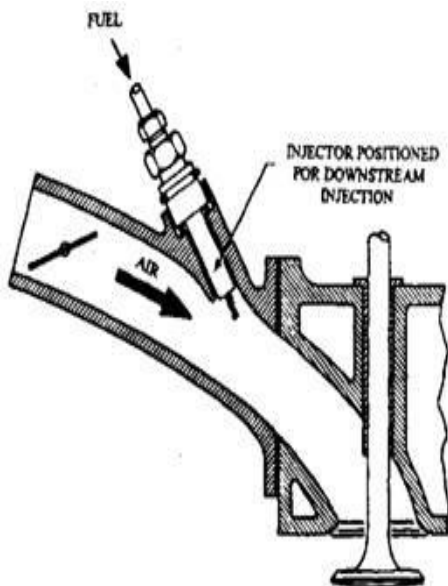


Figura 2: Sistema ad iniezione indiretta

Nella figura 3 si riporta lo schema di installazione di un iniettore del tipo diretto, caratterizzato da pressioni di iniezione alte (100÷200 bar).

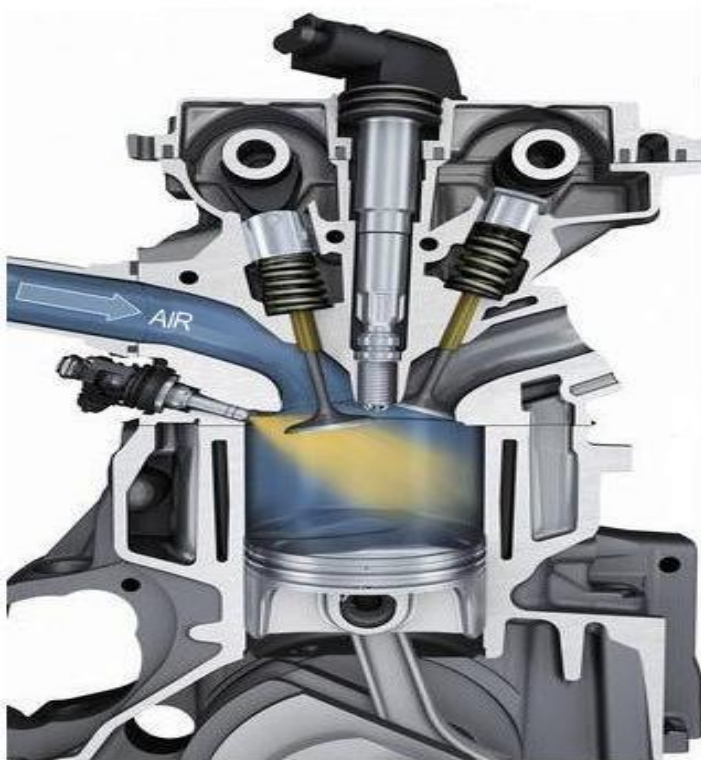


Figura 3 : Sistema ad iniezione diretta

Il sistema ad iniezione diretta GDI presenta tuttavia alcuni importanti inconvenienti:

- essendo le pressioni di iniezione elevate per permettere l'atomizzazione ed il miscelamento in tempi brevi, il sistema è più complesso e costoso;
- possibili malfunzionamenti del sistema a causa delle incrostazioni che si formano sugli iniettori;
- difficoltà di natura tecnologica nella realizzazione della pompa di iniezione dato che la benzina, avendo una viscosità molto bassa, non lubrifica le parti in movimento;
- difficoltà nel posizionamento dell'iniettore, sia perché si deve tenere in conto della posizione della candela, sia perché si deve evitare di distruggere il velo di lubrificante del cilindro;
- non è possibile raggiungere elevati regimi di rotazione del motore perché altrimenti non si avrebbe il tempo necessario ad una corretta vaporizzazione e miscelazione del carburante con il comburente;
- c'è il rischio di impingement del combustibile sulle pareti del cilindro, soprattutto in condizioni di partenza a freddo, che comporta la mancata evaporazione del combustibile, incrementando in questo modo le emissioni di idrocarburi incombusti HC;
- in caso di funzionamento con carica stratificata, essendo alto il tenore d'ossigeno in una zona della camera di combustione, c'è una forte tendenza alla formazione di NO_x che il

normale catalizzatore a tre vie non riesce ad abbattere. E' necessario in questo caso intervenire con catalizzatore De-NO_x, "pregiato" e quindi costoso.

I motori ad accensione comandata ad iniezione diretta possono lavorare sia con una carica omogenea che con una carica stratificata.

Si distinguono allora tre principali modalità di funzionamento a seconda del carico motore:

- a pieno carico si effettua *l'iniezione anticipata* ovvero il combustibile viene iniettato già durante la fase di aspirazione in modo tale da ottenere una miscela omogenea e stechiometrica (o ricca se si vuole massimizzare la potenza), in analogia ai motori PFI in ogni condizione di carico;
- in condizioni di medio/basso carico si realizza la *carica semistratificata* ovvero una miscela tanto più ricca quanto più si è vicini agli elettrodi della candela. In questo modo è possibile accendere anche una miscela con un alto rapporto aria/combustibile complessivo;
- a bassi carichi si realizza un'*iniezione ritardata* ovvero il combustibile viene iniettato in camera di combustione solo durante la fase di compressione, realizzando una miscela stratificata. Si realizza in questo modo una combustione stabile che per miscele omogenee con lo stesso rapporto globale di miscela non si potrebbe realizzare, per il superamento dei limiti di infiammabilità della stessa. Tuttavia, essendo molto brevi i tempi di realizzazione del processo di stratificazione, è importante realizzare la giusta fluidodinamica interna, l'opportuna geometria della camera di combustione e scegliere la corretta tipologia di iniettore da utilizzare affinché vengano raggiunti risultati soddisfacenti.

I vantaggi più significativi in termini di rendimento si realizzano comunque con una stratificazione di una miscela complessivamente povera. E' possibile infatti in questo caso eliminare la valvola a farfalla e realizzare il giusto rapporto di miscela dosando la quantità di combustibile iniettata, ottenendo i seguenti risultati:

- diminuzione del lavoro di pompaggio per le minori perdite di carico dovute all'assenza della valvola a farfalla;
- temperature di combustione più basse per l'elevato eccesso d'aria e dunque, per i motivi spiegati precedentemente, minore dissociazione dei prodotti di combustione, con conseguente aumento dell'aliquota di calore trasformabile in lavoro;
- minori scambi termici con le pareti del cilindro, sia per le più basse temperature dei gas combusti, sia per l'effetto di schermo realizzato dall'aria;

- regnando nel cilindro una pressione più alta rispetto al caso in cui sia presente la valvola a farfalla, migliora la fase di lavaggio del cilindro con conseguente diminuzione dell'aliquota di gas combusti presenti in camera e quindi miglioramento del coefficiente di riempimento;
- è possibile ricircolare un'aliquota maggiore dei gas combusti (Exhaust Gas Recirculation: EGR), con conseguente riduzione delle emissioni di NO_x , grazie al fatto che, in regime di carica stratificata, la combustione si sviluppa più rapidamente e con maggiore stabilità.

Affinché la stratificazione della carica avvenga con successo è necessario tenere conto dei campi di moto dell'aria all'interno del cilindro, dell'evoluzione temporale dello spray e dell'efficienza della combustione. Esistono diverse soluzioni per convogliare il combustibile in prossimità degli elettrodi della candela; tali soluzioni si dividono in tre categorie (figura 4):

- *wall guided*;
- *air guided*;
- *spray guided*.

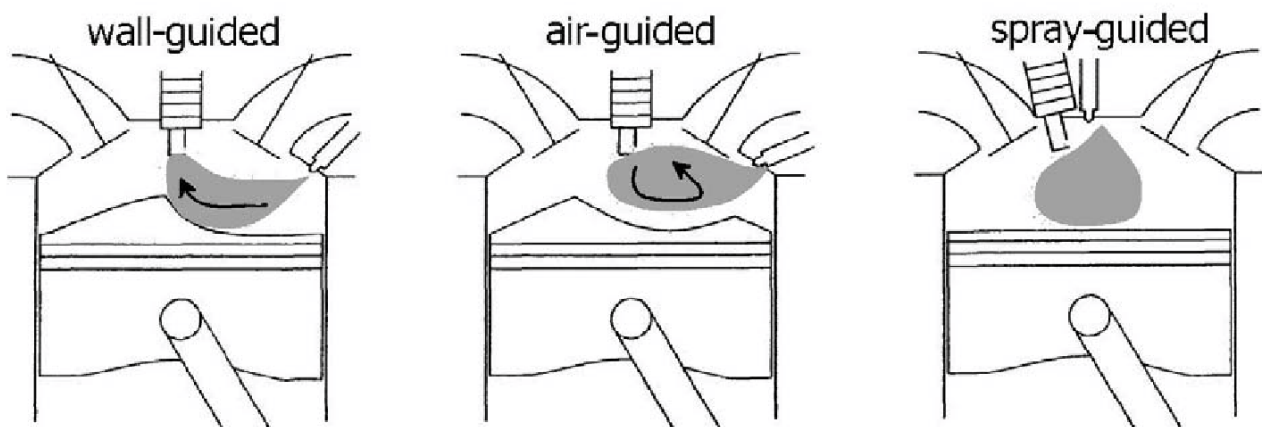


Figura 4: Strategie di stratificazione della miscela

Nella soluzione *wall guided* il combustibile viene guidato attraverso la geometria della camera di combustione, in particolare quella del pistone, verso gli elettrodi della candela, tenendo conto anche dell'opportuno posizionamento dell'iniettore e della candela. Con tale soluzione il problema maggiore risulta essere quello dell'impingement dato che il combustibile impattato con le pareti fredde può non evaporare e dar luogo successivamente ad un'elevata quantità di idrocarburi incombusti. Sperimentalmente si è visto che iniettando il combustibile perpendicolarmente al pistone in condizioni di temperatura e pressione ambiente, solo il 5% della quantità iniettata forma un film liquido; in condizioni di temperatura e pressione tipiche di quelle di un motore a benzina, si vengono a formare particelle di diametro intorno ai $9\ \mu\text{m}$ che, per le loro piccole dimensioni, rimangono sospese e trascinate dall'aria. Con tale soluzione è importante aumentare la distanza tra

la punta dell'iniettore e gli elettrodi della candela affinché anche il combustibile impattato sulla parete raggiunga un giusto grado di evaporazione prima che avvenga l'accensione della miscela.

La soluzione *air guided* nasce per risolvere i problemi di impingement della soluzione precedente in quanto, in questo caso, la miscela verrà stratificata grazie al campo di moto realizzato con l'aria, interponendo dunque uno strato d'aria tra combustibile e pareti. Tale soluzione è difficile da mettere in pratica poiché è difficile controllare i moti d'aria in camera di combustione, soprattutto a bassi numeri di giri quando l'energia cinetica si riduce.

Con la soluzione *spray guided* si cerca di realizzare un auto confinamento dello spray tramite l'uso di opportuni iniettori per ottenere uno spray stabile ed insensibile ai moti d'aria. Questa soluzione presenta però un inconveniente: durante la fase di combustione i primi gas combusti, espandendo, portano la benzina circostante ad entrare in contatto con le pareti, facendola condensare (quenching) e dando origine alla formazione di idrocarburi incombusti.

Si capisce dunque che la distinzione tra le tre soluzioni è puramente teorica, in quanto, in genere, nei sistemi reali la stratificazione della carica si ottiene attraverso un'opportuna combinazione di questi tre metodi.

Oltre al diverso tipo di iniettore ed al suo posizionamento direttamente in camera di combustione, l'impianto ad iniezione diretta si distingue da quello PFI per altri dispositivi: l'elettrovalvola di ricircolo dei gas esausti (EGR) (presente anche nei moderni motori PFI, ma indispensabile nei GDI), il catalizzatore De-NO_x, la valvola a farfalla servo assistita, la pompa ad alta pressione, la sonda lambda proporzionale (LSU).

La valvola EGR (figura 5) è indispensabile nei motori ad iniezione diretta a causa dell'elevata quantità di NO_x prodotta, dovuta all'elevato eccesso d'aria in condizioni di funzionamento con carica stratificata. C'è da dire che comunque un motore GDI emette minori quantità di NO_x rispetto ad un motore PFI non catalizzato, grazie al fatto che le temperature in camera di combustione sono più basse. Gli ossidi di azoto si formano in quanto, alle elevate temperature, l'azoto cessa di essere un gas inerte e partecipa alle reazioni di ossidazione. Questo effetto è amplificato delle reazioni di dissociazione dei prodotti della combustione, che, sempre ad alta temperatura, mettono a disposizione un'elevata quantità di ossigeno libero. Finché il carico rimane basso e quindi anche le temperature sono basse, la produzione di ossidi di azoto è modesta ma superata una certa soglia è necessario, per poter rispettare le normative, passare repentinamente alla modalità di funzionamento con titolo stechiometrico, in modo da permettere al catalizzatore trivalente di ridurre gli NO_x. Per potere estendere il regime di funzionamento con carica stratificata si interviene con il sistema di

ricircolo del gas esausti (EGR), che consente di avere due effetti positivi: in primo luogo i gas esausti si sostituiscono alla carica fresca, diminuendo il tenore di ossigeno libero disponibile per la formazione di ossidi di azoto; inoltre, essendo tali gas inerti, rallentano la reazione di combustione interponendosi tra combustibile e comburente, abbassando i picchi di temperatura responsabili della formazione degli NO_x . Per immettere nel condotto di aspirazione la giusta quantità di gas di scarico da ricircolare, in relazione al carico, al regime di rotazione del motore e al titolo presente in camera di combustione, si rende necessario l'utilizzo della valvola EGR, che viene attuata da un motore elettrico passo-passo (stepper motor) sotto comando dell'unità di controllo elettronica (ECU). L'utilizzo dell'EGR porta anche ad una più rapida evaporazione della benzina a causa delle più alte temperature medie presenti in camera. Inoltre, anche se si opera con grandi quantità di gas esausti, la combustione è garantita dal fatto che in prossimità degli elettrodi la miscela è ricca di carburante. In quest'ultimo caso tuttavia, anche se diminuisce la quantità di ossidi di azoto prodotti, la qualità della combustione diminuisce, aumentando la formazione di idrocarburi e comportando un aumento dei consumi.

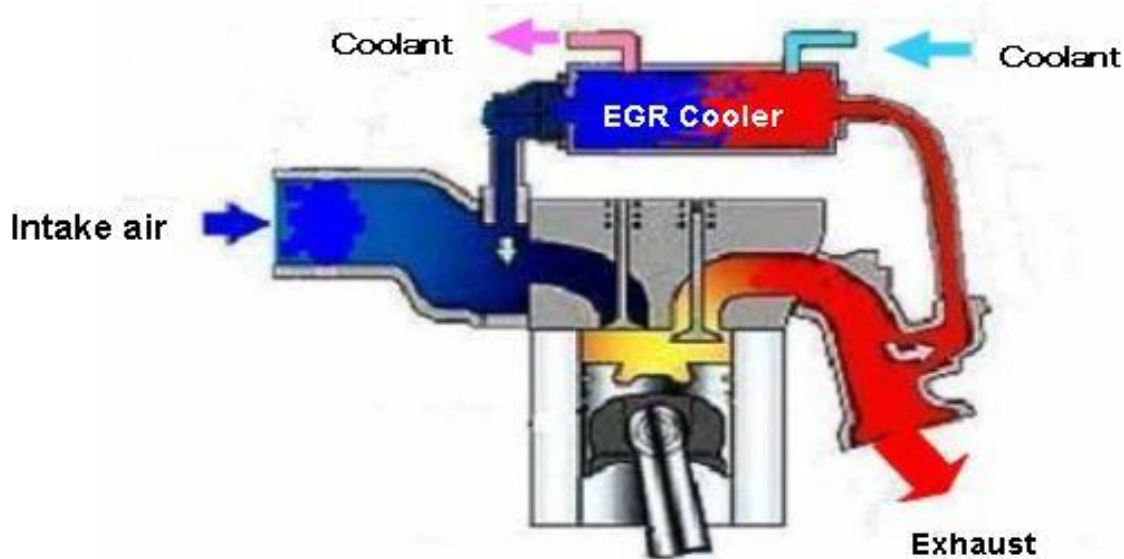


Figura 5: Sistema EGR

L'utilizzo del solo EGR non permette di ridurre le emissioni di NO_x in tutto il campo di funzionamento del motore in maniera tale da rispettare le normative vigenti, per cui è necessario trattare i gas combusti attraverso un apposito catalizzatore. Sono quindi stati introdotti i catalizzatori De- NO_x che permettono la riduzione di tali ossidi anche in ambiente ricco d'ossigeno, cosa che un normale catalizzatore trivalente non riesce a fare. Tali catalizzatori, che contengono palladio, platino, rame ed un composto a base di bario, utilizzano gli idrocarburi incombusti HC prodotti dal motore per ridurre gli NO_x : in particolar modo, se tali idrocarburi sono prodotti durante il normale funzionamento del motore, si parla di sistema passivo; si definiscono sistemi attivi quelli in cui

invece gli idrocarburi sono formati tramite una post iniezione durante la fase di espansione o, in casi particolari, iniettando direttamente nel collettore di scarico (con quest'ultima tipologia di sistemi vanno però ad aumentare i consumi di carburante). Dal momento che gli HC, oltre a legare con gli ossidi di azoto, legano anche con l'ossigeno, si pone il catalizzatore De-NO_x prima di quello trivalente per fare in modo che il rapporto HC/NO_x sia elevato e quindi l'efficienza del catalizzatore non sia bassa. Inoltre il De-NO_x non deve essere montato in prossimità delle valvole di scarico in quanto alle alte temperature si comprometterebbe il funzionamento dello stesso. Quest'ultimo accorgimento entra in contrasto con l'ossidazione degli HC nelle partenze a freddo, che rende necessario porre un catalizzatore trivalente in prossimità delle valvole di scarico. Per questo motivo lo sviluppo del catalizzatore De-NO_x è stato fortemente penalizzato.

L'efficienza massima dei De-NO_x si aggira intorno al 65% in campo di temperatura molto limitato, tra i 300 °C ed i 400 °C (figura 6, catalyst A), per cui è possibile lavorare con una buona efficienza con carica stratificata in un ristretto campo di funzionamento. Sono quindi stati introdotti gli NO_x Storage Catalyst che presentano un'efficienza maggiore in un campo di temperature più elevato (figura 6, catalyst B).

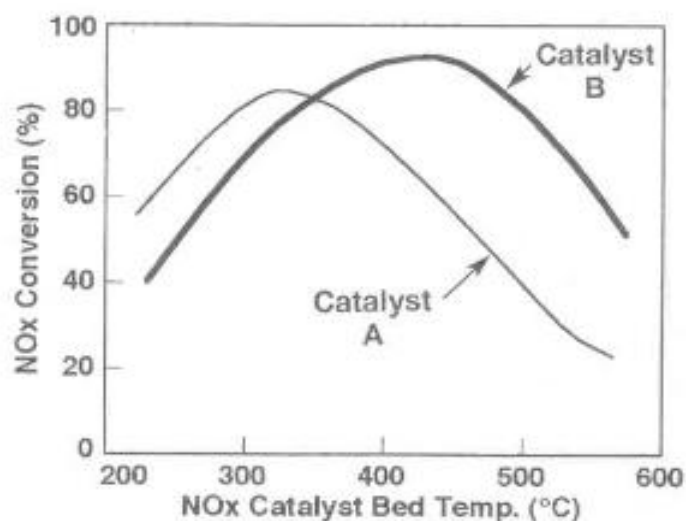


Figura 6: Efficienza dei catalizzatori De-NO_x

La pompa ad alta pressione viene calettata direttamente sull'albero a camme, come in figura 7.

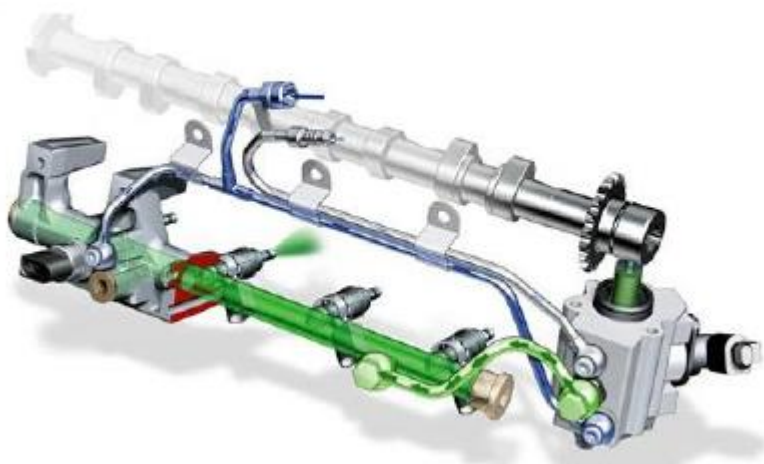


Figura 7: Pompa di alta pressione

Seguono alcune immagini di sprays ottenuti con un sistema di iniezione diretta sperimentato all'interno di una camera con accessi ottici, nella quale era possibile variare la pressione dell'aria all'interno e la temperatura iniziale del combustibile iniettato. Nella figura 8 si riporta l'immagine di uno spray in condizioni normali e in condizioni di flash boiling

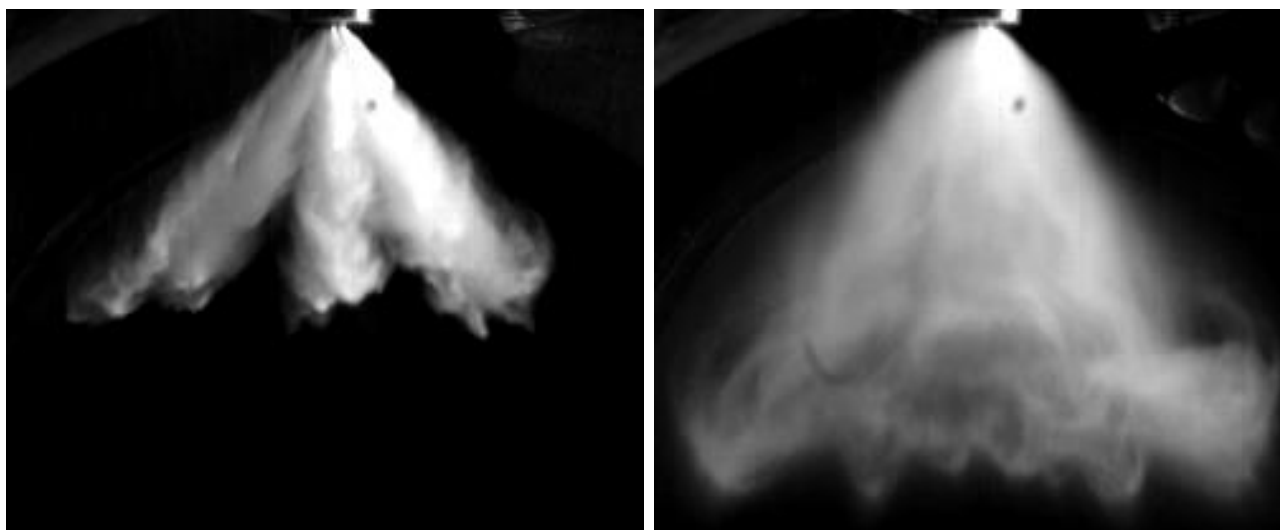


Figura 8: Immagine di uno spray in condizioni di flash boiling (a destra) e convenzionali (a sinistra)

L'iniettore utilizzato per le prove è un iniettore multi foro ad iniezione diretta GDI. In particolare, l'iniettore (figura 9) presenta 8 fori che portano alla formazione di uno spray di forma circolare. La forma dei condotti di iniezione è cilindrica ovvero tali condotti non sono né convergenti né divergenti. In condizioni standard, definite dal costruttore, tale iniettore presenta l'angolo di apertura dello spray di 90° ed un flussaggio di $15 \text{ cm}^3/\text{s}$ sotto la pressione di iniezione di 10 MPa

(100 bar). Infine il rapporto L/D , ovvero il rapporto tra la lunghezza del condotto del foro ed il suo diametro è pari a 2.

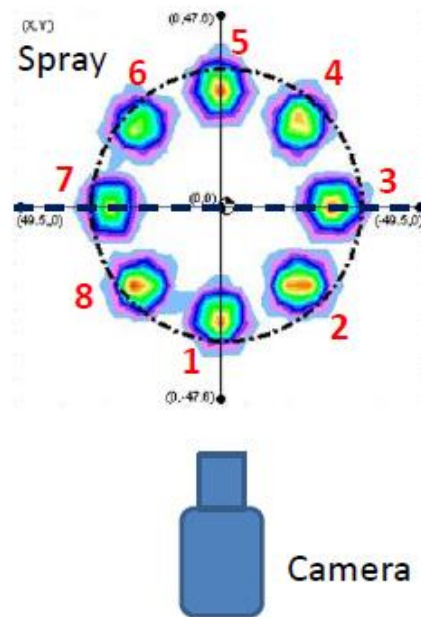


Figura 9: Impronta degli otto spray su un piano ortogonale all'asse dell'iniettore e posizione della telecamera di ripresa.

Nella figura 9 è mostrato come l'iniettore e quindi i singoli spray sono posizionati rispetto alla telecamera. Come si può notare, la telecamera è posizionata frontalmente allo spray e questo ha consentito di seguire in modo chiaro l'evoluzione spazio-temporale di quest'ultimo senza avere problemi di sovrapposizione con gli altri spray.

L'iniettore utilizzato è fisicamente mostrato in figura 10.



Figure 10: Iniettore GDI.

Nella figura 11 si riporta l'immagine di uno spray ottenuto nella camera di prova con la misura della penetrazione assiale dello stesso.

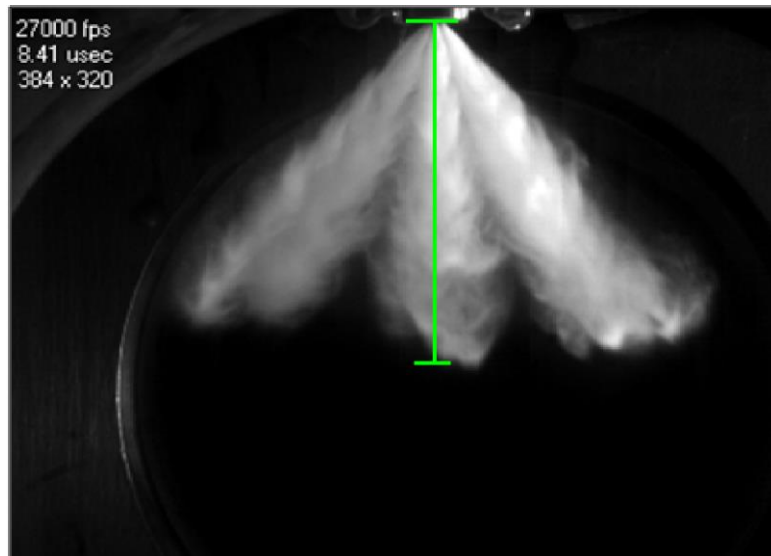


Figura 11: Metodologia per la misura della penetrazione assiale

Confrontando le immagini degli spray agli stessi istanti, con pressioni di iniezione di 20 MPa = 200 bar ma con diverse pressioni in camera, si nota come la penetrazione assiale aumenti nel passare dalla pressione in camera di 0.3 MPa = 3 bar (figura 12) a quella più bassa di 0.05 MPa = 0,5 bar (figura 14). La pressione in camera esercita infatti un effetto frenante per lo spray di combustibile quindi quanto più bassa sarà la contropressione tanto maggiore sarà la penetrazione; inoltre la più bassa contropressione comporta una maggiore dispersione del getto che quindi emette meno luce essendo meno denso.

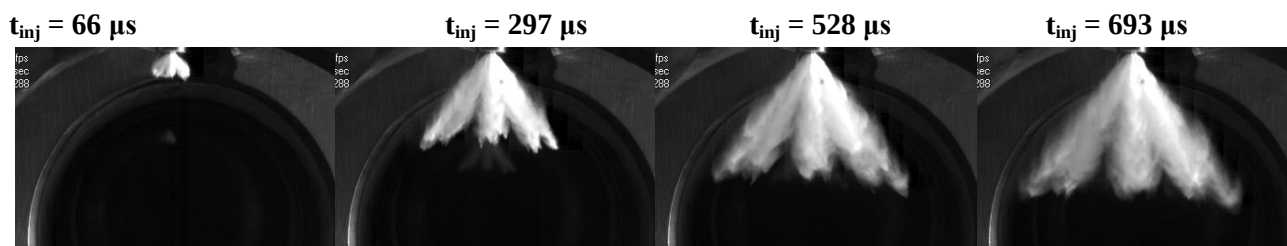


Figura 12: $P_{inj} = 20 \text{ MPa}$ – $P_{ch} = 0.3 \text{ MPa}$ – $T_{f-n} = 25 \text{ °C}$

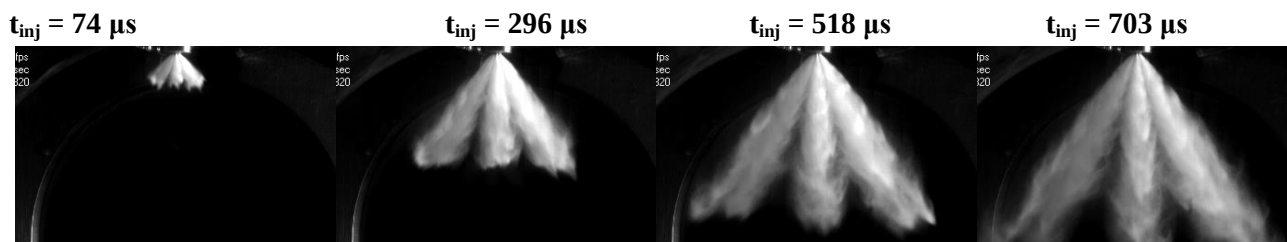


Figura 13: $P_{inj} = 20 \text{ MPa}$ – $P_{ch} = 0.1 \text{ MPa}$ – $T_{f-n} = 25 \text{ °C}$

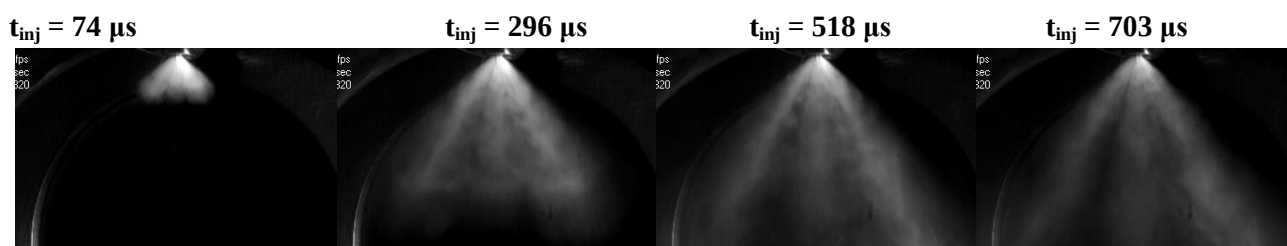


Figura 14: $P_{inj} = 20 \text{ MPa}$ – $P_{ch} = 0.05 \text{ MPa}$ – $T_{f-n} = 25 \text{ °C}$

Lo stesso comportamento è stato verificato per la pressione di iniezione di $10 \text{ MPa} = 100 \text{ bar}$ al variare della contropressione in camera (figure 15, 16 e 17). A parità di condizioni ambientali (temperatura e pressione), la diminuzione della pressione di iniezione ha comportato una riduzione della quantità iniettata, visto che si è tenuto costante il tempo di iniezione, e quindi agli stessi tempi lo spray appare meno penetrante e molto meno denso rispetto alle condizioni con la pressione di iniezione di 20 MPa .

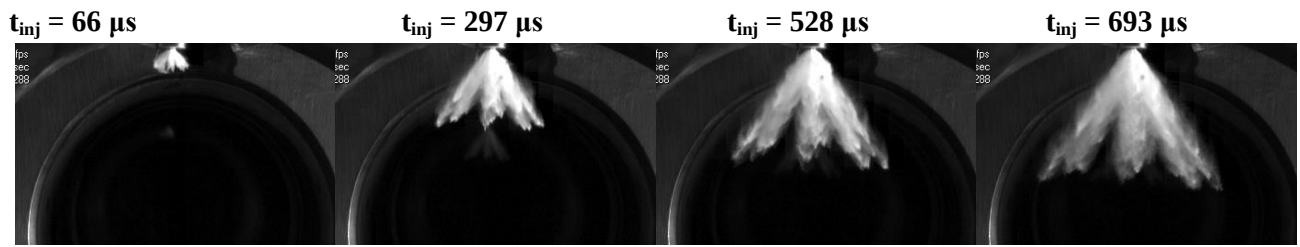


Figura 15: $P_{inj} = 10 \text{ MPa}$ – $P_{ch} = 0.3 \text{ MPa}$ – $T_{f-n} = 25 \text{ °C}$

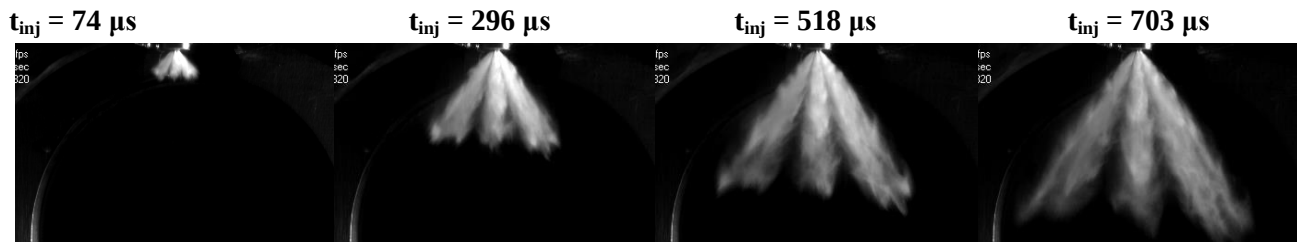


Figura 16: $P_{inj} = 10 \text{ MPa}$ – $P_{ch} = 0.1 \text{ MPa}$ – $T_{f-n} = 25 \text{ °C}$

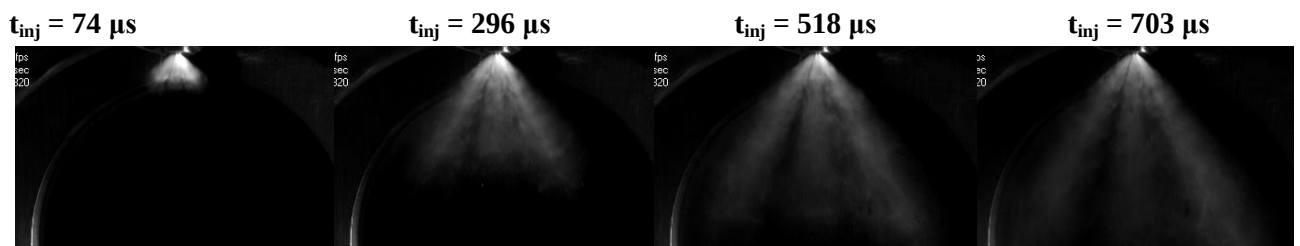


Figura 17: $P_{inj} = 10 \text{ MPa}$ – $P_{ch} = 0.05 \text{ MPa}$ – $T_{f-n} = 25 \text{ °C}$

Infine si riporta nella figura 18 la metodologia di misura dell'angolo di cono del getto ottenuto in condizioni normali o in condizioni di flash boiling.

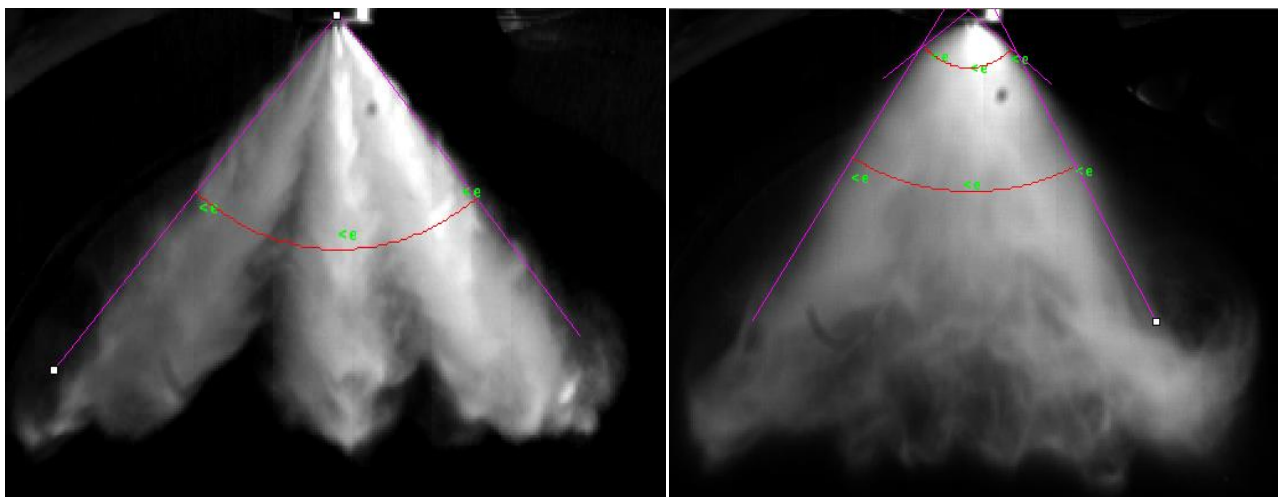


Figura 18: Misura dell'angolo di cono in condizioni "convenzionali" (sinistra) ed di flash boiling (destra).

Le condizioni di flash boiling si verificano quando un liquido è rapidamente depressurizzato ad una pressione sufficientemente al di sotto della pressione di saturazione del liquido. La figura 19 mostra qualitativamente, sul piano pressione-entalpia, il paragone tra una iniezione in condizioni

convenzionali ed un'iniezione in condizioni di flash boiling di combustibile liquido monocomponente.

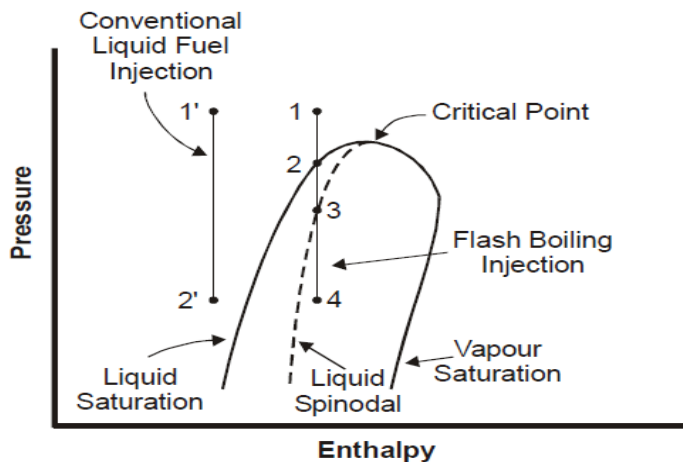


Figura 19: Confronto tra un'iniezione convenzionale ed una flash boiling

A differenza dell'iniezione convenzionale in cui il combustibile si trova inizialmente allo stato liquido (1') e permane in tale stato alla fine del processo (2'), nell'iniezione flash si suppone che il combustibile parta in condizioni liquide (1) ma, nell'attraversamento del nozzle, si vengano a formare gocce di vapore (2-3) che tendono a giungere ad una condizione di equilibrio con la fase liquida (4). In particolare, la vaporizzazione del liquido diventa estremamente rapida oltre il punto 3, il quale si trova sulla cosiddetta linea spinodale liquido.

La figura 20 mostra schematicamente il processo di flash boiling in prossimità del nozzle. Presso l'orifizio inizia la generazione di bolle di vapore, seguita dalla crescita delle bolle e dell'atomizzazione. Il flusso bifasico poi può propagare con un angolo di cono pressoché costante (primo regime) o con un'espansione verso l'esterno (secondo regime). Questo dipende dal rapporto di pressione che esiste tra la pressione nella camera e la pressione di iniezione stessa.

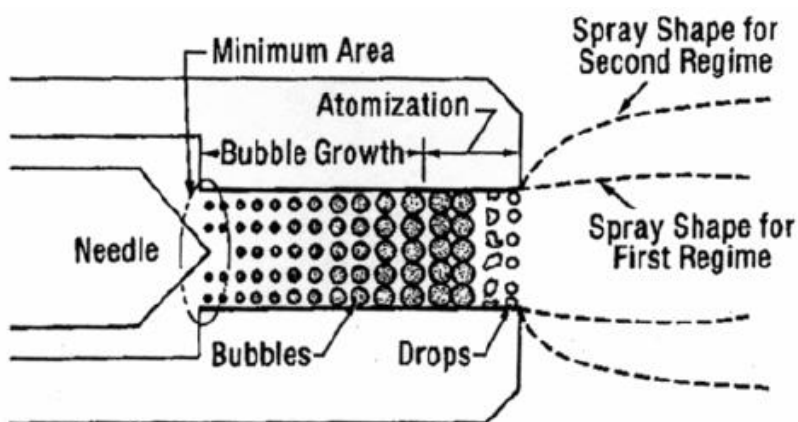


Figura 20: Iniezione flash boiling

Il processo di evaporazione flash può essere suddiviso in tre fasi:

- 1.- Bubble nucleation - 2.- Bubble growth - 3- Two-phase flow