



ScuDo

Scuola di Dottorato - Doctoral School

WHAT YOU ARE, TAKES YOU FAR

Tesi di Dottorato
Programma di Dottorato in Energetica (XXXI Ciclo)

Analisi di spray: Tecnica tomografica per il rilevamento meccanico della quantità di moto ed elaborazione di immagini digitali mediante trasformata di *Lòeve-Karhunen*

Di

Andrea Bottega

Tutor:

Prof. Claudio Dongiovanni

Revisori:

Prof. Daniele Fiaschi,
Prof. Antonio Andreini,

Università degli studi di Firenze
Università degli studi di Firenze

Politecnico di Torino
2019

Dichiarazione

Con la presente dichiaro che, i contenuti e l'organizzazione di questa tesi costituiscono la mia opera originale e non compromettono in alcun modo i diritti di terzi, compresi quelli relativi alla sicurezza dei dati personali.

.....

Andrea Bottega

Torino, Luglio 2019

Abstract

La presente tesi descrive lo sviluppo di due tecniche sperimentali per l'analisi di spray diesel.

Nella prima parte è descritto lo sviluppo di una tecnica intrusiva per l'analisi della distribuzione spaziale della quantità di moto di un getto attraverso la misura della forza di impatto. Il flusso di quantità di moto è, infatti, una delle principali proprietà fisiche alla base dell'evoluzione di getti e spray ed influenza profondamente le caratteristiche da questi assunte. L'idea alla base della tecnica proposta è quella di ricavare la distribuzione quantità di moto di un getto o spray, impattante su di una superficie piana attraverso la ricostruzione spaziale della pressione di impatto. Quest'ultima è ricavata a partire da un set di integrali di linea della distribuzione della pressione d'impatto lungo diverse direzioni, ottenute mediante un sensore appositamente sviluppato, ed implementando gli algoritmi di ricostruzione inversi tipici delle tecniche tomografiche. Le prestazioni del sensore sviluppato sono state teoricamente confrontate con quelle di un sensore di tipo puntuale ed il sensore proposto dimostra di essere in grado di cogliere un contenuto in frequenza maggiore nell'andamento della quantità di moto indagata. Infine, il sensore realizzato è stato impiegato per analizzare il flusso di quantità di moto di un getto d'aria in condizioni di post-espansione ed i corrispondenti modelli caratteristici della distribuzione della pressione di impatto sono stati ottenuti.

La seconda sezione riguarda la definizione di un algoritmo automatico per l'estrazione dei parametri macroscopici di uno spray diesel a partire da immagini digitali acquisite mediante tecniche ottiche di visualizzazione diretta (e.g. fotografia e cinematografia ad alta velocità). L'algoritmo proposto è basato sulla decomposizione di Løve-Karhunen, ovvero sull'analisi delle componenti principali, e rinuncia ad una trattazione tradizionale delle immagini, tipicamente fondata sull'analisi degli istogrammi dell'intensità luminosa, per un approccio di tipo algebrico. La tecnica permette di definire in modo automatico il livello di soglia ottimale con il quale effettuare la binarizzazione dell'immagine, ovvero la sua conversione da una scala di grigi ad un'immagine in bianco e nero. Mediante questa operazione è possibile isolare il soggetto, ovvero lo spray, dallo sfondo che lo circonda. Dall'immagine binarizzata è infine possibile estrarre i parametri macroscopici caratteristici dello spray quali la penetrazione e l'angolo di diffusione, di fondamentale importanza per valutare le prestazioni dell'iniettore e del processo di combustione. L'algoritmo di sogliatura proposto, ed una sua evoluzione definita sintetica, sono stati quindi impiegati per l'analisi di immagini di spray diesel automobilistici e confrontati con due dei principali algoritmi ad oggi impiegati.

Infine, è brevemente riportato lo sviluppo di un apparato sperimentale per l'analisi ottica di spray di iniettori common-rail per il settore della propulsione navale. Il banco realizzato permette di implementare le tecniche di visualizzazione ad alta velocità e di testare diversi pattern di illuminazione permettendo un confronto tra i diversi algoritmi di elaborazione al variare delle condizioni di illuminazione.

*...Scordando che poi infine tutti avremo
due metri di terreno...*

*Canzone di Notte n°2
Guccini*

Ringraziamenti

Innanzitutto, un sentito ringraziamento all'azienda OMT *Fuel Injection System*, in particolare nelle figure dell'Ing. Giovanni Musso e dell'Ing. Marco Coppo per avermi permesso di intraprendere questo percorso di crescita sia scientifica che personale.

Grazie mamma e papà per i sacrifici fatti, permettendomi di seguire la strada che mi sono scelto.

Grazie nonna Mariuccia, la curiosità che mi hai trasferito è il motore di ogni mia giornata. Anche se non ci sei più, so che saresti fiera di me (tatuaggio a parte <<...stupid!!>>) e mi tempestesti di domande su queste cose difficili.

Grazie Dani e Vale. L'amicizia che ci unisce rientra tra le cose a me più care. Dani continuo comunque ad odiarti dai corsi della magistrale.

Grazie Lello e Vale per avermi permesso di saccheggiare deliberatamente il vostro frigorifero svariate volte alla settimana, mandatemi un IBAN, seguirà bonifico.

Grazie Hamed per avermi mostrato l'Iran ed abbattuto tutti i pregiudizi che la società ci costruisce addosso.

Grazie a tutti gli amici torinesi, novaresi e non, per la spensierata compagnia di questi anni.

Grazie Riki e Rico so di poter contare sempre su di voi, comunque non so nemmeno se a Milano li facciano i dottorati di ricerca

Grazie Prof soprattutto per il supporto e per l'esempio datomi al di là della vastità delle lezioni tecniche quotidiane.

Grazie ai Nucleari, prima o poi vi restituirò quelle due o tre cose che mi avete prestato dal laboratorio. Grazie Rocco per avermi fatto sentire parte della Calabria, ora mi nutro di soli bianchetti. Grazie Giuseppe l'esperto e grazie a tutti i colleghi per l'atmosfera di amicizia prima che di lavoro che avete creato.

Ed alla fine di questi ringraziamenti, appositamente in fondo perché sai che mi piace farti impazzire, grazie Elisa. Grazie per avermi supportato ma soprattutto sopportato. Saperti al mio fianco è il conforto nelle difficoltà, la forza per rialzarsi, la gioia nella riuscita, il più bel premio ogni giorno, l'Amore

Grazie

Sommario

<i>Capitolo 1</i> Introduzione Generale	1
<i>Nomenclatura</i>	10
<i>Capitolo 2</i> Analisi Meccanica di Spray	11
2.1 Introduzione	13
2.2 Misura della quantità di moto	14
2.3 Sensori per la misura della distribuzione della QM	16
2.4 Idea alla base della tecnica SMSA	20
2.5 Prestazioni teoriche e simulazioni del sensore	24
2.5.1 Sensore puntuale ideale	27
2.5.2 Sensore puntuale reale	27
2.5.3 Sensore SMSA ideale	29
2.5.4 Sensore SMSA reale	31
2.6 Realizzazione del sensore	32
2.6.1 Versione 1.0	33
2.6.2 Versione 2.0	35
2.7 Analisi Sperimentale	36
2.7.1 Introduzione ai getti in post-espansione	36
2.7.2 Ugello Analizzato	40
2.7.3 Setup sperimentale	41
2.7.4 Procedura di prova	43
2.8 Risultati	44
2.8.1 Evoluzione della PI	44
2.8.2 Andamenti della PI	46
2.8.3 Direzione di evoluzione	51
2.8.4 Effetto della spaziatura Δx	53
2.8.5 Effetto inclinazione del piattello	57
2.8.6 Misura della QM globale	59
2.9 Conclusioni e sviluppi futuri	60
<i>Nomenclatura</i>	63

<i>Capitolo 3</i> Analisi Ottica di Spray	65
3.1 Introduzione.....	67
3.1.1 Penetrazione del fronte	68
3.1.2 Angolo di diffusione.....	68
3.2 Analisi ottica – visualizzazione diretta.....	69
3.2.1 Fotografia ad alta velocità	69
3.2.2 Cinematografia ad alta velocità	70
3.3 Algoritmi di elaborazione e problema della sogliatura	71
3.4 Algoritmo KLD ed Evoluzioni.....	78
3.4.1 Algoritmo KLD di sogliatura	79
3.4.2 Evoluzione Algoritmo KLD di Sogliatura.....	83
3.4.2 Algoritmo KLD Sintetico (KLDS).....	86
3.4.3 Procedura di elaborazione di un'immagine KLDS.....	89
3.5 Analisi Sperimentale.....	92
3.5.1 Setup Sperimentale	92
3.5.2 Condizioni operative.....	93
3.6 Risultati e discussione	93
3.6.1 Influenza numero di autovalori M^* e numero immagini database n	93
3.6.2 Confronto con metodo di Otsu e della Massima Entropia.....	100
3.6.4 Algoritmo KLD sintetico.....	104
3.7 Conclusioni e sviluppi futuri	107
<i>Nomenclatura</i>	109
<i>Capitolo 4</i> Apparato Sperimentale per l'analisi ottica di spray diesel	111
4.1 Introduzione.....	113
4.2 Analisi preliminari.....	113
4.2.1 Stima dell'area d'indagine.....	114
4.2.2 Definizione requisiti videocamera.....	115
4.3 Apparato Sperimentale	117
4.3.1 Camera di iniezione	117
4.3.2 Sistema di alimentazione olio.....	118
4.3.3 Sistema illuminamento LED	119
4.3.4 Sistema ricircolo e stoccaggio SF6.....	121

4.3.5 Videocamera e ottiche.....	122
4.3.6 Immagini Banco e Acquisizioni Preliminari.....	125
4.4 Conclusioni e sviluppi futuri.....	127
<i>Nomenclatura</i>	129
Conclusioni	131
Indice delle Figure.....	133
Bibliografia	137

Capitolo 1
Introduzione Generale

Il settore della propulsione navale ha vissuto negli ultimi vent'anni un periodo di grandi mutamenti la cui spinta principale deriva dall'introduzione delle regolamentazioni delle emissioni da parte dell'IMO (*International Maritime Organization*). Tali norme, conosciute come IMO TIER I, II e III, sono state ratificate da 53 dei 167 stati membri dell'organizzazione, che rappresentano circa l'82% del tonnellaggio mondiale della flotta in navigazione [1].

Le limitazioni riguardano principalmente le emissioni di ossidi di azoto, NO_x , che, dall'entrata in vigore del primo standard, hanno imposto una progressiva riduzione a circa un quinto del valore iniziale (Figura 1). Il rispetto di queste limitazioni rappresenta una vera e propria sfida considerato che all'epoca dell'entrata in vigore di tale normativa, nel 1998, le navi alimentate a MDO (*Marine Diesel Oil*) e HFO (*Heavy Fuel Oil*), ovvero i principali combustibili impiegati, erano ritenute responsabili per circa il 7% delle emissioni globali di NO_x , circa il 4% di quelle di SO_x , ed il 2% della globale emissione di CO_2 [2].

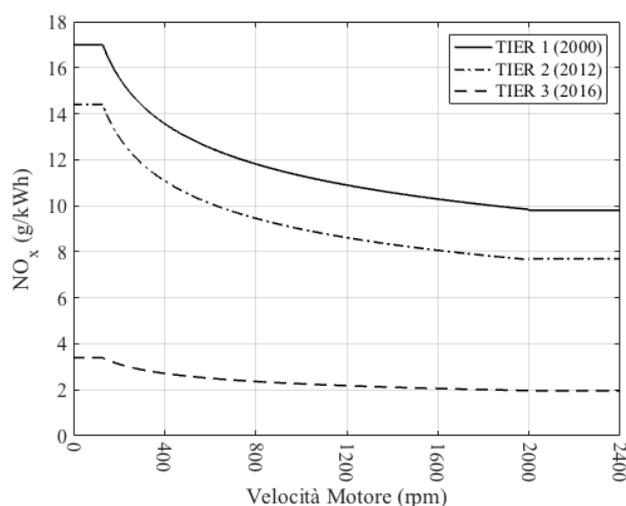


Figura 1 Massime Emissioni di NO_x per motori diesel marini

Come è evidente dalla Figura 1, il terzo standard ratificato, IMO TIER III, è quello maggiormente stringente ed è attualmente applicato alla navigazione nelle zone di mare definite ECAs (*Emission Control Areas*) riportate in Figura 2. Questo vincolo sulle emissioni deve essere, inoltre, rispettato da tutti i nuovi motori realizzati a partire dal 2016 e comunque, nelle zone di navigazione al di fuori delle ECAs continuano a valere le limitazioni dello standard IMO TIER II.

Oltre agli NO_x , le limitazioni riguardano anche le emissioni di ossidi di zolfo, SO_x , che si traducono, di fatto, in una restrizione circa il massimo contenuto di zolfo ammesso nei combustibili (Figura 3). Infine, ad oggi, ancora nessuna limitazione esiste circa le emissioni di CO_2 , complice il fatto che i motori diesel navali presentano l'efficienza maggiore tra i motori a combustione interna, ma non è da escludersi che in futuro verranno regolamentate anche queste.



Figura 2 Emission Control Areas

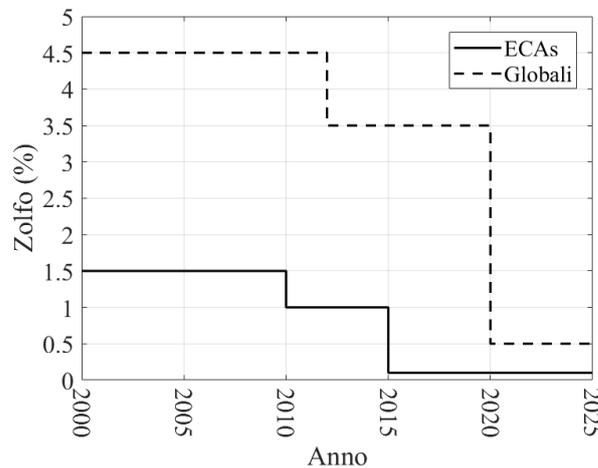


Figura 3 Contenuto di zolfo ammesso nei combustibili

Il contesto normativo discusso implica una radicale revisione dell'architettura dei motori e dei sistemi ausiliari per far fronte alle limitazioni imposte. Le principali soluzioni proposte a tal fine possono essere distinte sulla base della tipologia di emissione che si intende controllare: SO_x oppure NO_x .

Gli interventi volti alla riduzione degli SO_x sono figli del contenuto di zolfo del combustibile impiegato. È quindi possibile agire a posteriori mediante l'introduzione di sistemi atti alla desolforazione dei gas di scarico (*Scrubber*) oppure intervenire alla base impiegando combustibili dal basso contenuto di zolfo. Entrambe le soluzioni sono, tuttavia, particolarmente onerose. Le prime comportano l'aumento della complessità del sistema di propulsione e, inoltre, richiedono notevoli spazi di installazione; le seconde influiscono direttamente sui costi di funzionamento essendo i combustibili a basso contenuto di zolfo pregiati, al punto che il loro impiego è giustificato unicamente nelle ECAs, dove altre soluzioni non garantirebbero il rispetto delle limitazioni.

La formazione degli NO_x avviene per dissociazione e successiva ri-associazione delle molecole di N_2 e O_2 alle alte temperature raggiunte durante la fase di combustione (superiori a 2000 K). Tale meccanismo di formazione è proporzionale alla temperatura massima raggiunta nel ciclo, e controlla la generazione di oltre il 90% degli NO_x [2]. Questo meccanismo viene arrestato dal congelamento delle reazioni di riduzione e della diluizione dei gas combusti nella fase di espansione [3]–[5].

Gli NO_x costituiscono la principale emissione dei motori diesel, in particolare di quelli ad iniezione diretta.

Per limitare le emissioni di NO_x sono impiegabili diverse tecnologie (Figura 4) che permettono di ottenere margini di riduzione diversi. Tali interventi possono essere classificati come primari, detti anche in-motore, o secondari.

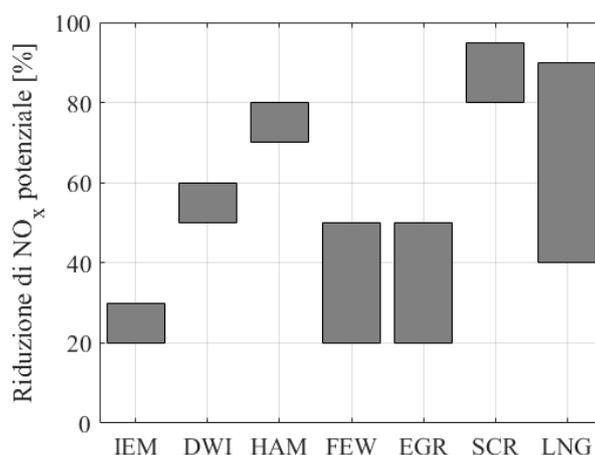


Figura 4 Potenziale riduzione degli NO_x per diverse tecniche

Gli interventi primari sono interventi di modifica ed ottimizzazione dei parametri motore in modo da agire direttamente sul processo di combustione e quindi controllare la formazione degli inquinanti, tali tecniche permettono una riduzione delle emissioni variabile dal 20% all'80% [2], [6].

Gli interventi secondari sono invece tecniche di rimozione degli NO_x a valle del processo di combustione e potenzialmente consentono riduzioni delle emissioni fino al 95% [2], [6]. Appartengono a questi ultimi i sistemi come l'SCR (*Selective Catalyst Reduction*), in cui un agente chimico riducente (urea o ammoniaca) viene aggiunto ai gas di scarico che, in presenza di un catalizzatore, fa sì che gli ossidi di azoto si decompongano in acqua e azoto biatomico. L'impressionante potenzialità raggiunta nella riduzione di NO_x , rendono questa soluzione incredibilmente appetibile e, talvolta, l'unica adatta al rispetto delle limitazioni più stringenti. Tuttavia, essa risulta anche particolarmente onerosa da un punto di vista tecnico ed economico richiedendo un sovra costo di investimento stimato in circa 40-70\$/kW ed uno operativo di 3-4\$/MW. Oltre a questo va anche aggiunto che, al fine di evitare la prematura incrostazione del catalizzatore, questo sistema implica l'impiego di combustibili a basso contenuto di zolfo come MDO o MGO [7], dal costo elevato. Tipicamente, le navi dotate di questo sistema by-passano l'SCR nelle tratte di mare al di fuori delle ECAs, soddisfacendo i limiti imposti dalle IMO TIER mediante soli interventi primari, per poi gradualmente sostituire l'alimentazione del motore dall'HFO al MDO o MGO e far passare i gas di scarico attraverso l'SCR nell'approcciare le coste ove vigono le limitazioni maggiori.

Come accennato, la formazione degli ossidi di azoto è funzione della massima temperatura raggiunta nel processo di combustione e la quantità prodotta ne è proporzionale. Il modo più intuitivo di intervenire è quindi quello di abbassare le temperature del ciclo. Questo è l'obiettivo della maggior parte delle tecniche primarie quali il ricircolo parziale dei gas combusti e le tecniche basate sull'iniezione d'acqua.

Nel primo caso si parla di EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) in cui parte dei gas di scarico, gas inerti che non prendono parte al processo di combustione, viene fatta ricircolare all'interno della camera di combustione, abbassando le temperature massime del ciclo.

Alla seconda tipologia appartengono tecniche quali: DWI (*Direct Water Injection*), FEW (*Fuel-Water Emulsions*), HAM (*Humid Air Motor*). Lo scopo di tali tecniche è quello di portare nella camera di combustione una massa d'acqua avente funzione di inerte termico che evaporando sottrae calore alla carica abbassando così la temperatura massima del ciclo.

Infine, è possibile intervenire sull'iniezione di combustibile attraverso iniezioni ritardate, leggi di iniezione modulate e spray pattern ottimizzati, controllando il rilascio termico e le temperature raggiunte nel ciclo di combustione, nonché l'uniformità della carica che si realizza all'interno del cilindro.

L'ultima soluzione attuabile per la riduzione delle emissioni inquinanti è quella di impiegare motori alimentati con combustibili differenti (Figura 4). Tra questi, i motori alimentati a gas hanno acquisito sempre più rilievo nel panorama della propulsione navale. Il gas naturale (LNG) permette, se confrontato all'impiego di HFO, una riduzione delle emissioni fino all'11% di CO_2 , dell'86% di NO_x , del 98% di SO_x e del 96% di particolato. Non solo, dato l'attuale prezzo e la previsione di costo per gli anni a venire, l'impiego di LNG in sostituzione dell'HFO comporta una riduzione di circa il 31% dei costi operativi [8], rendendo l'impiego del gas una soluzione valida sia da un punto di vista economico sia tecnico [9]. L'impiego del gas naturale come combustibile è la scelta più ovvia per la propulsione delle navi metaniere adibite al trasporto dello stesso. Per ragioni di trasporto il gas naturale viene liquefatto, alla pressione atmosferica, mediante raffreddamento alla temperatura di $-163^\circ C$, riducendone così il volume occupato di circa 600 volte rispetto alle condizioni standard. Il non perfetto isolamento termico dei serbatoi criogenici entro i quali viene trasportato ne causa una parziale evaporazione definita boil-off. Per evitare l'incremento della pressione nei serbatoi, il gas evaporato deve essere ri-liquefatto oppure impiegato come combustibile per la propulsione della nave stessa. In realtà, entrambe le soluzioni sono contemporaneamente impiegate per gestire la quantità di LNG prodotta dal boil-off. Appare quindi evidente il motivo che porta questa tipologia di navi ad essere alimentate a NG. Rimane, tuttavia, ancora problematica la questione dell'infrastruttura, sia dal punto di vista della sicurezza che della disponibilità, qualora si volesse impiegare il LNG su navi non adibite al trasporto del combustibile stesso; tuttavia, la spinta dettata dalle limitazioni alle emissioni e le ragioni economiche precedentemente esposte stanno sempre più spingendo il mercato in questa direzione.

Nella maggior parte dei casi i motori a gas lavorano realizzando un ciclo Otto a 4 tempi. Si ha quindi una pre-miscelazione dell'aria con il combustibile e l'innesco della combustione al termine della fase di compressione mediante l'apporto energetico realizzato tramite opportuni dispositivi. L'alimentazione di combustibile può essere realizzata in modi diversi [2]:

- mediante un mixer predisposto alla miscelazione del combustibile con l'aria nella fase di aspirazione, in questo caso la formazione della carica avviene a monte dei collettori di aspirazione;
- tramite un iniettore per cilindro collocato nel collettore di aspirazione (port injection);
- effettuando un'iniezione diretta ad alta pressione in camera di combustione.

Per quanto riguarda l'accensione, questa può essere realizzata mediante la classica candela in camera principale, candela in precamera o mediante un'iniezione di combustibile liquido. In quest'ultimo sistema, l'apporto energetico necessario all'avvio della combustione (circa $2 \div 5\%$) viene fornito attraverso l'accensione spontanea di una piccola quantità di gasolio. Tale sistema implica, purtroppo, un aumento della complessità costruttiva del propulsore, data la necessità di disporre di un ulteriore iniettore per cilindro adibito all'accensione e di trasportare un secondo combustibile; tuttavia apre interessanti opportunità, che hanno condotto allo sviluppo dei motori dual-fuel (DF).

I grandi cambiamenti derivanti dalle crescenti regolamentazioni sulle emissioni dei motori associate alla grande richiesta di flessibilità nell'impiego di combustibili diversi ha quindi creato il terreno fertile per lo sviluppo dei motori DF. Il campo di applicazione di questo tipo di motore è ampio, variando dalla propulsione ferroviaria, a quella per impieghi stazionari, a quella navale. In quest'ultimo caso, come detto, si aprono interessanti possibilità permettendo una duplice alimentazione che consente il rispetto delle normative sulle emissioni. Non solo, la ridondanza nel sistema di alimentazione rappresenta un indiscutibile vantaggio nel caso di navi metaniere normalmente alimentate a gas garantendone la propulsione in caso di guasti al sistema di alimentazione principale.

Diverse sono le tipologie di motori DF, sia 2 tempi che 4 tempi, attualmente in commercio. Esse si differenziano per il modo in cui il gas è introdotto nel motore e per il grado di condivisione realizzato durante il funzionamento con il secondo combustibile [10]. Nella categoria dei 2 tempi si hanno due principali realizzazioni ad opera di MAN e Wartsila che sono tra loro profondamente diverse.

Nella soluzione proposta da MAN (*MAN ME-GI*) si ha un'iniezione diretta di gas ad alta pressione (30 MPa) e il ciclo realizzato è un ciclo Diesel.

Nel caso del motore Wartsila (*WinGD X-DF*) l'alimentazione di gas è a bassa pressione (1 MPa) ed opera secondo il ciclo Otto.

Particolarmente interessanti sono i motori DF Diesel-Gas totalmente flessibili ovvero, in grado di essere alimentati con percentuali di combustibile liquido variabili da meno dell'1% al 100%.

Esistono anche casi in cui la complessità può essere ancor più elevata per la presenza di un terzo sistema di iniezione: uno per il gas, uno per il combustibile (HFO) ed uno per le iniezioni di accensione (MGO).

La complessità derivante dalla presenza di più sistemi di alimentazione non è solo associata ad ingombri e difficoltà impiantistiche, ma anche al modo secondo cui gli iniettori sono disposti nella testata del motore. Da questo dipendono, infatti, le efficienze e le emissioni prodotte dal motore stesso [11]. Nel caso di motori 4 tempi, in cui a differenza dei 2 tempi la valvola di scarico non occupa la posizione centrale della testa, la soluzione migliore è quella di disporre di un unico iniettore diesel, posizionato centralmente tra le valvole, in grado di operare in tutto il campo di impiego, dalle pilota, utilizzabili come

iniezioni di accensione, all'alimentazione in solo diesel [11]. Questa considerazione rimane valida anche per tutti gli altri motori dove disporre di un unico iniettore in grado di operare in tutte le condizioni rappresenta ovviamente un indiscutibile vantaggio. La realizzazione di un iniettore in grado di iniettare con precisione quantità di combustibile in un intervallo che varia di due ordini di grandezza è una vera e propria sfida tecnologica, oggetto di ricerca e sviluppo da parte delle industrie di settore. In particolare, la sfida maggiore risiede nelle piccole aperture, da ottenersi con variabilità ciclica inferiore allo 1% della quantità massima. Questa stringente richiesta è necessaria perché nel funzionamento a gas è indispensabile contenere il più possibile la frazione diesel delle iniezioni pilota che possono portare le emissioni NO_x al di sopra dei limiti imposti delle normative [11]–[13].

La breve introduzione fatta mette in evidenza la centralità del sistema di iniezione nel sistema motore e degli effetti di questo in termini di emissioni prodotte. Nella realizzazione di un iniettore è quindi indispensabile poter studiare in modo approfondito le caratteristiche del getto di combustibile che questo realizza. L'attività di ricerca riportata in questa tesi nasce dalla richiesta di un'azienda produttrice di iniettori e sistemi di iniezione per motori navali (OMT – *Fuel Injection System*) di dotarsi di un apparato sperimentale innovativo per l'analisi degli spray diesel generati attraverso i loro sistemi.

La caratterizzazione di uno spray può essere effettuata da un punto di vista microscopico o macroscopico [14].

Nel primo caso, l'interesse è incentrato sulla distribuzione della dimensione delle gocce, sulla loro numerosità nonché sulla velocità assunta dalle stesse.

Nel secondo approccio si ricerca, invece, una caratterizzazione di insieme attraverso la misurazione di due parametri principali definiti penetrazione ed angolo di diffusione. Tipicamente, la valutazione di queste due caratteristiche è effettuata sulla base dell'analisi di immagini di spray acquisiti mediante tecniche ottiche come la fotografia ad alta velocità [15].

A causa di limitazioni intrinseche proprie delle tecniche ottiche comunemente impiegate, le informazioni ottenibili si limitano alla superficie esterna dello spray e non permettono una completa ed univoca caratterizzazione dei getti. Inoltre, come verrà mostrato nel seguito, il valore di angolo di diffusione è dipendente dalla tecnica di analisi adottata. Particolari tecniche che si basano sull'impiego di radiazioni di sincrotrone non soffrono di tali limitazioni, tuttavia, data la loro complessità non trovano applicazione in comuni laboratori di analisi. Una possibile soluzione per aggirare tali inconvenienti, ed ottenere informazioni in merito alla struttura interna dello spray, consiste nell'adottare un approccio di natura intrusiva.

A tal proposito, nella presente tesi, verrà illustrata una nuova tecnica, basata su di un approccio meccanico, per il rilevamento della distribuzione spaziale della quantità di moto del getto (QM). Tale tecnica è basata sul rilevamento della forza di impatto (FI) ed impiega gli algoritmi propri della tomografia assiale computerizzata (TAC). In questo modo è possibile investigare non solo la superficie dello spray, ma anche il cuore dello stesso.

Inoltre, è stato proposto un algoritmo per la valutazione della penetrazione e dell'angolo di diffusione dei getti a partire da immagini digitali di spray. Tale algoritmo è totalmente automatico e non prevede alcun grado di soggettività attribuibile allo sperimentatore.

Infine, è stata progettata e realizzata una versione prototipale del banco prova atto all'analisi meccanica ed alla ripresa cinematografica ad alta velocità dell'evoluzione degli spray diesel in condizioni non evaporative. L'obiettivo principale del banco è di confrontare gli algoritmi di analisi di immagini presenti in letteratura, nonché l'algoritmo proposto nella presente tesi al variare delle condizioni operative.

Inoltre, il banco è stato pensato in modo da prevedere l'impiego congiunto delle tecniche ottiche e meccaniche al fine di combinarne le informazioni da queste ottenibili.

Nomenclatura

Abbreviazioni

CR	Common-Rail
DWI	Direct Water Injection
ECAs	Emission Control Areas
EGR	Exhaust Gas Recirculation
FEW	Fuel-Water Emulsions
FI	Forza di Impatto
HAM	Humid Air Motor
HFO	Heavy Fuel Oil
IMO	International Maritime Organization
LNG	Gas Naturale Liquefatto
MDO	Marine Diesel Oil
MGO	Marine Gasoil
QM	Quantità di Moto
SCR	Selective Catalyst Reduction
SMSA	Stratigraphic Momentum Spray Analysis
TAC	Tomografia Assiale Computerizzata

Capitolo 2

Analisi Meccanica di Spray

*Parte del lavoro descritto in questo capitolo è stata precedentemente pubblicata in:

Bottega, A., & Dongiovanni, C. (2018). A new sensor for the analysis of jet momentum spatial distribution. *Sensors and Actuators A: Physical*, 269, 283-293.

2.1 Introduzione

Il sistema d'iniezione ha lo scopo di fornire l'apporto di combustibile nella quantità e con le tempistiche richieste dal processo di combustione, e rappresenta un elemento fondamentale del sistema motore del quale controlla prestazioni ed emissioni [17]. Particolare cura deve pertanto essere rivolta alla generazione del flusso di combustibile durante il processo d'iniezione. Quest'aspetto è di grande importanza per qualsiasi tipologia di motore a combustione ed ancor di più nel caso di motori ad accensione per compressione, la cui essenza risiede proprio nell'introduzione del combustibile finemente atomizzato nell'aria compressa all'interno del cilindro. In questi motori, la gestione del processo di combustione è infatti attuata attraverso il controllo delle caratteristiche dello spray di combustibile, dalle tempistiche d'iniezione e dalla turbolenza dell'aria in camera [3], [4]. Il meccanismo con il quale le gocce di combustibile si formano [14] la presenza di cavitazione nei fori dei polverizzatori [18] e l'interazione tra fasi diverse [19] rendono lo studio della formazione degli spray e delle loro caratteristiche, in particolare nel caso di spray densi come quelli diesel, particolarmente complesso.

Lo studio degli spray di combustibile viene tipicamente effettuato mediante tecniche ottiche [15]. Il principale vantaggio di queste tecniche, essendo non intrusive, è di non alterare l'evoluzione del getto, tuttavia, presentano alcune intrinseche limitazioni tali da non permettere una completa ed univoca caratterizzazione dello spray. L'indice di rifrazione della fase liquida [20], ossia il combustibile, e quello della fase gassosa [21], [22], cioè il mezzo nel quale si realizza l'iniezione, sono molto diversi alle lunghezze d'onda della radiazione luminosa usualmente impiegata in queste analisi, tipicamente nello spettro visibile. Inoltre, uno spray, essendo formato da una moltitudine di gocce, presenta un elevatissimo numero d'interfacce liquido-aeriforme. Nel passaggio tra i due mezzi la radiazione luminosa è deviata in accordo alla legge di Snell¹, e questo implica, dato il grande numero di transizioni ed i diversi indici di rifrazione, che lo spray non sia otticamente penetrabile. L'analisi che ne risulta è quindi limitata alla superficie² esterna del getto. Mediante tali tecniche è pertanto possibile uno studio del moto del gas attorno al getto [23] oppure una caratterizzazione macroscopica dello spray, ovvero in termini di penetrazione ed angolo di diffusione. L'impiego di particolari raggi x, quali le radiazioni di sincrotrone, permetterebbe di ottenere informazioni quantitative in merito al cuore dello spray essendo, a tali lunghezze d'onda, gli indici di rifrazione delle due fasi analoghi [24]. Tali tecniche, tuttavia, dato l'apparato sperimentale richiesto, non sono impiegabili in un comune laboratorio né tantomeno trovano applicazione in ambito industriale.

Parallelamente alle analisi ottiche, in anni più recenti, sono state sviluppate tecniche di tipo intrusivo basate sulla misura della quantità di moto (QM) dello spray. La QM rappresenta

¹ La legge di Snell descrive la relazione tra gli angoli di incidenza, θ_i , e di rifrazione, θ_r , di un'onda che attraversa un'interfaccia tra due mezzi con indici di rifrazione n_1 ed n_2 : $\text{sen } \theta_r / \text{sen } \theta_i = n_1 / n_2$

² Come si vedrà nel seguito non è tuttavia semplice definire ciò che si intende come bordo dello spray.

una proprietà fondamentale di ogni processo di atomizzazione da cui dipendono direttamente i parametri macroscopici di penetrazione ed angolo di diffusione [16]. Queste tecniche si presentano come uno studio complementare alle più tradizionali analisi ottiche permettendo di studiare fenomeni quali la cavitazione che si realizza nei fori del polverizzatore [25], le difformità da getto a getto [26], nonché legare le caratteristiche dello spray alla geometria interna del polverizzatore [27], [28]. Queste tecniche si basano su di una misura indiretta della QM mediante il rilevamento della forza d'impatto (FI) e, tipicamente, ne consentono un rilevamento globale, ovvero riferito allo spray nella sua interezza. Congiuntamente ad una misurazione globale, la conoscenza dell'andamento spaziale della QM, inteso come distribuzione che questa proprietà assume internamente al getto, fornirebbe una quantità e qualità di informazioni indubbiamente superiore a quelle ottenibili da un'analisi di tipo globale. Tale misura, inoltre, fornirebbe informazioni in merito alla struttura interna del getto superando le limitazioni esposte delle tecniche ottiche tradizionali. Mediante tale analisi sarebbe inoltre possibile una definizione univoca dell'angolo di diffusione, associandolo alla distribuzione spaziale assunta dalla QM, a differenza di quanto non sia possibile fare oggi attraverso analisi ottiche convenzionali il cui risultato dipende dall'algoritmo di analisi impiegato, come verrà evidenziato nel seguito.

2.2 Misura della quantità di moto

Il rilevamento della QM può essere effettuato indirettamente attraverso la misura della FI su di una superficie disposta ortogonalmente allo spray oggetto di analisi. Per comprendere tale principio si consideri la Figura 5. In tale schema è rappresentato lo spray, racchiuso nel volume di controllo V_{CV} , delimitato dalla superficie di controllo S_{CV} entro cui avviene l'evoluzione del getto stesso. Il volume di controllo, per semplicità un cilindro circolare retto, è definito in modo tale da far coincidere l'asse dello stesso con la direzione lungo la quale avviene l'evoluzione del getto e la sua base con la superficie di impatto. Quest'ultima, di conseguenza, si troverà ortogonale al getto.

Considerando il volume di controllo individuato, la conservazione della QM lungo la direzione assiale può essere scritta come:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_{CV}} \rho v_z dV + \int_{S_{CV}} \rho v_z v_z dS = F_z(t) \quad (1)$$

dove i singoli termini dell'equazione rappresentano rispettivamente:

- $\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_{CV}} \rho v_z dV$ la variazione di QM contenuta nel volume di controllo;
- $\int_{S_{CV}} \rho v_z v_z dS$ il flusso convettivo di QM attraverso la superficie di controllo;
- $F_z(t)$ la forza scambiata tra il getto e la superficie di impatto.

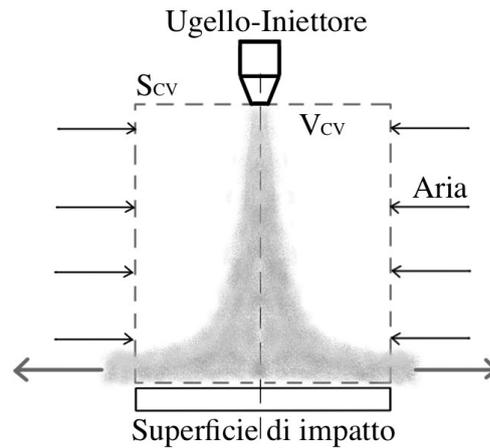


Figura 5 Volume di controllo ed impatto dello spray

L'equazione 1 esprime la relazione che lega la FI al flusso di QM. Si sottolinea come nessuna restrizione vige in merito alla natura del getto ed il principio di misura può essere applicato sia a getti bifase, come uno spray, che monofase, come un semplice getto d'aria.

L'equazione 1 può essere semplificata introducendo le seguenti ipotesi:

- ipotesi di flusso stazionario. Questa condizione può ritenersi verificata per durate del processo d'iniezione sufficientemente lunghe;
- non vi è nessun contributo di QM attraverso la superficie superiore del volume di controllo al di fuori di quello proveniente dal foro dell'iniettore o ugello;
- i flussi di QM in uscita dal volume di controllo avvengono ortogonalmente alla superficie stessa.

Si ottiene quindi:

$$F_z = \int_{S_{cv}} \rho v_z^2 dS = \Phi \quad (2)$$

L'equazione così ottenuta esprime come, ad un dato istante temporale, la forza sulla superficie di impatto sia pari al flusso di quantità di moto del fluido (Φ), nella direzione ortogonale alla superficie di impatto stessa, attraverso la superficie di controllo.

In Figura 6, a titolo di esempio, sono riportati gli andamenti temporali della portata di combustibile iniettata per un motore navale DF con iniezione CR nel caso di iniezioni pilota (linea a tratti), ed iniezione a pieno carico (linea continua). È evidente come l'ipotesi di stazionarietà su introdotta non possa ritenersi soddisfatta nel caso di iniezioni pilota, caratterizzate da un comportamento prettamente transitorio. Tuttavia, attraverso un'opportuna definizione del setup sperimentale, è possibile eseguire la misurazione anche in tali condizioni in modo da minimizzare le differenze tra l'evoluzione reale e quella rilevata, come riportato in [29], [30].

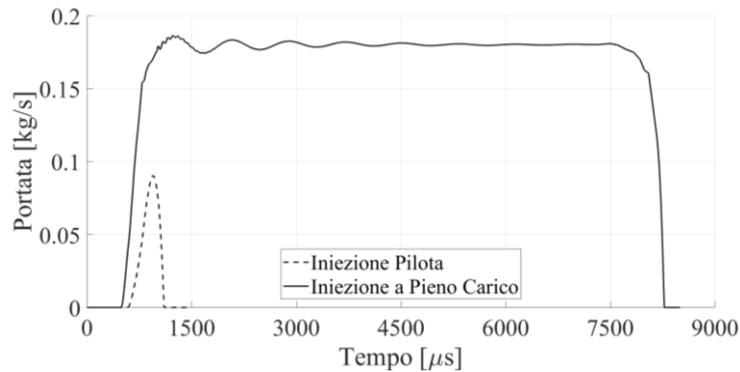


Figura 6 Confronto portate tra iniezione pilota e a pieno carico

Infine, è d'obbligo la seguente precisazione. La QM di uno spray, così rilevata, è da intendersi riferita all'insieme delle frazioni liquida ed aeriforme, alla quale la prima cede parte della propria QM durante il processo di iniezione. Non è quindi possibile, seguendo questo approccio, distinguere il contributo delle due fasi che costituiscono il getto.

Quanto appena descritto, dimostra come sia possibile la misurazione indiretta della QM mediante il rilevamento della FI. Ovviamente, tale FI è figlia di una distribuzione di pressione sulla superficie di misura. Per il principio di misura descritto, quindi, rilevare la distribuzione della pressione d'impatto (PI) sulla superficie equivale a conoscere la distribuzione spaziale della QM. L'obiettivo del presente lavoro è la realizzazione di un sensore finalizzato al rilevamento della distribuzione spaziale della QM, cioè dalla PI, secondo l'approccio meccanico appena descritto.

2.3 Sensori per la misura della distribuzione della QM

In passato sono state proposte alcune soluzioni per il rilevamento della distribuzione della QM, basate sulla misura della forza d'impatto esposta nel paragrafo precedente. Nel seguito saranno analizzate le principali tecniche descritte nella letteratura tecnica.

Il sensore proposto in [31], rappresentato in Figura 7, è costituito da una superficie rigida di impatto a cui è applicato un film piezo-elettrico suddiviso in settori equi-angolari. La risposta elettrica, proporzionale alla deformazione meccanica di ciascun settore, fornisce la distribuzione della FI tra i diversi settori. Come evidenziato nel lavoro stesso, la risposta elettrica del film piezo-elettrico utilizzato ha una costante di tempo eccessiva e tale da non permettere un adeguato rilevamento temporale del fenomeno. Inoltre, è evidente come questo sensore non consenta un'effettiva ricostruzione della distribuzione spaziale della QM, quanto piuttosto una stima dell'uniformità che tale proprietà assume tra i diversi settori. L'incremento del numero di settori, od ancor meglio la realizzazione di una fitta matrice di elementi sensibili, potrebbe rappresentare un'interessante soluzione per il rilevamento della pressione di impatto. Tuttavia, la quantità di connessioni elettriche necessaria alla realizzazione di una matrice sensibile con sufficiente risoluzione spaziale per l'analisi

dell'area di indagine, associata alla richiesta di un'adeguata frequenza di campionamento per studiare l'evoluzione temporale dello spray rappresentano, ad oggi, una limitazione tale per cui non si abbiano, a conoscenza dell'autore della presente tesi, applicazioni di tale tecnologia per il rilevamento della quantità di moto di uno spray di combustibile.

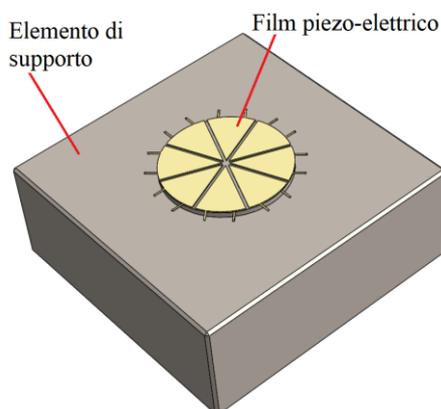


Figura 7 Sensore proposto da Ryan [31]

La soluzione proposta in [32] prevede l'impiego di un trasduttore piezoelettrico, di 2 mm di diametro, posizionato frontalmente ad uno spray diesel automobilistico (Figura 8).



Figura 8 Trasduttore impiegato in [32]

Mediante questa tecnica è mostrato come sia possibile l'analisi delle uniformità tra i diversi fori del polverizzatore attraverso la rilevazione dell'angolo di diffusione dei getti. Inoltre, si mostra come si possano ottenere informazioni in merito alla penetrazione e alla qualità dell'atomizzazione realizzata. Nonostante tale soluzione non sia propriamente impiegata per il rilevamento spaziale della QM, questo trasduttore fa da apripista ai sensori di tipo "puntuale". La soluzione maggiormente intuitiva, infatti, per il rilevamento spaziale della QM, sempre attraverso la misura della FI, è quella di operare una riduzione delle dimensioni del sensore su cui si trova ad impattare lo spray, e quindi di mappare la distribuzione della quantità di moto movimentando opportunamente il sensore stesso. Tale idea, benché valida nel principio, risente del fatto che le dimensioni del sensore, per quanto ridotte (2 mm di diametro come in [32]), risultano essere confrontabili con quelle dell'area frontale del getto

alle distanze dal foro di iniezione di interesse³ (ad es. 5-10 mm) non permettendo, pertanto, un effettivo rilevamento dell'andamento spaziale della QM.

Tale problema, ovviamente, è meno significativo nell'analisi di spray di motori diesel di grandi dimensioni, essendo le dimensioni dei fori, e di conseguenza degli spray, superiori a quelli automobilistici. Tuttavia, ne limiterebbe comunque l'applicazione nel momento in cui si volesse effettuare un'analisi a distanza ravvicinata dal foro di iniezione, ovvero nel caso di iniezioni pilota caratterizzate da penetrazioni ridotte e, di conseguenza, ridotte aree di impatto. Oltre alla considerazione appena effettuata va detto, come evidenziato in [33], che la sola realizzazione di un sensore di ridotte dimensioni non sia opportuna. La superficie d'impatto deve, infatti, essere sufficientemente ampia da accogliere tutto lo spray e, allo stesso tempo, fare in modo che abbia componente di velocità assiale nulla nell'abbandonare la superficie di misura.

In [33] sono analizzate criticamente diverse soluzioni per soddisfare tali richieste. Tra le diverse soluzioni proposte, quella maggiormente promettente è costituita da un sensore che presenta una superficie di impatto del diametro di 20 mm cui centralmente si affaccia una spina mobile del diametro di 2 mm a contatto con un trasduttore piezoelettrico sottostante (Figura 9).

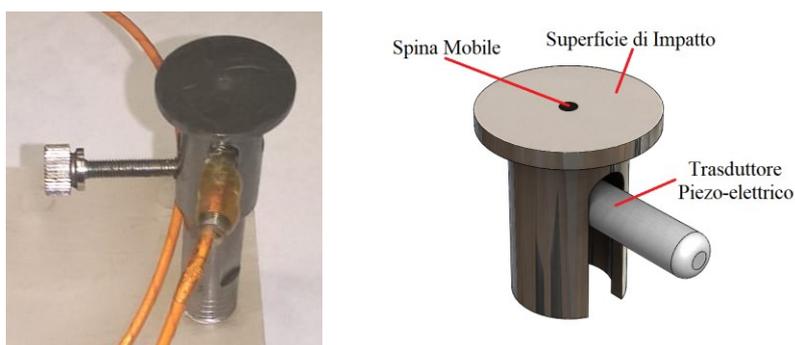


Figura 9 Sensore puntuale impiegato in [33]

I risultati presentati in [33] permettono di validare il principio di misura puntuale, e mostrano come questo dispositivo permetta l'analisi di fori di polverizzatori diversi, apprezzando differenze in termini di angolo di diffusione non rilevabili dall'analisi fotografica degli stessi. Tuttavia, questa soluzione risente, al pari della precedente, delle eccessive dimensioni della spina rispetto all'area d'impatto dello spray, e la distribuzione della QM ottenuta mediante tale tecnica non ne rappresenta l'effettivo andamento quanto, piuttosto, un indice della stessa. Infatti, per ogni posizione del sensore, il valore di pressione d'impatto è ottenuto dividendo la forza rilevata per l'area dell'elemento sensibile che quindi rappresenta un valore medio sulla superficie sensibile. L'elemento mobile agisce, di fatto, come un filtro spaziale. È quindi essenziale, per minimizzare tale effetto, ridurre il più possibile le dimensioni dell'elemento sensibile. Oltre a questo, la soluzione esposta risente di

³ Considerando un valore tipico dell'angolo di diffusione di uno spray diesel pari a 16° ed una distanza di 5 mm ne consegue un'area di impatto di diametro di 1.4 mm circa.

problematiche d'interazione meccanica tra la spina e la sede entro la quale si trova a scorrere, che rendono difficoltoso il rilevamento della FI.

Una soluzione simile a quella appena descritta è proposta in [34], [35], dove il diametro della spina è ridotto a 1 mm (Figura 10).



Figura 10 Sensore puntuale a spina mobile [34]

Anche questo sensore soffre delle problematiche di interazione meccanica della spina con la propria guida. Per questa ragione in [35] l'elemento mobile è stato rimosso, ed il sensore si presenta con una superficie d'impatto forata centralmente. Tale foro agisce da filtro, selezionando la porzione di spray che si troverà ad impattare sul trasduttore piezoelettrico sottostante, che quindi opera come un sensore per il rilevamento globale della sola parte selezionata. Nel medesimo lavoro gli autori, attraverso analisi CFD, mostrano come la distribuzione della pressione d'impatto, misurabile su di una superficie disposta ortogonalmente allo spray, differisca da quella dell'evoluzione libera del getto. Tale differenza è imputabile ad un effetto di sovrappressione, conseguente all'impatto del getto stesso sulla superficie di misura, che può essere rimosso realizzando un piattello di impatto di opportuna forma conica. Come sottolineato dagli autori stessi, tale forma deve essere realizzata tenendo conto dell'angolo di diffusione atteso del getto, non noto a priori, ovvero deve essere definita caso per caso a seconda dello spray oggetto di analisi. Inoltre, particolare attenzione deve essere prestata nel dimensionamento del foro realizzato sulla superficie, al fine di minimizzare i fenomeni dissipativi che inevitabilmente si realizzano all'ingresso dello stesso. Tale foro non potrà pertanto avere dimensioni eccessivamente ridotte (circa 1 mm).

Le considerazioni sulle soluzioni sin qui elencate hanno portato allo sviluppo del dispositivo sviluppato in questa tesi. Questo sensore si basa sempre sulla misurazione indiretta della QM attraverso il rilevamento della FI, ma l'elemento sensibile non è più una spina cilindrica, bensì un sottile e lungo elemento rettangolare. In questa soluzione viene abbandonato l'approccio puntuale per un rilevamento "integrale" effettuato secondo opportune linee di misura rappresentate dall'elemento sensibile stesso. La distribuzione spaziale della QM è quindi ottenuta implementando i tipici algoritmi della tomografia computerizzata (TC) e per questo il trasduttore è stato denominato Sensore SMSA (*Stratigraphic Momentum Spray Analysis*). Attraverso questa soluzione, la porzione di forza di impatto agente sull'elemento sensibile è maggiore rispetto a quella rilevabile con un sensore di tipo puntuale e, pertanto, più facilmente misurabile perché caratterizzata da un rapporto segnale-rumore maggiore.

Come per le altre soluzioni citate, l'andamento ricostruito non corrisponde a quello dell'evoluzione libera del getto per quanto riportato in [35]. Tuttavia, si è preferito sviluppare un dispositivo che fosse sempre applicabile senza dover essere modificato sulla base dell'esperimento, permettendo comunque una caratterizzazione dello spray.

Un principio di misura analogo a quello che verrà nel seguito descritto, e su cui si basa il sensore SMSA, può essere ritrovato in [36]. In tale soluzione l'elemento sensibile è costituito da un sottile filo teso tra gli estremi di una forcina. Misurando la forza scambiata tra filo e spray è possibile mappare la QM di quest'ultimo. Tale soluzione, nel principio minimamente invasiva nell'evoluzione dello spray, non trova, a conoscenza dell'autore della presente tesi, ad oggi, applicazione pratica né produzione scientifica che la impieghi.

2.4 Idea alla base della tecnica SMSA

Come evidenziato nel paragrafo precedente, le dimensioni dell'elemento sensibile rappresentano la principale criticità dei sensori per il rilevamento della distribuzione spaziale della quantità di moto. Queste, infatti, devono essere le più ridotte possibili, agendo l'elemento sensibile come un filtro spaziale che media sulla sua superficie l'effettivo andamento della pressione d'impatto e quindi della quantità di moto rilevata. Al tempo stesso, un elemento di grandi dimensioni implica un'entità maggiore della forza rilevata che risulta così più facilmente misurabile, aumentando il rapporto segnale-rumore. L'idea alla base del sensore oggetto di questa tesi nasce proprio dal cercare una soluzione di compromesso a questi due bisogni concorrenti. Il sensore proposto permette di impiegare gli algoritmi delle tecniche tomografiche ed il rilevamento della quantità di moto è sempre basato sulla misura della forza d'impatto.

Con tomografia (o stratigrafia) ci si riferisce genericamente a delle tecniche che consentono l'ottenimento d'immagini di sezioni di un corpo, ricavate a partire da informazioni ottenute illuminando⁴ l'oggetto d'indagine secondo diverse angolazioni. I campi di applicazione della tomografia sono molteplici e spaziano dall'astronomia, alla geofisica, alla medicina [37]. In particolare, in campo medico le tecniche tomografiche hanno rappresentato un elemento rivoluzionario, fornendo uno strumento diagnostico senza precedenti, in grado di consentire ai medici di osservare l'interno del corpo dei pazienti senza necessità di un intervento chirurgico, localizzando, e soprattutto quantificando, l'entità di eventuali problematiche.

Al di là delle soluzioni adottate per l'implementazione pratica di tali tecniche, la tomografia è essenzialmente un problema matematico inverso in cui lo scopo è la ricostruzione dell'andamento di una funzione incognita⁵, bi o tri-dimensionale, a partire dalle sue proiezioni, ovvero un set di integrali di linea della funzione stessa ottenuti secondo

⁴ Il termine illuminare è improprio, impiegando la maggior parte delle tecniche tomografiche radiazioni non visibili. Tuttavia, ben si presta per rappresentare il concetto alla base della tecnica.

⁵ Un'immagine in scala di grigi può essere definita come una funzione bidimensionale $I = f(x, y)$ dove x e y sono le coordinate spaziali (planari) ed I è il valore assunto dalla funzione ad ogni posizione, ovvero l'intensità luminosa o livello di grigio del pixel.

diverse direzioni [38]. Dal punto di vista analitico, la soluzione al problema è stata fornita sin dal 1917 dal matematico austriaco Johann Radon, attraverso la definizione di quella che oggi è comunemente chiamata trasformata (ed anti-trasformata) di Radon. Tale lavoro rimase un mero strumento matematico senza applicazione pratica fino a quando, nella metà degli anni 60, il fisico Allan M. Cormack e l'ingegnere Godfrey N. Hounsfield "riscoprirono", indipendentemente l'uno dall'altro, gli studi di Radon applicandoli alla tomografia computerizzata e proposero i primi prototipi di scanner tomografici. Tali invenzioni valsero ad entrambi il premio Nobel per la medicina nel 1979 [39].

In ambito medico queste tecniche sono principalmente associate all'impiego dei raggi x. Quando il corpo di un paziente è attraversato da un singolo raggio x, una parte di questo viene assorbita dai tessuti, mentre una quota viene trasmessa. Semplificando, un raggio x può essere considerato come una fonte monocromatica, di spessore nullo e non soggetta a diffrazione né rifrazione. Questo implica che non venga né deviato né irradiato nel passaggio attraverso un medio, ma prosegua nel suo percorso rettilineo. L'assorbimento del raggio è proporzionale a un coefficiente di attenuazione, specifico di ogni sostanza, ed allo spessore attraversato, secondo la legge di Lambert-Beer⁶. Tale relazione può essere espressa come:

$$\frac{di}{dx} = -A(x) i(x) \quad (3)$$

dove $i(x)$ rappresenta l'energia del raggio ad una data posizione x , di la sua variazione lungo il percorso dx , ed infine $A(x)$ il coefficiente di attenuazione, che può essere funzione della posizione⁷.

Integrando si ottiene:

$$\int_{x_0}^{x_1} A(x) dx = \ln \frac{i_0}{i_1} \quad (4)$$

Noti quindi il valore iniziale dell'energia del raggio emesso i_0 , e misuratone il valore attenuato dopo il passaggio attraverso i tessuti i_1 , è possibile valutare il coefficiente di attenuazione del materiale, o meglio, il suo valore integrale lungo il segmento di linea $x_1 - x_0$ definito dal raggio x . Considerando un fascio di questi integrali di linea, ottenuto traslando il raggio parallelamente a sé stesso, si ottiene quella che viene definita proiezione della proprietà desiderata lungo una specifica direzione. Rilevando tali proiezioni è possibile ricostruire la funzione incognita che, nel caso dei raggi x, è l'andamento locale del coefficiente di attenuazione nella sezione del corpo indagata, rappresentata infine sotto forma d'immagine di una sezione del corpo.

La procedura appena descritta, schematizzata nella Figura 11, è definita proiezione a fascio parallelo (*Parallel Beam Projection - PBP*) ed è quella adottata nelle prime generazioni di scanner tomografici ed implementata attraverso il sensore SMSA nella presente tesi.

⁶ La trattazione del fenomeno è qui riportata in forma molto semplificata.

⁷ Si consideri ad esempio un mezzo eterogeneo, come il corpo umano.

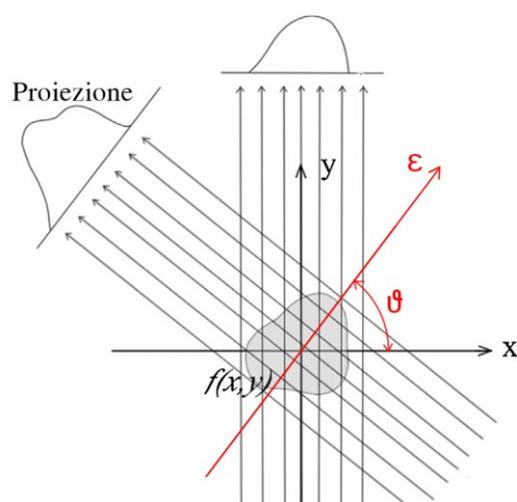


Figura 11 Geometria di una proiezione a fascio parallelo

Come detto, la ricostruzione di un andamento incognito a partire dalle sue proiezioni è fondata sulla trasformata di Radon. Tale trasformata è definita come:

$$g(\varepsilon, \vartheta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \delta(x \cos \vartheta + y \sin \vartheta - \varepsilon) dx dy \quad (5)$$

dove:

- $g(\varepsilon, \vartheta)$, a volte indicate con $\mathfrak{R}\{f(x, y)\}$, è la trasformata di Radon;
- $f(x, y)$ è la funzione incognita che descrive l'andamento di una data proprietà;
- $\delta(\)$ è la funzione impulso descritta lungo la linea di equazione $x \cos \vartheta + y \sin \vartheta - \varepsilon$ e rappresentativa del singolo raggio costituente il fascio.

La trasformata rappresenta quindi la proiezione della funzione-proprietà nella direzione ϑ . Supponendo un andamento incognito del quale sono però note, perché rilevate attraverso qualche tecnica, tutte le proiezioni relative a 180° ⁸, è possibile, attraverso la trasformata inversa, ricostruire la funzione incognita $f(x, y)$. Tale ricostruzione richiede l'utilizzo di altri strumenti matematici e può essere attuata secondo diverse implementazioni, per la cui trattazione si richiama la bibliografia [37]–[40]. Quella considerata nella presente tesi è l'algoritmo di retroproiezione filtrata (*Filtered Back Projection* - FBP).

Il sensore SMSA si propone di realizzare una sorta di analogia meccanica con la tomografia a raggi x. L'obiettivo della tecnica proposta è quello di rilevare la distribuzione della QM di uno spray diesel, o più in generale di un getto, in modo indiretto, mediante il rilevamento della distribuzione della FI (Equazione 2).

Nel caso in esame la proprietà che s'intende rilevare è la distribuzione della pressione d'impatto su di una superficie ad una data distanza dal foro di iniezione. La pressione d'impatto è pertanto una funzione delle coordinate spaziali x e y che individuano la superficie d'impatto stessa.

⁸ Non occorre considerare tutti i 360° per ovvie ragioni di simmetria.

Come detto, la parte sensibile del sensore SMSA è una sottile lama rettangolare (Figura 12) ed è collocata centralmente al piano d’impatto ed in modo tale che la sua superficie superiore sia allo stesso livello del piano circostante. Al di sotto di questo elemento sono collocati due trasduttori piezoelettrici che rilevano la sola porzione di forza di impatto che insiste sulla superficie esposta della lama. La forza misurata rappresenta un’approssimazione dell’integrale di linea della pressione d’impatto nella direzione dell’asse principale dell’elemento mobile, ovvero l’asse y in Figura 12.

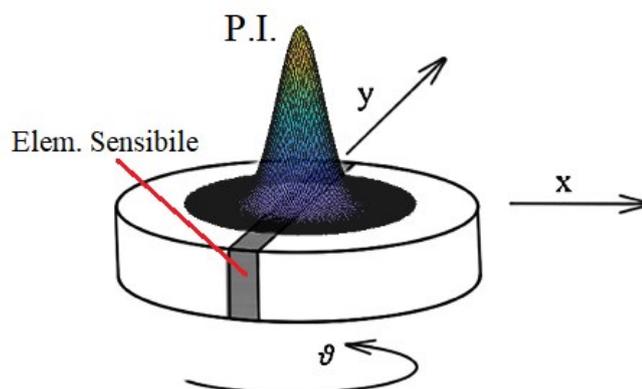


Figura 12 Idea del sensore SMSA

Per ogni posizione del sensore, il valore dell’integrale di linea della pressione d’impatto si ottiene dividendo la forza rilevata per lo spessore dell’elemento sensibile. Tale elemento deve essere sufficientemente lungo da attraversare diametralmente l’area d’impatto del getto, ovvero la sua lunghezza deve coprire anche quella parte al di fuori della regione d’interesse in cui la pressione di impatto tende a zero. Il piattello deve essere sufficientemente grande da raccogliere l’intero getto ad ogni posizione di analisi (Figura 13). Spostando il sensore secondo lo schema citato si ottengono le proiezioni della PI ai diversi angoli, ossia i dati di input per l’algoritmo di ricostruzione.

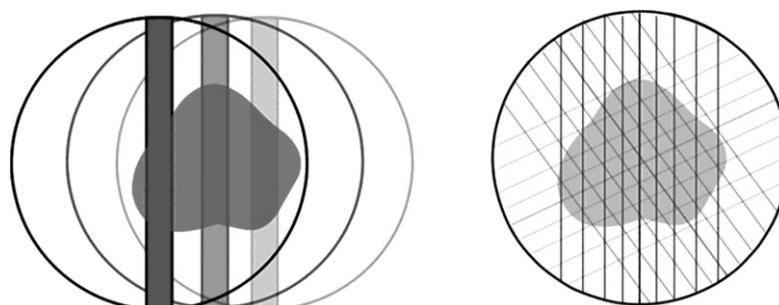


Figura 13 Impatto del getto nelle diverse posizioni di analisi e griglia di misura

2.5 Prestazioni teoriche e simulazioni del sensore

Definita l'idea del sensore SMSA, è stata eseguita un'analisi numerica delle procedure di misurazione, al fine di valutarne da un punto di vista teorico le prestazioni e definirne così i vincoli realizzativi ed operativi. Le prestazioni del nuovo sensore sono state confrontate con quelle di una tecnica puntuale, che come detto è la soluzione principalmente adottata per il rilevamento spaziale della QM.

In queste simulazioni è stata campionata una distribuzione nota della PI simulando il comportamento dei due sensori, SMSA e puntuale. I dati così ottenuti sono stati elaborati secondo i due approcci e gli andamenti ricostruiti secondo le due tecniche.

Gli effetti dei parametri di campionamento e della geometria dell'elemento sensibile dei trasduttori (lama nel sensore SMSA, spina cilindrica o foro in un trasduttore puntuale) sono stati valutati attraverso la definizione di due indici: l'errore quadratico medio normalizzato (NRMSE) e il massimo errore normalizzato (NME).

L'errore NRMSE è definito come:

$$NRMSE = \frac{1}{I_M} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_i^*)^2}{n}} \quad (6)$$

dove:

- I_i è il valore della pressione di impatto nel punto di misura i -esimo della distribuzione teorica;
- I_i^* è il valore della pressione di impatto nel punto di misura i -esimo della distribuzione ricostruita;
- n è il numero di punti di misura della griglia di ricostruzione;
- I_M è il valore massimo della distribuzione teorica.

L'errore così definito fornisce una stima della qualità globale della ricostruzione nell'intera area di impatto del getto.

L'errore massimo normalizzato NME è definito come il valore assoluto dello scostamento tra il massimo della distribuzione teorica, I_M , e quello della distribuzione ricostruita, I_M^* , normalizzato rispetto al primo.

$$NME = \left| \frac{I_M - I_M^*}{I_M} \right| \quad (7)$$

L'errore così definito permette di valutare la qualità della ricostruzione nella sua parte più critica, ovvero con riferimento al massimo il cui valore è strettamente associato alle frequenze più alte e quindi più difficili da misurare, come verrà meglio descritto nel seguito.

L'obiettivo delle tecniche oggetto di analisi è la ricostruzione della distribuzione spaziale della quantità di moto di un getto, ovvero, della pressione di impatto. In generale, un segnale può essere correttamente ricostruito a partire da una serie di campioni se questi sono stati

rilevati nel rispetto del teorema del campionamento di Nyquist-Shannon. Questo teorema, tipicamente definito con riferimento a segnali analogici su base tempo, può essere facilmente esteso a funzioni di due variabili, quali le coordinate spaziali. Si definisce, pertanto, un teorema del campionamento bidimensionale secondo il quale, al fine di campionare correttamente un segnale 2-D senza che si verifichi l'insorgere di artefatti di Aliasing, la frequenza spaziale⁹ di campionamento deve essere maggiore di due volte il massimo contenuto in frequenza, in entrambe le direzioni, della funzione [40]. È inoltre evidente come la distribuzione spaziale della QM sia anche funzione del tempo, e che quindi occorrerà effettuare l'acquisizione della forza di impatto nel rispetto dei medesimi criteri, ma temporali.

Ad un determinato istante temporale, la distribuzione della PI di uno spray diesel può essere considerata, con la sola eccezione della zona nell'immediata prossimità del foro di uscita, come una gaussiana bidimensionale pressoché simmetrica [32], [34]. Lo spettro di frequenza di tale andamento, con deviazione standard spaziale σ , è ancora una distribuzione gaussiana avente deviazione standard spettrale inversamente proporzionale a quella spaziale, secondo la relazione $\sigma_f = 1/(2\pi\sigma)$ [43], in entrambe le direzioni. La risoluzione nel dominio delle frequenze discrete, essendo discreto il campionamento della funzione, dipende dalla dimensione dell'area indagata, mentre l'intervallo delle frequenze coperto dalla FFT dipende dalla spaziatura Δx usata nella griglia di campionamento spaziale [40]. Il picco di questo spettro è localizzato nel centro del dominio delle frequenze, per le proprietà della trasformata di Fourier, indipendentemente dalla posizione del centro della distribuzione spaziale (che invece ne influenza la fase). Ne consegue che la distribuzione della PI in esame non è una funzione a banda limitata, essendo il suo spettro gaussiano. Pertanto, essendo la griglia di campionamento spaziale finita, è inevitabile introdurre mediante il campionamento una corruzione nel dominio della frequenza. Questo implica che l'aliasing è sempre presente in una ricostruzione ottenuta a partire da dati campionati, ma tale effetto può essere minimizzato mediante un adeguato campionamento [40].

Per l'analisi qui riportata la banda della gaussiana è assunta limitata alla frequenza spettrale di $3\sigma_f$, trascurandone pertanto lo 0.3% del contenuto in frequenza. Questo implica che per campionare correttamente tale andamento occorra una frequenza, ovvero il reciproco della spaziatura Δx della griglia di campionamento spaziale¹⁰, almeno pari a $6\sigma_f$. Occorre sottolineare che l'impiego di una frequenza spaziale di campionamento pari a tale requisito minimo porti, nel caso di una semplice interpolazione lineare dei dati¹¹, ad una ricostruzione

⁹ La distribuzione spaziale della QM, così come un'immagine, può essere considerata funzione bidimensionale delle variabili x e y che individuano il piano (dominio spaziale) su cui è definita. Per questo si parlerà di frequenze spaziali, la cui unità di misura può essere espressa in $1/mm$, per distinguere dalla più comune definizione di frequenza, $1/s$, relativa ad un segnale temporale.

¹⁰ Per non appesantire la notazione si indicherà con Δx sia la spaziatura nel caso di una griglia di campionamento di una tecnica puntuale (assumendo sia la medesima anche nella direzione y), sia nella tecnica SMSA dove Δx rappresenta la spaziatura tra i punti della singola proiezione ai diversi angoli.

¹¹ Che si sottolinea, in questo caso, siano i punti costituenti le proiezioni e non l'andamento finale.

dell'andamento incognito molto grossolana. Di conseguenza, la griglia di campionamento dovrebbe essere notevolmente rifinita diminuendo la spaziatura tra i punti di misura¹².

Infine, vale la pena ricordare che queste considerazioni sono regole generali di campionamento e devono essere rispettate sia che si impieghi la tecnica SMSA sia che si adotti un approccio di misurazione puntuale.

Nella tecnica SMSA qui proposta, viene adottato l'algoritmo di retroproiezione filtrata. In questa implementazione l'insufficienza dei dati può verificarsi sia a causa di un numero insufficiente di proiezioni, ovvero il numero di angoli a cui vengono rilevate le proiezioni stesse, sia per un sotto-campionamento nella singola proiezione, cioè il numero di punti (traslazioni del sensore) per un dato angolo in cui viene misurata la FI [38]. Il numero di proiezioni M non è indipendente dal numero di punti N che costituisce la singola proiezione (Figura 14).

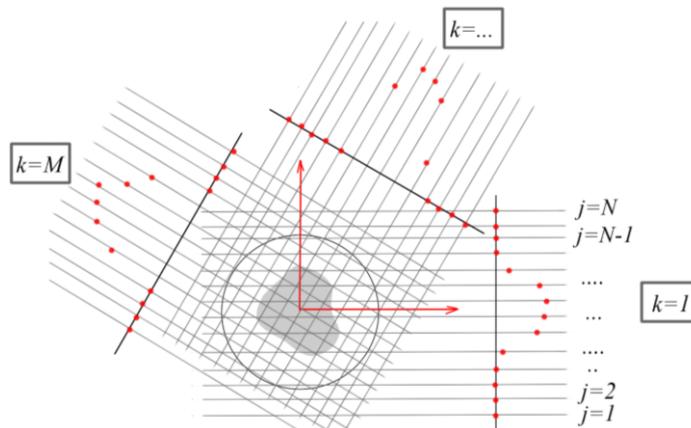


Figura 14 Parametri di campionamento M e N

Per evitare l'insorgere di artefatti nella ricostruzione, è necessario che il rapporto tra detti parametri sia $M/N \cong \pi/2$ (Figura 15). Tale rapporto può essere approssimato in modo da avere un numero di proiezioni approssimativamente uguale al numero di punti in ogni proiezione ($M \cong N$) [38]. Infine, è evidente come il numero di punti N in ogni proiezione debba soddisfare il teorema di campionamento precedentemente discusso.

Nel seguito, per generalizzare i risultati, le grandezze geometriche sono normalizzate con riferimento alla deviazione standard σ della distribuzione Gaussiana della PI, mentre i valori di pressione della distribuzione della PI saranno riferiti al massimo della distribuzione stessa. Il valore massimo della distribuzione è definito in modo tale che la FI del getto, ossia il suo flusso di QM globale, sia pari a $F = 2\sigma^2$. Infine, si assume un'area oggetto di analisi di forma quadrata con lato adimensionalizzato paria a $R/\sigma = 6$ ed una spaziatura adimensionale nel campionamento della proiezione inferiore al requisito minimo imposto dalla banda del segnale, ovvero minore di $\Delta x/\sigma = \pi/3 \cong 1$ ¹³.

¹² Grossolanamente, possiamo dire che riducendo di un ordine di grandezza la spaziatura della griglia di campionamento, si avrebbe una rappresentazione mediante interpolazione lineare sufficientemente fedele.

¹³ Si è posto $1/\Delta x = 6\sigma_f = 3/\pi\sigma$

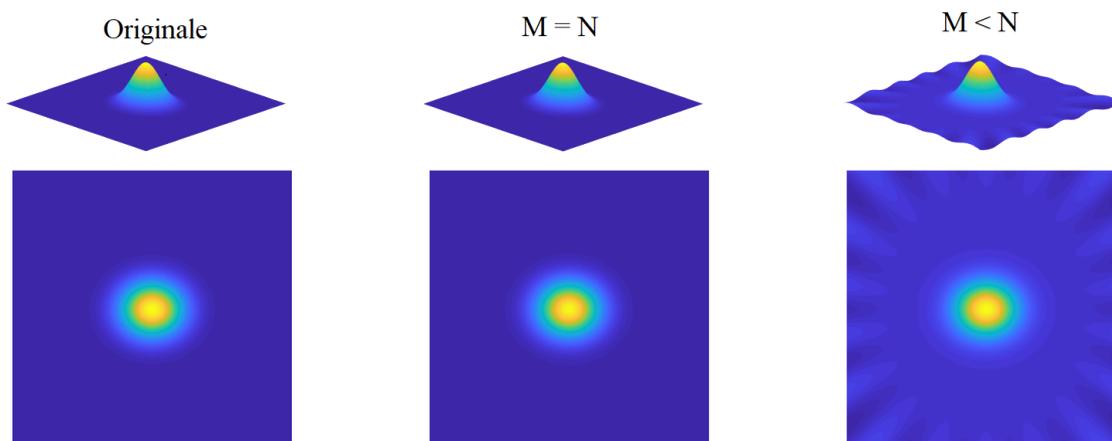


Figura 15 Ricostruzioni di un andamento noto per diversi parametri di campionamento.

2.5.1 Sensore puntuale ideale

Con sensore puntuale ideale si intende un sensore avente l'elemento sensibile (spina o foro circolare) di dimensione infinitesima. È evidente come un sensore infinitesimo sia in grado di misurare il valore locale della PI senza introdurre alcun errore. Ne consegue che l'NRMSE è sempre uguale a zero, avendo ad ogni punto di misura la funzione campionata esattamente il valore dell'andamento teorico. Per quanto riguarda invece l'NME, questo è statisticamente influenzato dalla posizione relativa tra la griglia di misurazione e quella della distribuzione della PI. Con riferimento alla distribuzione gaussiana simmetrica bidimensionale e alla sua deviazione standard, l'NME è compreso nell'intervallo:

$$0 \leq NME \leq 1 - e^{-\frac{1}{4}\left(\frac{\Delta x}{\sigma}\right)^2} \quad (8)$$

dove l'estremo inferiore si ottiene quando il massimo della distribuzione coincide con un punto della griglia di misurazione, mentre il valore maggiore dell'errore si ha nel caso in cui il massimo cada a metà della griglia di misura.

2.5.2 Sensore puntuale reale

A differenza del caso ideale, l'elemento sensibile reale ha necessariamente dimensioni finite. Occorre, pertanto, analizzare come queste incidono sulla misurazione. A tale scopo il sensore di tipo puntuale è stato simulato come un filtro spaziale di media. Detto filtro di forma circolare di raggio r viene traslato nel piano in modo da coprire l'intera area di indagine. La Figura 16 riporta l'effetto di attenuazione sulla ricostruzione dovuto alla dimensione del sensore. In Figura 17 è riportata una sezione radiale della distribuzione della PI normalizzata. La linea continua si riferisce alla distribuzione teorica di riferimento, mentre i simboli si riferiscono alle ricostruzioni ottenute mediante un sensore puntuale reale avente raggio adimensionale r/σ di 0.2, 0.5 e 1

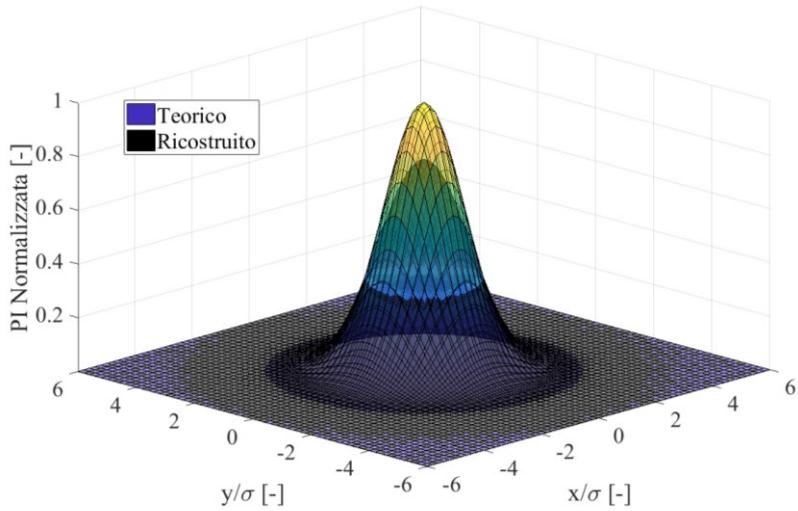


Figura 16 Tecnica puntuale: effetto della dimensione del sensore per $r/\sigma=1$

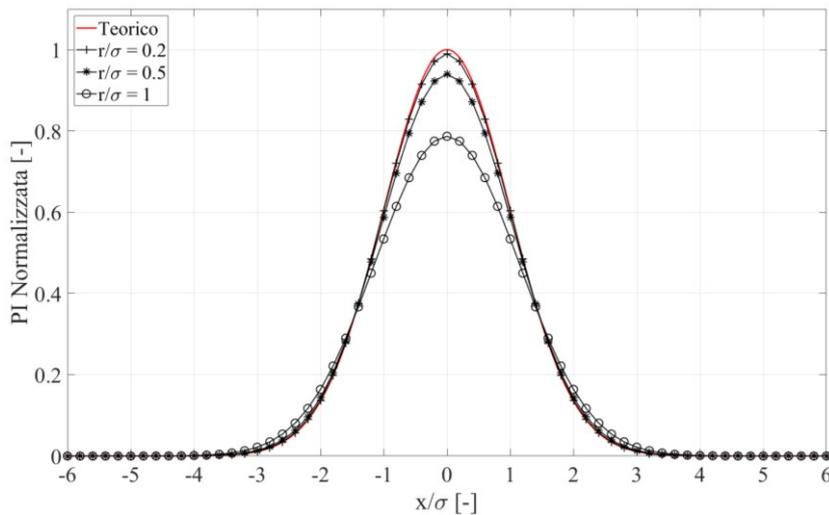


Figura 17 Tecnica puntuale: effetto della dimensione del sensore

La Figura 18 riassume le prestazioni del sensore puntuale reale. Gli indici di errore definiti sono riportati al variare della dimensione del raggio adimensionalizzato dell'elemento sensibile. In questo diagramma, l'effetto della griglia di campionamento, descritto dall'equazione (8), non è preso in considerazione, cioè la griglia di campionamento è selezionata in modo che il massimo della PI coincida con un punto di misura della griglia. In tal caso la spaziatura della griglia di campionamento non ha alcun ruolo, tuttavia, come già affermato deve essere definita in accordo con il teorema del campionamento. La Figura 17 e Figura 18 evidenziano come le prestazioni del sensore puntuale reale dipendono fortemente dalla dimensione relativa del sensore.

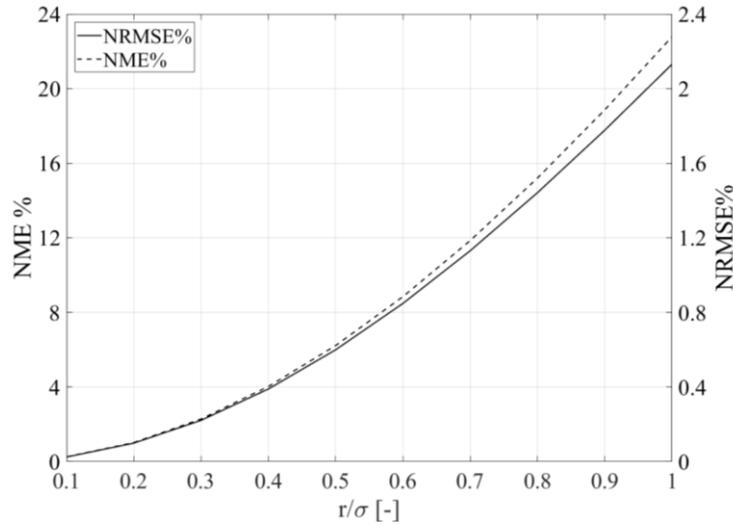


Figura 18 Tecnica puntuale reale: Indici errore vs. dimensione del sensore

Infine, il numero di punti di misura n nella zona di misura, assunta, come detto, di forma quadrata, è pari a:

$$n = \left(\frac{R}{\Delta x}\right)^2 = \left(\frac{R}{\sigma}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{\Delta x}\right)^2 \quad (9)$$

inversamente proporzionale al quadrato della spaziatura adimensionale della griglia di campionamento.

2.5.3 Sensore SMSA ideale

Come per il sensore puntuale, nella simulazione del sensore SMSA ideale l'elemento sensibile è considerato di dimensione caratteristica trascurabile, si tratta cioè di una lunga lama dallo spessore infinitesimo che taglia diametralmente la distribuzione della PI.

A partire da una distribuzione nota, ottenuta con risoluzione di due ordini di grandezza superiore alla minima di campionamento, si sono ottenute mediante l'algoritmo diretto (che implementa la trasformata di Radon di Equazione 5) le proiezioni agli angoli stabiliti. Da queste è stata quindi ricavata la ricostruzione, mediante l'algoritmo FBP, e confrontata con quella nota di partenza. Con questa simulazione si intende quindi mettere in evidenza l'effetto dei parametri di campionamento.

Come detto in precedenza, la spaziatura angolare è legata al numero di punti N che costituisce ogni singola proiezione ($M \cong N$). Sarà quindi dipendente sia dalla dimensione dell'area indagata R che dalla spaziatura lineare impiegata nella singola proiezione Δx secondo la seguente relazione $\Delta\theta = 180^\circ/M \cong 90^\circ \Delta x/R$.

Come visto la tecnica SMSA impiega gli algoritmi tipici delle tecniche tomografiche. L'algoritmo di retroproiezione filtrata adottato necessita della definizione di ulteriori parametri relativi all'interpolazione dei dati costituenti le singole proiezioni e di filtraggio delle stesse. L'influenza di tali parametri non è stata direttamente analizzata, ed è stata scelta un'interpolazione mediante *spline* ed un filtro di *Ram-Lak* moltiplicato per una finestra di *Hamming* per quanto riguarda il filtraggio; queste due scelte rappresentano un buon compromesso tra accuratezza e tempo di ricostruzione [38], [40].

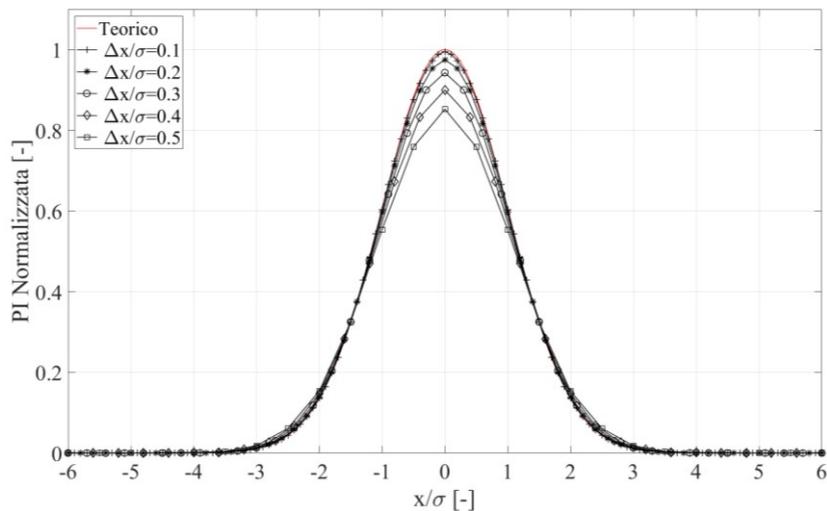


Figura 19 Tecnica SMSA: distribuzione della PI ed effetto del campionamento

La Figura 19 riporta una sezione trasversale radiale della PI 2-D normalizzata. La linea continua rappresenta la distribuzione teorica, mentre i simboli si riferiscono alle distribuzioni ricostruite ottenute mediante la tecnica SMSA simulata. La spaziatura di campionamento normalizzata è analizzata nell'intervallo $\Delta x/\sigma = 0.1 \div 0.5$, ovvero con spaziature al di sotto della minima richiesta, pari a 1, per campionare correttamente la singola proiezione.

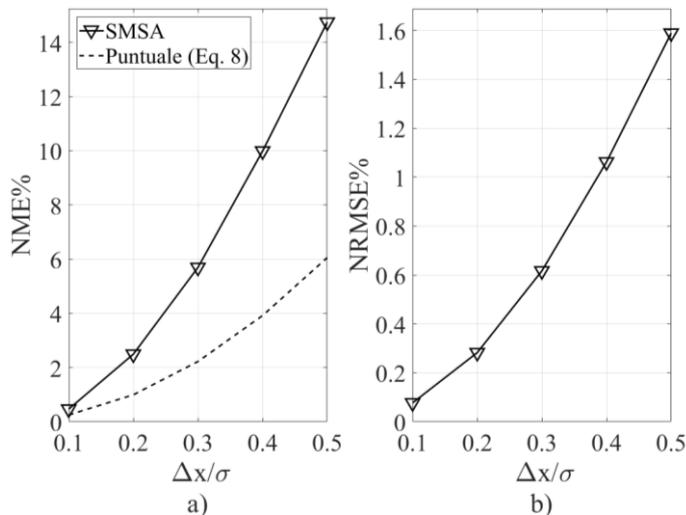


Figura 20 Tecnica SMSA: Indici di errore in funzione dei parametri di campionamento

Gli indici di errore NME e NRMSE sono riportati in Figura 20 in funzione della spaziatura di campionamento. Queste figure mostrano come gli errori di ricostruzione siano entrambi proporzionali alla spaziatura di campionamento normalizzata e seguono andamenti simili. Si nota, inoltre, come l'errore NME del sensore ideale SMSA è sempre maggiore del massimo NME del sensore puntuale ideale (linea tratteggiata in Figura 20a). Pertanto, nel caso ideale, ovvero con elemento sensibile di dimensioni infinitesime, un sensore puntuale ha prestazioni sempre superiori a quelle del sensore SMSA.

2.5.4 Sensore SMSA reale

A differenza del caso ideale, l'elemento sensibile presenta una larghezza finita w . Gli integrali di linea che costituiscono le proiezioni di input dell'algoritmo di ricostruzione della tecnica SMSA sono quindi ottenuti ad ogni posizione dividendo la forza rilevata dall'elemento sensibile per lo spessore dello stesso. È quindi evidente come la distribuzione della pressione di impatto venga "spalmata", ad ogni punto di misura, sull'elemento sensibile e le misurazioni effettuate saranno delle approssimazioni dell'integrale di linea misurabile con un sensore ideale a spessore nullo.

Come nel caso ideale, a partire da una distribuzione nota si sono ottenuti gli integrali di linea mediante l'algoritmo diretto. Il valore di integrale di linea rilevato è stato approssimato mediante la regola di Cavalieri-Simpson tenendo conto dell'integrale sul bordo sinistro, su quello destro ed al centro dell'elemento sensibile. A partire da questo valore si sono quindi ottenute le proiezioni e quindi la PI ricostruita.

La Figura 21 riporta l'effetto della dimensione finita dell'elemento sensibile e dei parametri di campionamento in termini di NME e NRMSE. Sugli stessi grafici è riportato con linea tratteggiata l'andamento degli indici di errore precedentemente valutati per il sensore puntuale reale (Figura 18).

L'analisi della Figura 21 evidenzia come mediante la tecnica SMSA sia sempre possibile realizzare delle misurazioni con un'incertezza inferiore rispetto a quella ottenibile impiegando un sensore di tipo puntuale, diminuendo in modo opportuno la spaziatura della griglia di campionamento. A titolo di esempio, considerando una dimensione dell'elemento sensibile puntuale e del sensore SMSA pari a $r/\sigma = w/\sigma = 0.5$, la tecnica SMSA permette di ottenere un errore di ricostruzione inferiore adottando una spaziatura adimensionale $\Delta x/\sigma$ inferiore a 0.3. Per comprendere il diverso comportamento tra il sensore puntuale e la tecnica SMSA, si osservi che quest'ultima si basa su misurazioni integrali e che la dimensione dell'elemento sensibile influisce nelle misurazioni solo in una delle due dimensioni (x e y del piano). Di contro, il sensore puntuale introduce un effetto di filtraggio in entrambe le direzioni.

Quando la griglia di campionamento diventa troppo rada, la tecnica SMSA ha invece prestazioni scadenti, essenzialmente causate dalla carenza di proiezioni, indispensabili per una corretta ricostruzione.

Infine, il numero di punti di misura n nell'area di misura secondo lo schema previsto dalla tecnica SMSA è:

$$n = NM = \left(\frac{R}{\Delta x}\right)^2 = \left(\frac{R}{\sigma}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{\Delta x}\right)^2 \quad (10)$$

inversamente proporzionale al quadrato della spaziatura adimensionale nel campionamento della singola proiezione ed uguale a quello della tecnica puntuale (Equazione 9).

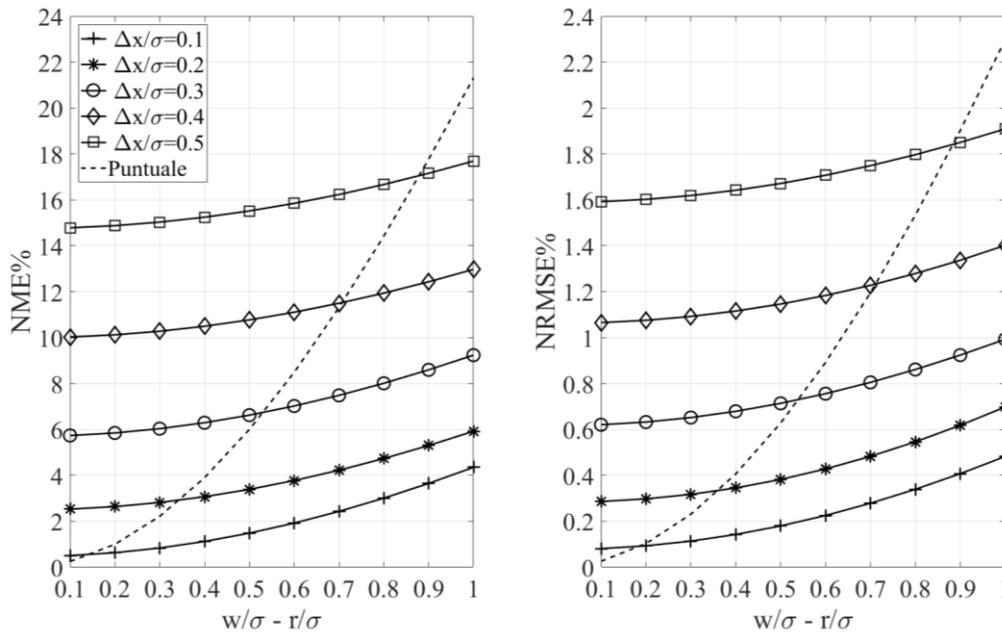


Figura 21 Tecnica SMSA reale: Indice errore vs dim. elem. sensibile e campionamento

2.6 Realizzazione del sensore

Nonostante la presente tesi nasca da esigenze correlate all'ambito dei motori per applicazioni navali, si è deciso di realizzare il sensore SMSA in modo da poter essere impiegato anche nell'analisi di spray diesel automobilistici. L'applicazione automobilistica presenta le medesime problematiche riscontrabili nello studio di spray diesel di motori navali, tuttavia, essendo le dimensioni dell'area di impatto e la FI inferiori, il rilevamento della PI risulta maggiormente critico. Un tipico spray automobilistico potrebbe presentare un'area d'indagine di 6 mm ad una distanza del piattello dal foro di iniezione di 20 mm [35]. Ne consegue che la distribuzione della PI ad un dato istante temporale possa essere assunta simile ad una distribuzione gaussiana avente deviazione standard spaziale σ pari a 1 mm. Si è quindi deciso di realizzare un sensore avente spessore w dell'elemento sensibile pari a 0.5 mm in modo da avere uno spessore adimensionalizzato $w/\sigma = 0.5$. Ovviamente avvicinandosi al foro di iniezione, ipotizzando il medesimo angolo di diffusione e una distribuzione sempre gaussiana, ne deriva una deviazione standard via via inferiore e, pertanto un parametro w/σ maggiore. L'errore commesso seguirà gli andamenti di Figura 21.

Come visto, l'elemento sensibile deve essere sufficientemente lungo da attraversare diametralmente la distribuzione della PI fino alle zone periferiche ove la stessa si annulla. Inoltre, la dimensione del piattello deve essere tale da accogliere totalmente lo spray in ogni posizione derivante dalla griglia di campionamento. Per questo motivo si è realizzato un piattello del diametro di $D = 64$ mm al centro del quale è posizionato un elemento sensibile della lunghezza di 55 mm. Tali dimensioni permettono di analizzare getti (assunto un angolo di diffusione di 18°) fino ad una distanza di circa 40 mm dal foro di iniezione. Ovviamente

un piattello di tali dimensioni potrebbe interferire, a distanza ravvicinata dal foro, con gli altri getti che emergono dal polverizzatore. È pertanto indispensabile in detti casi, isolare lo spray oggetto di indagine mediante opportuni accorgimenti, quali ad esempio una capsula posizionata sul polverizzatore che raccoglie i getti circostanti, oppure uno schermo che li devia impedendone l'impatto sul sensore stesso.

In Figura 22 è rappresentato l'elemento sensibile del sensore SMSA. La forma è stata definita in modo da avere spessore ridotto della parte esposta mantenendo comunque un'elevata rigidezza dell'elemento così che la forza venga trasmessa senza deformazioni apprezzabili dell'elemento stesso.



Figura 22 Lama sensore SMSA. Spessore parte esposta $w=0.5$ mm. Lunghezza 55 mm

2.6.1 Versione 1.0

La prima versione realizzata del sensore SMSA è rappresentata nelle Figura 23, 24 e 25. In questa versione del sensore la superficie di impatto è stata realizzata in due metà (1) in grado di scorrere indipendentemente l'una dall'altra su di una guida (2) ricavata nel corpo del sensore così da poter essere accostate all'elemento sensibile (4). Il posizionamento delle metà del piattello è effettuato agendo su due viti micrometriche (3) per ciascuna delle due parti. L'elemento sensibile è a diretto contatto con due trasduttori piezoelettrici (5) posizionati alle sue estremità. Il corpo del sensore è anche esso costituito da due metà realizzate in materiale ferromagnetico unite da una parte centrale con bassissima permeabilità magnetica. Al di sotto del trasduttore un magnete (6) garantisce il collegamento tra la lama e i trasduttori attraverso il circuito magnetico che si chiude sugli stessi. L'impiego di questo prototipo del sensore SMSA ha permesso di far emergere alcune criticità. In particolare, le misurazioni, si presentavano squilibrate nel momento in cui il centro dell'impatto del getto si verificava su di una metà del sensore piuttosto che sull'altra. Un'analisi più approfondita ha permesso di evidenziare come tale problema fosse imputabile alla non perfetta complanarità tra la superficie esposta dell'elemento sensibile e dei due semi-piattelli. Tale requisito è molto difficile da rispettare nel momento in cui non si ha la possibilità di posizionare verticalmente la lama. Inoltre, le tolleranze di lavorazione nella realizzazione delle guide su ciascuna delle due metà e sul corpo del sensore rappresentano un parametro particolarmente critico. Per questi motivi è stata sviluppata una seconda versione del sensore SMSA.

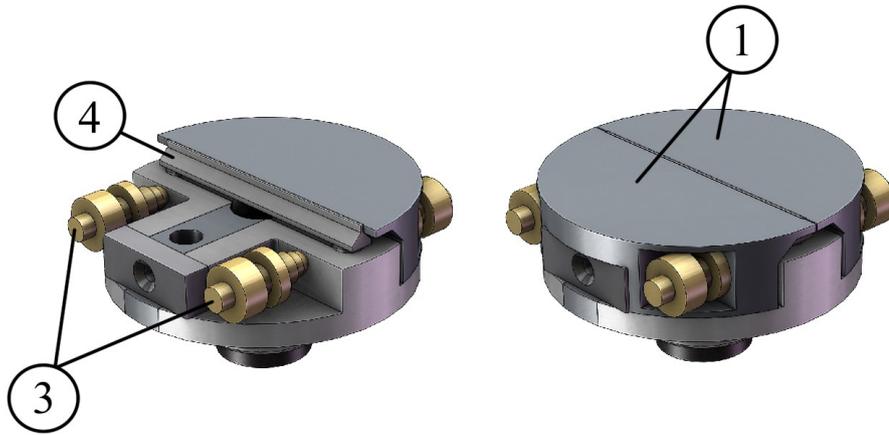


Figura 23 Versione 1.0 sensore SMSA. Superficie di impatto in due metà

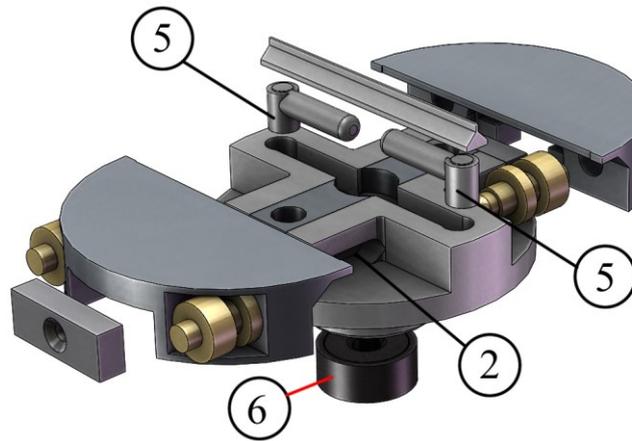


Figura 24 Versione 1.0 sensore SMSA. Vista esplosa

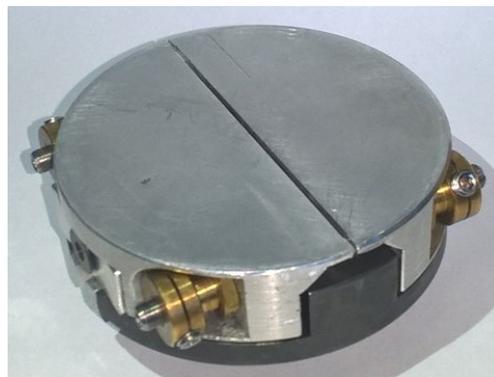


Figura 25 Versione 1.0 sensore SMSA. Foto del sensore

2.6.2 Versione 2.0

Le criticità emerse con la prima versione del sensore SMSA hanno portato alla definizione del sensore rappresentato in Figura 26. In questa versione la superficie di impatto è costituita da un unico pezzo (1). Il suo diametro è il medesimo della versione precedente, ovvero $D = 64 \text{ mm}$, sufficientemente ampio da accogliere l'intero getto in tutte le posizioni di misurazione. Il vantaggio di una superficie di impatto unica risiede nell'eliminare del tutto i possibili errori di posizionamento tra le due metà; inoltre, in questo modo, la rigidezza del sensore è incrementata, e si eliminano così eventuali deformazioni e spostamenti delle parti che, interagendo meccanicamente con l'elemento sensibile, ne possono alterare la misurazione. Nel mezzo della superficie di impatto è realizzata una cava attraverso la quale l'elemento sensibile (2), descritto in precedenza, è esposto alla PI conseguente all'impatto del getto. Al di sotto dell'elemento sensibile due trasduttori di forza piezoelettrici (3) *Kistler 9213B* misurano la FI che agisce sull'elemento. Il collegamento tra la lama e tali trasduttori è garantito da due magneti al Neodimio (4) dello spessore di 1 mm . L'elemento sensibile ed i trasduttori sono collocati in un alloggiamento (5) libero di scorrere nel corpo del sensore (6). Al fine di evitare accoppiamenti elettrici e conseguenti disturbi nei segnali rilevati, il corpo del sensore è stato realizzato in materiale polimerico ad elevata densità per mantenerne comunque elevate proprietà meccaniche. Agendo su due viti (7), è possibile posizionare verticalmente l'elemento sensibile in modo che la sua superficie superiore sia complanare alla superficie del piattello. Inferiormente al corpo del sensore, è montato un terzo trasduttore piezoelettrico, *Kistler 9021*; questo sensore misura la QM globale del getto che impatta sulla superficie del sensore. La Figura 27 riporta una foto della seconda versione del sensore SMSA realizzata.

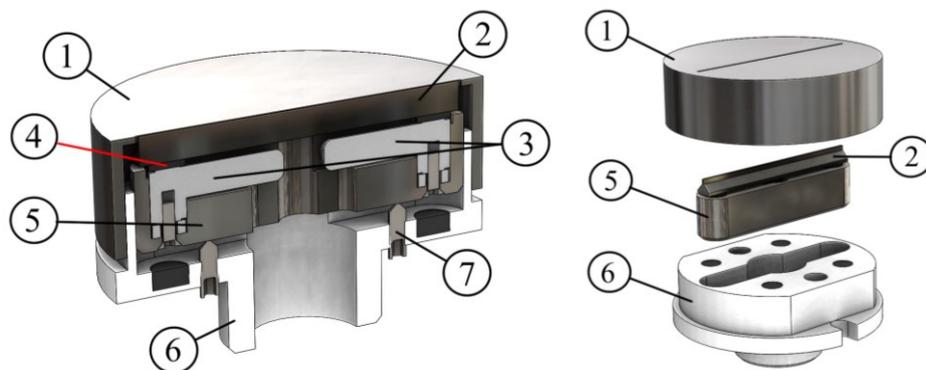


Figura 26 Versione 2.0 sensore SMSA.

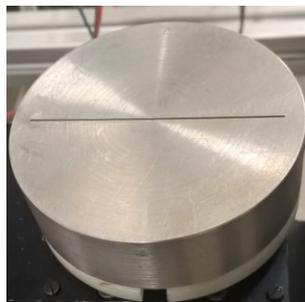


Figura 27 Versione 2.0 sensore SMSA. Foto del sensore

2.7 Analisi Sperimentale

Al fine di validare il principio di funzionamento del sensore SMSA è stata condotta un'analisi sperimentale in grado di valutare le potenzialità di questa tecnica evidenziandone le criticità. Sebbene il sensore nasca principalmente per l'analisi di spray di combustibile per applicazioni motoristiche, la validazione è stata condotta con riferimento ad un getto d'aria¹⁴ in condizioni di post-espansione.

Le motivazioni di questa scelta sono molteplici ed innanzitutto motivate da una certa carenza in letteratura riguardo la distribuzione spaziale della QM di spray diesel, a differenza di quanto non lo sia invece per getti di soli aeriformi. Analizzando getti d'aria quindi si ampliano notevolmente le possibilità di verifica delle distribuzioni di QM rilevate mediante il sensore SMSA potendole confrontare con i risultati derivanti da una consolidata e copiosa produzione scientifica. In secondo luogo, come si vedrà nel seguito, la QM assunta da questi getti presenta, per determinate condizioni, delle distribuzioni spaziali estremamente peculiari ed il rilevamento sperimentale di questi andamenti caratteristici presenta alcune criticità tali da rendere l'analisi estremamente significativa nella validazione del sensore SMSA. Non da ultimo, come detto, l'impiego di motori DF e di motori a gas rappresenta una delle principali soluzioni nel contesto di riduzione delle emissioni [44]. In queste tipologie di motori, l'alimentazione del combustibile gassoso può essere realizzata mediante Mixer, oppure mediante iniettori. Nel caso di iniettori, che a seconda dei casi possono essere collocati nei collettori di aspirazione o affacciati direttamente in camera di combustione, il getto di gas iniettato effluisce in condizioni di post-espansione e pertanto con le medesime strutture e distribuzioni della PI dei getti analizzati nella presente tesi [45]. In questo modo il sensore SMSA è analizzato con riferimento ad una possibile applicazione motoristica.

2.7.1 Introduzione ai getti in post-espansione

Quando un aeriforme è rilasciato attraverso un ugello semplicemente convergente ed il rapporto di espansione β , definito come il rapporto tra la pressione dell'ambiente di valle p_∞ e quella dell'ambiente di monte p_0 , è inferiore a quello critico¹⁵ β_{cr} , il fluido si presenta nella sezione di uscita dell'ugello ad una pressione (critica) superiore a quella dell'ambiente di valle. In tali condizioni, una post-espansione permette il raggiungimento dell'equilibrio delle pressioni nell'ambiente di valle. In questo caso il getto è definito sotto-espanso. Gli effetti viscosi e di compressibilità del fluido competono a determinare la struttura complessiva del getto, la quale comunemente viene distinta in tre diverse zone, schematizzate in Figura 28 [46], definite di corto raggio, di transizione e di lungo raggio.

La zona di corto raggio è principalmente dominata dagli effetti di compressibilità, mentre all'allontanarsi dalla sezione di uscita, gli effetti viscosi prendono il sopravvento.

¹⁴ Come detto in precedenza, i sensori basati sulla misura indiretta della QM attraverso il rilevamento della FI, non possono distinguere tra la fase liquida ed aeriforme che costituiscono lo spray. Non vi è differenza alcuna quindi che il getto sia monofase o bifase.

¹⁵ Il rapporto critico di espansione per un efflusso isoentropico unidimensionale è funzione del coefficiente di dilatazione adiabatica. Si ottengono quindi valori del rapporto critico di 0.487 per gas monoatomici, 0.528 per gas biatomici e 0.54 nel caso di gas poliatomici.

Questo fa sì che le proprietà del getto, quali la distribuzione di velocità e di temperatura assumano comportamenti estremamente diversi tra le due zone.

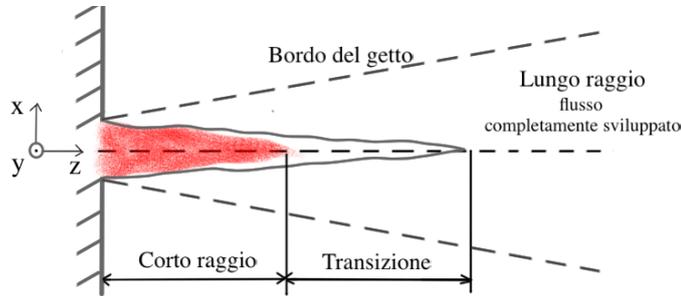


Figura 28 Regioni principali di un getto sotto-espanso

A seconda del rapporto di espansione, nella zona di corto raggio, si possono determinare le tre possibili situazioni nel seguito brevemente descritte.

La descrizione del fenomeno e le figure riportate sono, per semplicità, bidimensionali essendo il comportamento ideale del getto assial-simmetrico. Va precisato, comunque, come il passaggio da una situazione all'altra non avvenga in modo netto, ma dipenda da numerosi fattori, pertanto, gli intervalli di seguito riportati sono puramente indicativi.

Quando il rapporto di espansione β è compreso tra $0.5 \leq \beta \leq 0.25$ si parla di getti moderatamente sotto-espansi ed il getto assume la caratteristica struttura "a diamante" o ad "X" rappresentata in Figura 29. Tale struttura è dettata dalle onde di espansione *a)* che quando raggiungono la linea a pressione costante *b)* ove la pressione eguaglia quella ambiente, sono riflesse in onde di compressione. Tali onde convergono quindi verso l'asse del getto e coalescono in un urto obliquo *c)* il quale, convergendo in direzione dell'asse del getto, viene riflesso verso l'esterno in un urto definito riflesso *d)*. Tale intersezione avviene in corrispondenza dell'asse. Quando l'urto riflesso incontra a sua volta la linea a pressione costante può dare luogo ad un nuovo ventaglio di espansione e quindi al replicarsi della struttura precedentemente descritta [47].

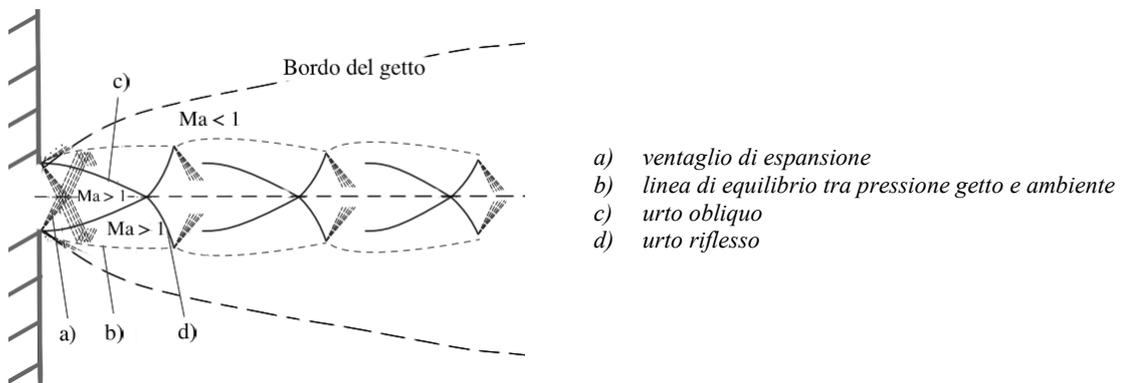


Figura 29 Struttura di un getto moderatamente sotto-espanso

Nel caso in cui $0.25 \leq \beta \leq 0.14$ il getto è definito fortemente sotto-espanso, la conseguente struttura è schematizzata in Figura 30. In tale situazione la riflessione non avviene più in corrispondenza dell'asse del getto e si assiste alla comparsa di urti retti *e)* chiamati dischi di Mach, che separano zone supersoniche a monte del disco da zone sub-soniche a valle di questo. Il punto di intersezione tra l'urto obliquo, il disco di Mach e l'urto riflesso è definito punto triplo *f)*. Da questo punto triplo diparte uno strato di separazione *g)* che separa il cuore subsonico, a valle del disco di Mach, dal flusso supersonico che lo circonda [48], [49].

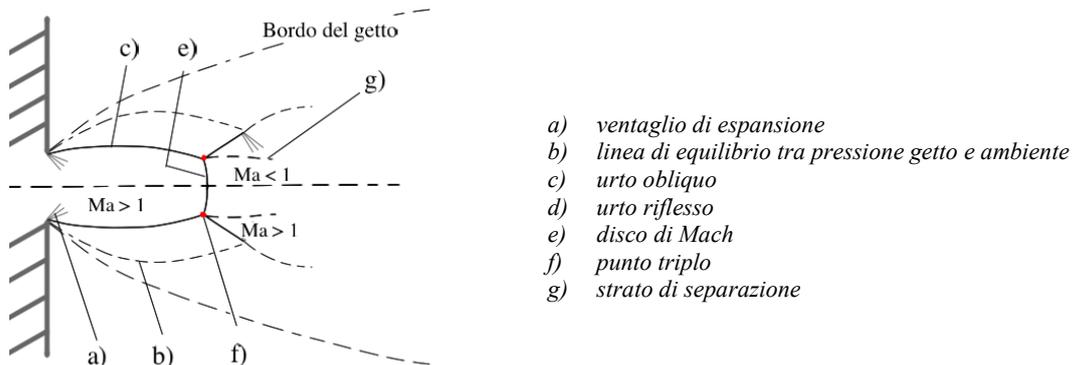


Figura 30 Struttura di un getto fortemente sotto-espanso

Infine, qualora $\beta < 0.14$, il getto è definito estremamente sotto-espanso e la struttura che lo caratterizza è schematizzata in Figura 31. In questo caso il numero di celle si riduce fino ad avere un nucleo dominato dalla prima cella. In questa situazione il diametro del getto, ovvero la zona di miscelamento che circonda il nucleo, si riduce rispetto ai precedenti casi portando ad avere un nucleo particolarmente lungo ove non si ha miscelamento tra gas iniettato e gas circostante [46] [47]. Ne consegue un angolo di diffusione¹⁶ trascurabile.

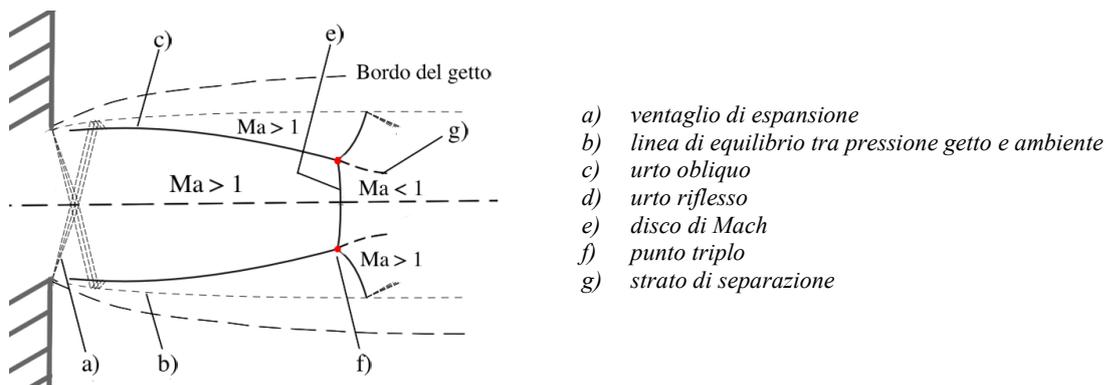


Figura 31 Struttura di un getto estremamente sotto-espanso

Per quanto riguarda la zona di lungo raggio, il getto si presenta perfettamente espanso ed il flusso completamente sviluppato e subsonico. La temperatura e la velocità sono

¹⁶ Le difficoltà intrinseche nella definizione del bordo e la forma curva di questo fanno sì che l'angolo di diffusione venga di solito definito come l'angolo formato da due semirette uscenti dall'asse del foro ed intersecanti il bordo del getto ad una data distanza dalla sezione di uscita [14]. Si veda anche il paragrafo 3.1.2 Angolo di diffusione

inversamente proporzionali alla distanza dal piano di uscita, mentre l'andamento radiale segue un profilo gaussiano [46] [47].

Questi diversi comportamenti riscontrabili nell'evoluzione di un getto portano, a seconda del rapporto di espansione e della distanza del piano di impatto, ad avere diverse distribuzioni di PI che possono assumere andamenti simil-gaussiani oppure con una caratteristica forma con un avvallamento nella parte centrale [50]–[52].

In Figura 32 sono riportati da [52] gli andamenti della PI ottenuti a diverse distanze Z del piano di impatto. Gli andamenti si riferiscono ad un rapporto di pressione pari a 1:5, e quindi in condizioni fortemente sotto-espansive, per ugelli di diametro $d_N = 200 \mu\text{m}$ (a) e $d_N = 25.4 \text{ mm}$ (b). Il valore dalla distribuzione di pressione è riportato in termini adimensionali secondo il seguente coefficiente di pressione:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{p^o - p_\infty} \quad (11)$$

dove p è la pressione locale assunta dalla PI, p_∞ la pressione dell'ambiente di mandata (pressione ambiente) e p^o è la pressione nel serbatoio di accumulo.

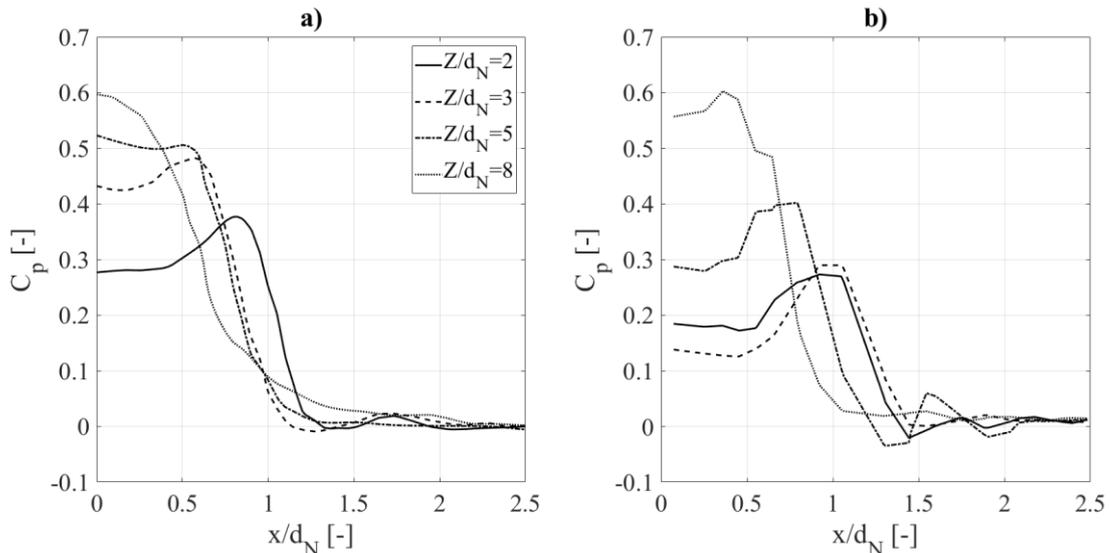


Figura 32 PI a) Diametro ugello 200 μm e b) 25.4mm. Rapp. di pressione di 5:1 [52]

Analizzando queste distribuzioni si nota come la forma a “vulcano” si manifesti alle distanze ugello-superficie di impatto inferiori, qui riportate normalizzate al diametro dell'ugello. Tale comportamento è conseguente al manifestarsi della cosiddetta bolla di ristagno o di ricircolo. Il meccanismo di formazione di questa bolla, ed il tipo di flusso che si realizza all'interno, per lungo tempo solo evidenziato dall'analisi sperimentale [53], è ben descritto in [51].

Essenzialmente, quando lo strato di separazione, originatosi dal punto triplo, Figura 30 e 31 curve g), impatta su di una superficie, si assiste ad un incremento della pressione su di una

regione anulare della zona di impatto. Se tale pressione risulta sufficientemente alta, parte del fluido viene confinata entro questa zona portando così alla formazione della bolla di ristagno. Il principale indicatore del manifestarsi di questo fenomeno è proprio la distribuzione assunta dalla PI la quale assume una caratteristica forma a “vulcano” caratterizzata dall’aver il picco di pressione lontano dall’asse del getto ed in prossimità del bordo di questa zona di ricircolo [45], [46], [51], [53], [54].

Osservando la posizione del picco di pressione si può, inoltre, notare come questo si allontani dal centro diminuendo la distanza ugello-superficie di impatto. Questo comportamento è spiegabile osservando la Figura 31. La forma della cella, data dall’urto obliquo c), è infatti definita a botte, visto l’andamento curvo seguito da questa. La posizione del disco di mach e) ed il suo diametro sono influenzati dalla distanza della superficie di impatto [51]. Se sussistono le condizioni per la formazione della bolla di ricircolo, avvicinando la superficie di impatto all’ugello si diminuisce la distanza alla quale il disco si forma e se ne aumenta il diametro. Come conseguenza, la bolla di ricircolo presenterà un diametro maggiore e così gli andamenti della PI presenteranno un picco di pressione più lontano dall’asse del getto. Allontanando la superficie di impatto dall’ugello ci si troverà, invece, nella zona di lungo raggio, la quale, come detto, è dominata dagli effetti viscosi. A tali distanze la distribuzione della PI assume un andamento gaussiano.

La Figura 32 permette, inoltre, di evidenziare come getti, evolventi nelle medesime condizioni di post-espansione, esibiscano andamenti della PI analoghi, indipendentemente dalla dimensione dell’ugello impiegato [52], [55].

Sfruttando quindi le peculiarità dei getti sotto-espansi è possibile generare distribuzioni della PI caratteristiche variando la distanza del piano di impatto e del rapporto di espansione [50]. Inoltre, attraverso tali parametri è possibile controllare la dimensione dell’area di impatto ed il valore di QM globale del getto sulla superficie.

2.7.2 Ugello Analizzato

La definizione della geometria dell’ugello è stata fatta sulla base di varie considerazioni che possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

- realizzare andamenti della PI in grado di evidenziare i limiti del trasduttore proposto in termini di gradiente di pressione rilevabile;
- riprodurre spray di dimensioni e forza di impatto confrontabili con quella di spray diesel automobilistici;
- consentire l’allestimento di un layout sperimentale facilmente realizzabile con la dotazione dei nostri laboratori.

La scelta è caduta su un ugello commerciale. Nella definizione dell’esperimento si è deciso di impiegare un ugello commerciale (*G_3009 Spraying Systems Co.*) semplicemente convergente di diametro $d_N = 1.8 \text{ mm}$. La geometria interna è stata ottenuta mediante calco in silicone ed è riportata in Figura 33.

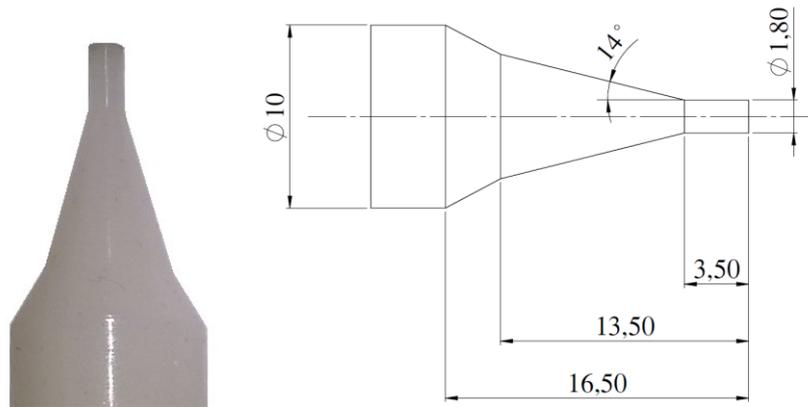
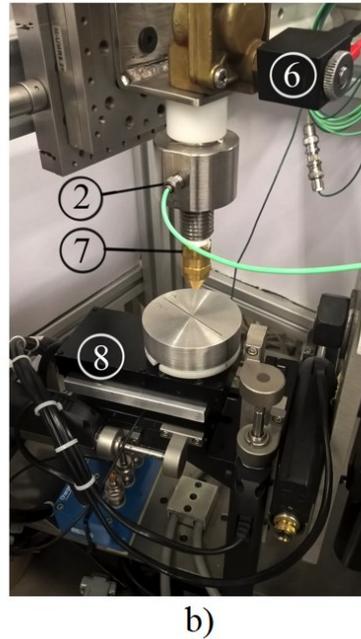
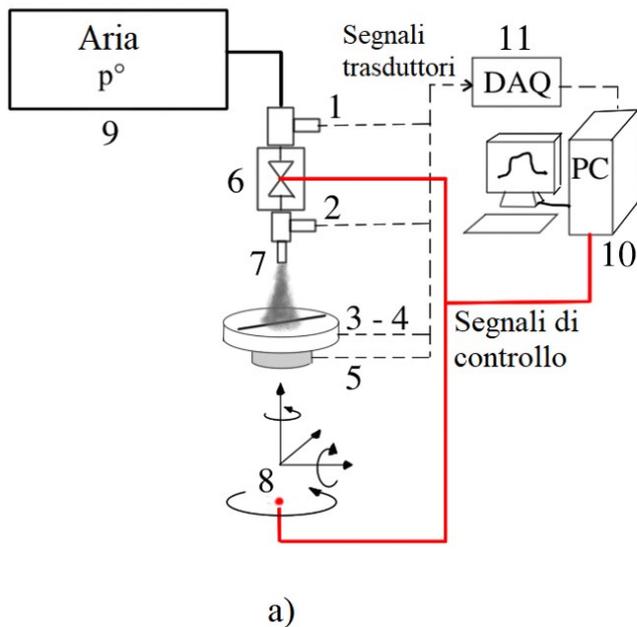


Figura 33 Calco ugello G_3009 e rilievo dimensionale

L'ugello è stato alimentato con aria ad una pressione assoluta di 0.725 MPa . La scelta della sezione dell'ugello e delle condizioni di alimentazione è stata effettuata in modo da ottenere un valore della QM globale del getto paria a circa 2 N ed un area di impatto di circa 3 mm di diametro in accordo con i parametri propri di spray diesel automobilistici [35]. In questo modo si estende la validazione del sensore SMSA anche a tale applicazione per forze e dimensioni della distribuzione della PI, replicando i profili di PI complessi dei getti sotto-espansi

2.7.3 Setup sperimentale

La Figura 34a) riporta uno schema del setup sperimentale realizzato. L'ugello semplicemente convergente (7) è collegato ad un'elettrovalvola (6) atta a generare l'evento di iniezione. Due trasduttori di pressione permettono di misurare la pressione nel volume di accumulo (1) e a monte dell'ugello (2). Il sensore SMSA è montato su di un sistema di posizionamento micrometrico a 6 gradi di libertà (8). La Figura 35 riporta uno schema del sistema di posizionamento dove in rosso sono rappresentati gli attuatori lineari, mentre in giallo quelli atti alla rotazione. Precedenti attività di ricerca hanno permesso di evidenziare come il sistema di posizionamento del sensore debba avere una risoluzione di posizionamento dell'ordine di $10 \mu\text{m}$ [56]. Un software originale sviluppato in *Matlab* permette di gestire in modo completamente autonomo la campagna di indagine del getto, ovvero il sistema di acquisizione dati (DAQ), l'elettrovalvola ed il sistema di posizionamento. I segnali provenienti dai tre trasduttori piezoelettrici (3-4-5) sono condizionati da un amplificatore di carica *ICAM-5073A*, e le corrispondenti tensioni acquisite dal DAQ. I trasduttori piezoelettrici *Kistler 9213B*, atti al rilevamento della forza agente sull'elemento sensibile del sensore SMSA, sono stati calibrati nell'intervallo $0 \div 1 \text{ N}$ ottenendo un'incertezza di $\pm 2.5\%$ del FSO.



1	Trasduttore di pressione	<i>Kulite ETM-375</i>
2	Trasduttore di pressione	<i>Kistler 601</i>
3-4	Trasduttore di forza	<i>Kistler 9213B</i>
5	Trasduttore di forza	<i>Kistler 9021 (QM Globale)</i>
6	Elettrovalvola	
7	Ugello	<i>Spraying System Co. G3009</i>
8	Sistema posizionamento a 6 g.d.l.	Rotazioni: 2 x <i>Newport RV80CC</i> / 1 x <i>PR50CC</i> Traslazioni: 3x <i>Newport LTA_HS</i>
9	Volume di accumulo	
10	Computer	
11	Sistema di Acquisizione	<i>Ni-DAQ 6070E</i>

Figura 34 Apparato sperimentale a) Schema del setup realizzato b)

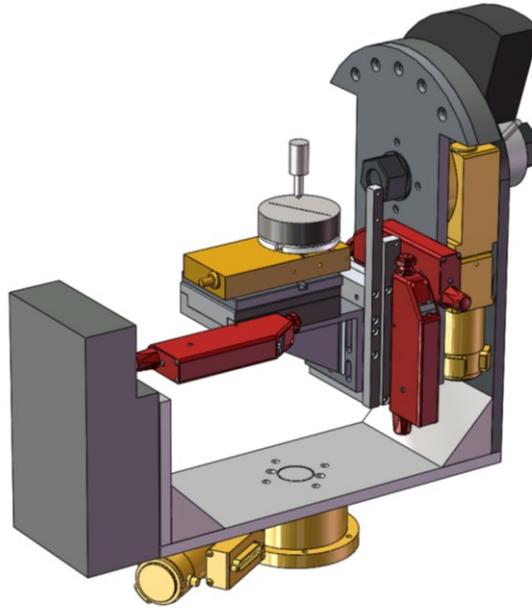


Figura 35 Sistema di posizionamento del sensore

2.7.4 Procedura di prova

La tecnica SMSA permette, attraverso l'implementazione dell'algoritmo FBP, il rilevamento della QM di un getto. La ricostruzione della QM avviene in modo indiretto attraverso il rilevamento della FI. I dati di input necessari all'algoritmo di ricostruzione sono le proiezioni dell'andamento incognito che si intende ricostruire. Una proiezione è costituita da un set di integrali di linea della proprietà fisica della quale si intende ricostruire l'andamento, ovvero la distribuzione spaziale della QM-PI nel caso in esame. I singoli integrali di linea che costituiscono la proiezione sono calcolati dividendo la FI agente ad ogni posizione sull'elemento sensibile per lo spessore dell'elemento stesso. Considerando il sensore ad una determinata distanza dal foro di iniezione oggetto di analisi, data una direzione dell'elemento sensibile (cioè l'angolo al quale si determina la singola proiezione), la proiezione è ottenuta traslando il sensore di una quantità Δx in modo da coprire l'area di indagine di diametro $2R$. La successiva proiezione è quindi ottenuta ruotando il sensore di un incremento angolare $\Delta\theta$. La procedura è quindi ripetuta in modo tale da coprire 180° . Il numero di proiezioni e di angoli è determinato sulla base di quanto esposto in precedenza per evitare l'insorgere di artefatti.

A titolo di esempio in Figura 36a) e b) è riportato l'andamento temporale della FI sull'elemento sensibile relativamente a 20 iniezioni consecutive (linee sottili) e la relativa media (linea spessa) per due posizioni trasversali del sensore. Il valore medio della finestra temporale di 50 ms (punti rosso e blu) è assunto come valore della forza di impatto. Il valore della FI è quindi diviso per lo spessore dell'elemento sensibile ($w = 0.5\text{ mm}$) ottenendo l'integrale di linea della PI alla data posizione. Gli integrali di linea così calcolati costituiscono gli N punti della proiezione, per un dato angolo, riportata in Figura 36 c).

Le frecce mettono in relazione l'evoluzione temporale della FI ai relativi campioni costituenti la proiezione. È utile rimarcare che le proiezioni non rappresentano delle sezioni dell'andamento finale che si andrà a ricostruire.

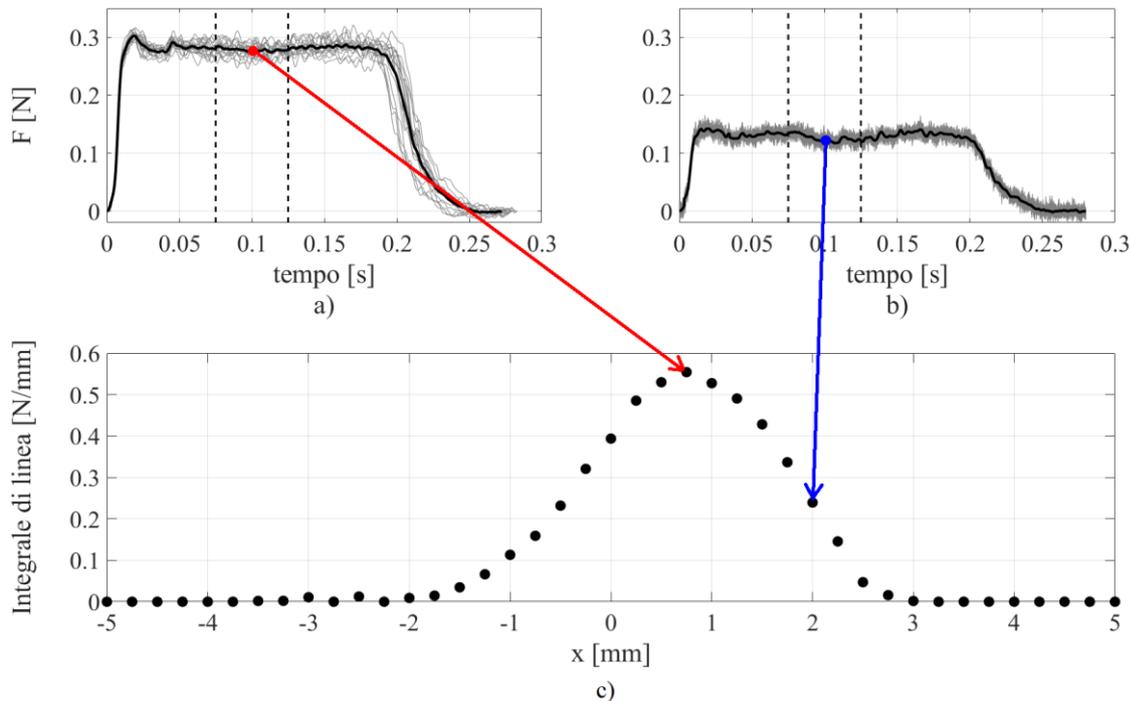


Figura 36 Andamento temporale FI e proiezione
 a-b) FI sull'elemento sensibile in due diverse posizioni complanari ed equi-angolari.
 c) Proiezione della distribuzione della PI

2.8 Risultati

2.8.1 Evoluzione della PI

Il rilevamento della PI generata dall'ugello è stato condotto alle distanze del piano di indagine dalla sezione di uscita dell'ugello di: 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 e 30 mm cui corrispondono le distanze adimensionalizzate di $Z/d_N = 2.78, 4.17, 5.56, 8.33, 11.11, 13.89, 16.67$.

Come detto in precedenza, essendo il rapporto di pressione posto pari a 1:7.25, il getto si presenta in condizioni fortemente sotto-espansive. Nelle analisi non sono state utilizzate ulteriori condizioni di alimentazione in quanto l'obiettivo del presente lavoro non è l'analisi di getti supersonici, ma la valutazione delle potenzialità del sensore proposto.

La Figura 37 riporta l'andamento della distribuzione della PI, ricostruita implementando la tecnica SMSA, ai diversi piani di indagine considerati. Si sottolinea come, la tecnica preveda un campionamento su di un dominio circolare mentre la ricostruzione è riportata su di una griglia quadrata. I punti all'esterno del dominio campionato sono ottenuti per interpolazione delle proiezioni prima della ricostruzione mediante l'algoritmo.

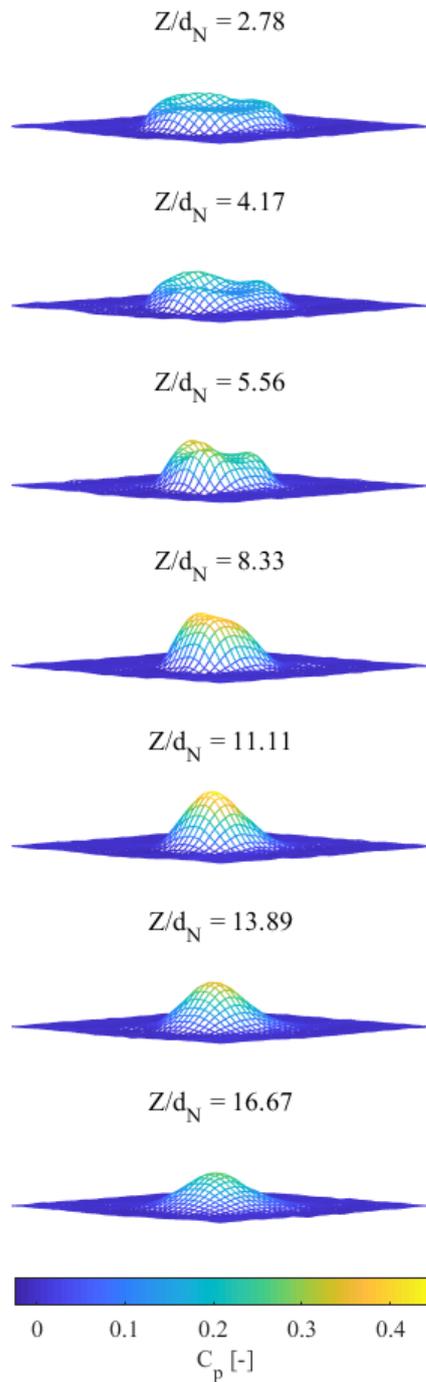


Figura 37 Andamento PI a diverse distanze dall'uscita dell'ugello ($\Delta x = 0.25 \text{ mm}$)

Le proiezioni sono state ottenute traslando il sensore di un incremento $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$. Il diametro dell'area di impatto investigata è scelto di $2R = 10 \text{ mm}$, sufficiente ad accogliere completamente il getto a tutte le distanze d'indagine. L'incremento angolare, per il rispetto delle condizioni di campionamento esposte in precedenza, è stato scelto pari a $\Delta\theta = 4^\circ$ corrispondente ad un numero di proiezioni pari a 44 tali da coprire 180° .

Osservando questi andamenti appare evidente come le distribuzioni assumano gli andamenti caratteristici attesi alle diverse distanze. Per i primi tre piani è ben evidente la distribuzione scavata nella parte centrale, indicativa della presenza della bolla di ristagno, mentre si nota come alle distanze maggiori gli andamenti divengano Gaussiani.

Nel seguito si analizzeranno nel dettaglio i vari andamenti.

2.8.2 Andamenti della PI

$Z/d_N \leq 5.56$

Le Figure 38-40 riportano nel dettaglio gli andamenti delle distribuzioni della PI ricostruite per le distanze normalizzate del piano di indagine $Z/d_N \leq 5.56$. L'immagine di sinistra riporta la distribuzione tridimensionale, mentre a destra è riportato il relativo andamento bidimensionale, ottenuto considerando un piano di sezione parallelo alla direzione x . Le pressioni sono riportate in forma normalizzata secondo l'Equazione 11.

Osservando questi andamenti appare ben evidente, a tutte e tre le distanze del piano di indagine, la presenza della bolla di ricircolo. La posizione del picco di pressione si colloca, come atteso, ad una distanza radiale normalizzata x/d_N compresa tra 1 e 0.5. Inoltre, in accordo con gli andamenti riportati in letteratura (Figura 32) si nota come tale posizione si avvicini all'asse all'allontanarsi del piano di impatto.

È d'obbligo notare come gli andamenti ricostruiti non presentino una simmetria assiale, questo è imputabile sia alla non perfetta circolarità dell'ugello, sia alle instabilità dinamiche [45], [46] cui i getti d'aria sono affetti. Tali instabilità possono derivare da piccole variazioni nella pressione di monte [50] e riflessioni di onde acustiche sulla superficie di impatto [57] che portano la struttura del getto, e quindi della PI, ad assumere un comportamento oscillatorio. Il valore di pressione ricostruito, essendo ottenuto da misurazioni multiple, è pertanto un andamento mediato del valore della PI rilevato ad istanti successivi nei diversi punti di misura. Tale asimmetria non è tipicamente enfatizzata in letteratura, dove i profili della PI sono rilevati in direzione radiale mediante tubi di Pitot o altri dispositivi di misura locale. Tale considerazione appare evidente considerando, ad esempio, i rilevamenti sperimentali riportati in [50]. In tale lavoro si pone l'attenzione sulle instabilità ed asimmetrie radiali dei profili di pressione. È evidente come tale asimmetria sia di tipo tridimensionale e che quindi un rilievo effettuato secondo un'unica direzione fornisca informazioni limitate.

I risultati appena discussi mettono in evidenza come la tecnica SMSA sia in grado di rilevare anche piccole asimmetrie nelle distribuzioni della PI e quindi nella forma del getto. Questo aspetto è particolarmente significativo nel caso di analisi di spray diesel dove un'anomala asimmetria nel getto potrebbe portare ad un impatto dello stesso contro le pareti della camera di combustione e, di conseguenza, ad incremento delle emissioni.

Infine, si nota la capacità della tecnica di cogliere un gradiente della PI particolarmente significativo; la variazione di pressione registrata nella zona anulare, infatti, si concentra in meno di 0.5 mm. Impiegando una tecnica di tipo puntuale per il rilevamento della QM, sarebbe pertanto richiesto un elemento sensibile di dimensioni di molto inferiori

a tale valore per non filtrarne l'effettivo andamento della PI. Questa considerazione prova quanto affermato a partire dalle simulazioni numeriche in merito alla capacità della tecnica SMSA di rilevare andamenti dal contenuto in frequenza superiore rispetto ad altre soluzioni.

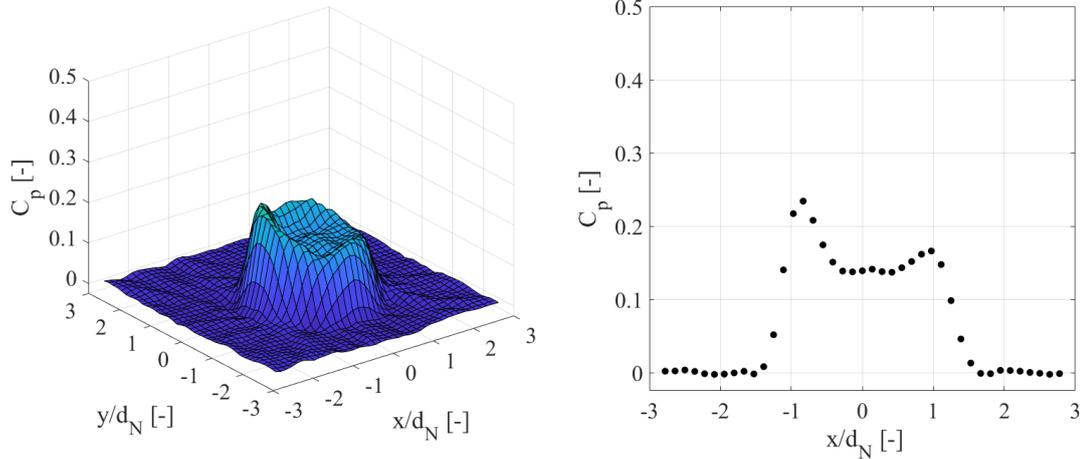


Figura 38 a) Distanza piano di impatto $Z/d_N = 2.78$ ($Z=5$ mm, $d_N=1.8$ mm)

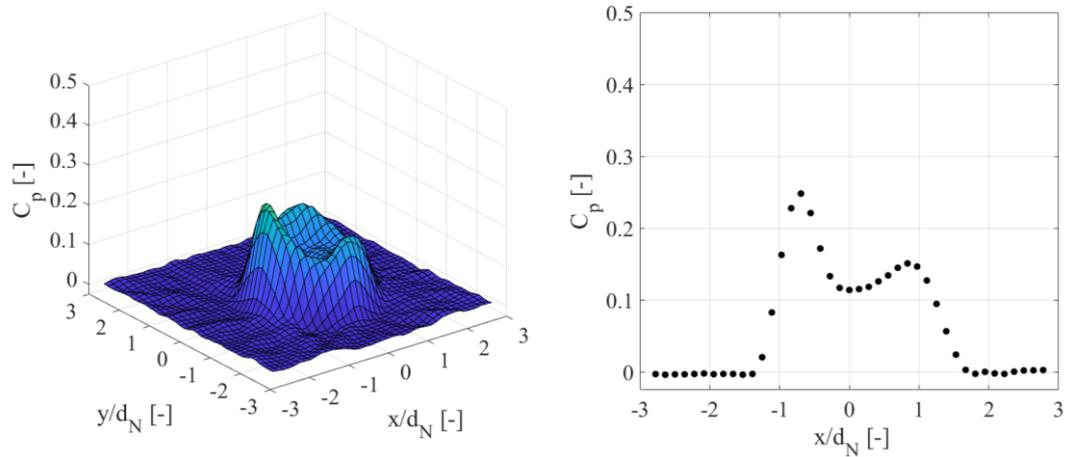


Figura 39 b) Distanza piano di impatto $Z/d_N = 4.17$ ($Z=7.5$ mm, $d_N=1.8$ mm)

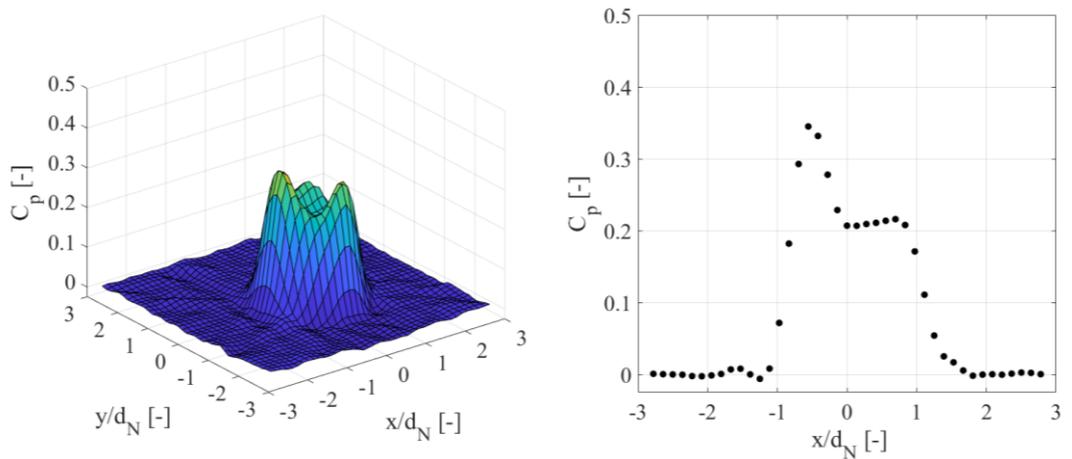


Figura 40 c) Distanza piano di impatto $Z/d_N = 5.56$ ($Z=10$ mm, $d_N=1.8$ mm)

$Z/d_N = 8.33$

In Figura 41 è riportato l'andamento della PI alla distanza intermedia di 15 mm ($Z/d_N = 8.33$). Come si può notare la distribuzione della PI indica che la bolla di ricircolo non è più presente, ma la forma appiattita della sommità di tale distribuzione indica la superficie di impatto si trovi alla distanza di transizione che separa la zona di corto raggio da quella di lungo raggio. In tali condizioni l'entità della sovrappressione conseguente all'impatto dello strato di separazione dipartito dal punto triplo non è sufficiente a far sì che si possa generare la bolla di ricircolo. Inoltre, gli effetti viscosi divengono progressivamente dominanti.

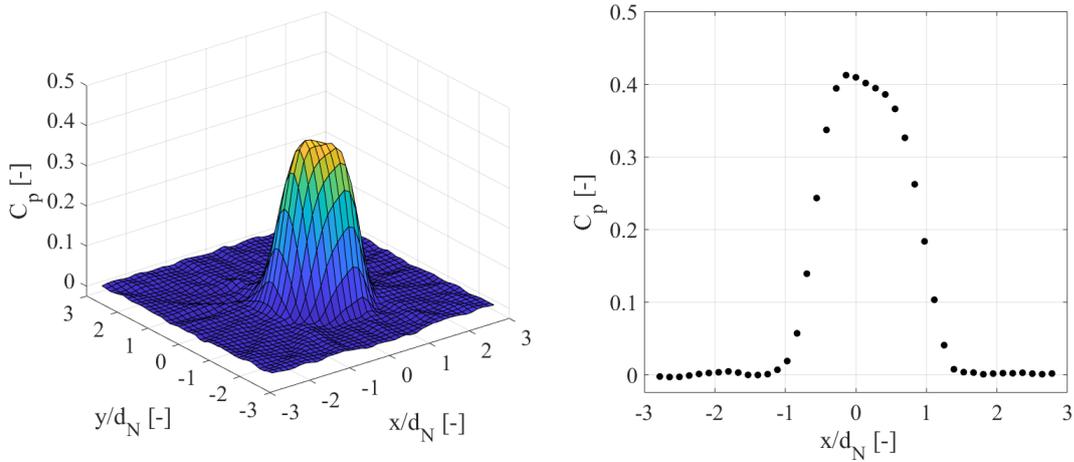


Figura 41 d) Distanza piano di impatto $Z/d_N = 8.33$ ($Z=15$ mm, $d_N=1.8$ mm)

$Z/d_N \geq 11.11$

Le Figure 42-44 si riferiscono alle distanze del piano di impatto maggiori. Gli andamenti rilevati sono indicativi di un flusso completamente sviluppato, ovvero rappresentative di un impatto che avviene nella zona di lungo raggio. In tal caso la distribuzione attesa assunta dalla PI è di tipo Gaussiano, in accordo con [46], [55].

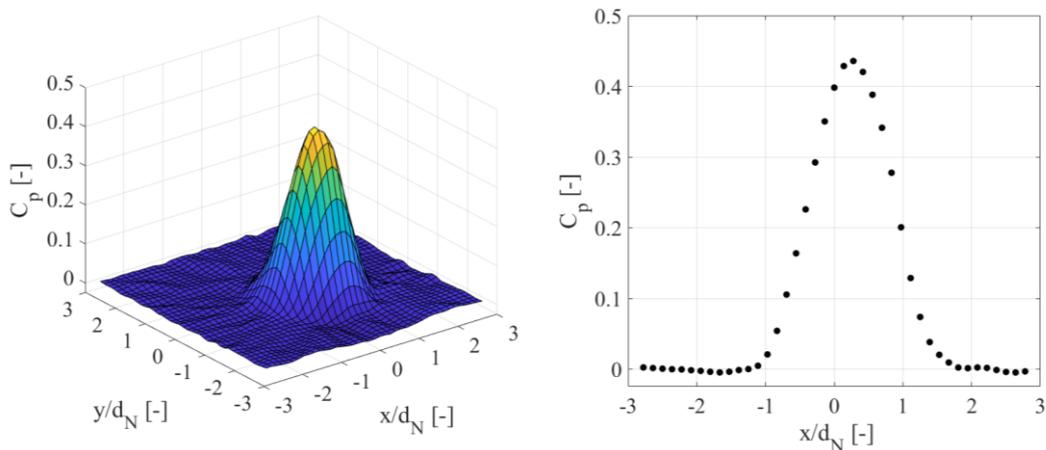


Figura 42 e) Distanza piano di impatto $Z/d_N = 11.11$ ($Z=20$ mm $d_N=1.8$ mm)

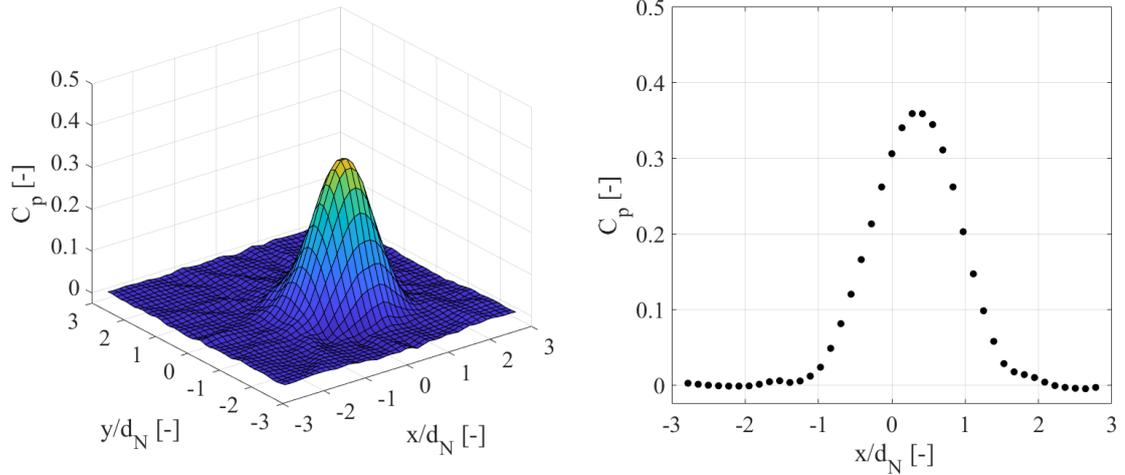


Figura 43 f) Distanza piano di impatto $Z/d_N = 13.89$ ($Z=25$ mm, $d_N=1.8$ mm)

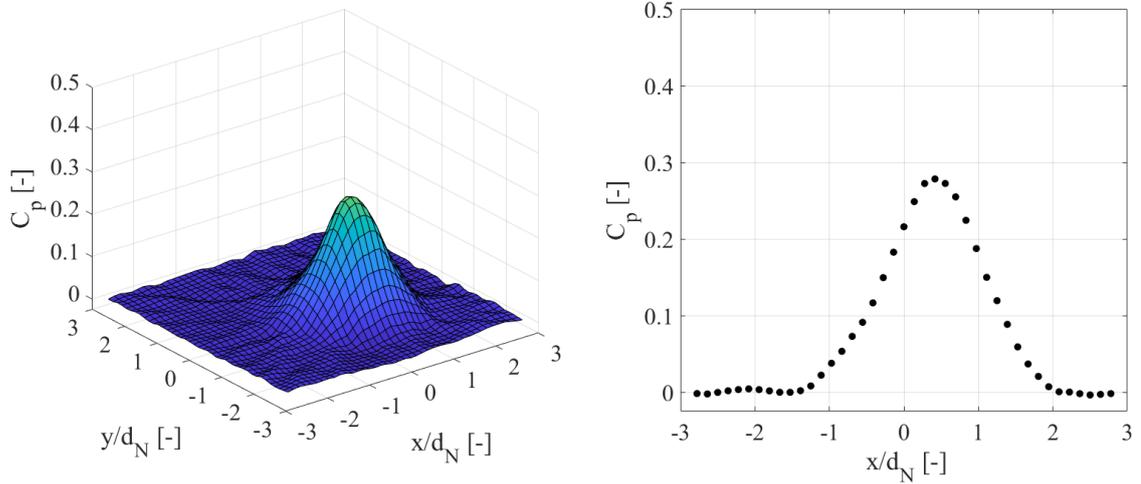


Figura 44 g) Distanza piano di impatto $Z/d_N = 16.67$ ($Z=30$ mm, $d_N=1.8$ mm)

Al fine di verificare tale affermazione, non solo mediante un'analisi visiva, gli andamenti della PI, in questo caso non normalizzati, alle distanze di 20 mm e 25 mm sono stati interpolati mediante una funzione Gaussiana bidimensionale. Tale superficie è definita dalla seguente equazione:

$$G(x, y) = \frac{a}{2 \pi \sigma_x \sigma_y \sqrt{1 - \rho^2}} e^{\frac{-k}{2(1-\rho^2)}} \quad (12)$$

con k definito come:

$$k = \frac{(x - \mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{2 \rho (x - \mu_x)(y - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y - \mu_y)^2}{\sigma_y^2}$$

dove ρ caratterizza la simmetria della gaussiana, di massimo nelle coordinate μ_x e μ_y , ed a è il valore l'integrale sotteso dalla superficie, ovvero, nel nostro caso, la FI globale del getto.

L'interpolazione dei dati sperimentali è stata effettuata mediante l'algoritmo di *Levenberg–Marquardt* [58], che rappresenta un metodo standard di regressione iterativa per sistemi non lineari. Le Figura 45 e 46 riportano gli andamenti sperimentali (punti rossi) e la superficie Gaussiana interpolatrice¹⁷. Negli specchietti delle figure sono riportati i parametri della Gaussiana ed il valore del coefficiente di determinazione R^2 . Tale parametro è indicativo della bontà dell'approssimazione dei dati sperimentali con la funzione interpolante ed è definito come:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{I}_i - \bar{I}^*)^2}{\sum_{i=1}^n (I_i^* - \bar{I}^*)^2} \quad (13)$$

dove \bar{I}^* è il valore medio degli n dati sperimentali I_i^* , e \hat{I}_i l' i -esimo valore della funzione interpolatrice. Il valore del parametro R^2 è compreso tra zero ed uno, e tende al limite superiore quando la regressione spiega perfettamente i dati sperimentali.

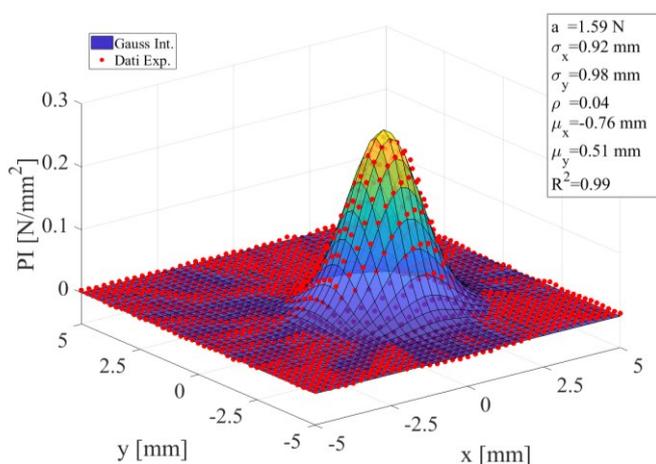


Figura 45 PI per $Z=20$ mm e interpolazione Gaussiana

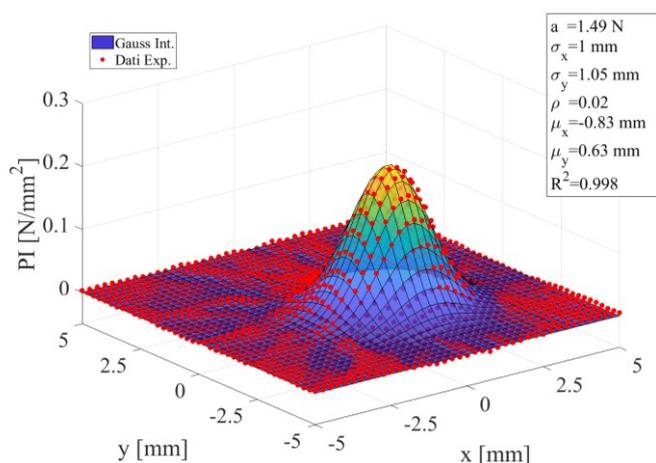


Figura 46 PI per $Z=25$ mm e interpolazione Gaussiana

¹⁷Va sottolineato come i punti rossi non corrispondano agli effettivi punti di misura, in quanto la tecnica non prevede un campionamento puntuale. Tali punti rappresentano l'andamento sperimentale ottenuto mediante la tecnica SMSA e l'algoritmo di retroproiezione filtrata.

Il valore del coefficiente di determinazione riportato nelle figure, prossimo all'unità, permette di confermare come l'andamento della PI nella zona di lungo raggio divenga Gaussiano. L'interpolazione dei dati permette, inoltre, di evidenziare, mediante il confronto dei valori assunti dai parametri μ_x e μ_y , ovvero delle coordinate del centro della superficie Gaussiana, come il getto evolva secondo una direzione che non coincide con quella geometrica definita dall'asse dell'ugello. Questa informazione, associata al valore di deviazione standard ottenuto, potrebbe rappresentare un metodo univoco di definizione dell'angolo di diffusione del getto. Questa soluzione risulta particolarmente interessante nel caso di analisi di spray diesel per cui la determinazione dell'angolo di diffusione, basata su analisi di tipo ottico, non risulta essere univoca, come verrà descritto nel Capitolo 3.

2.8.3 Direzione di evoluzione

In Figura 47 sono riportate le curve iso-livello degli andamenti ricostruiti. L'origine del sistema di riferimento è localizzata al centro dell'area di impatto ed i valori delle coordinate di entrambe le direzioni sono normalizzati rispetto al diametro dell'ugello d_N .

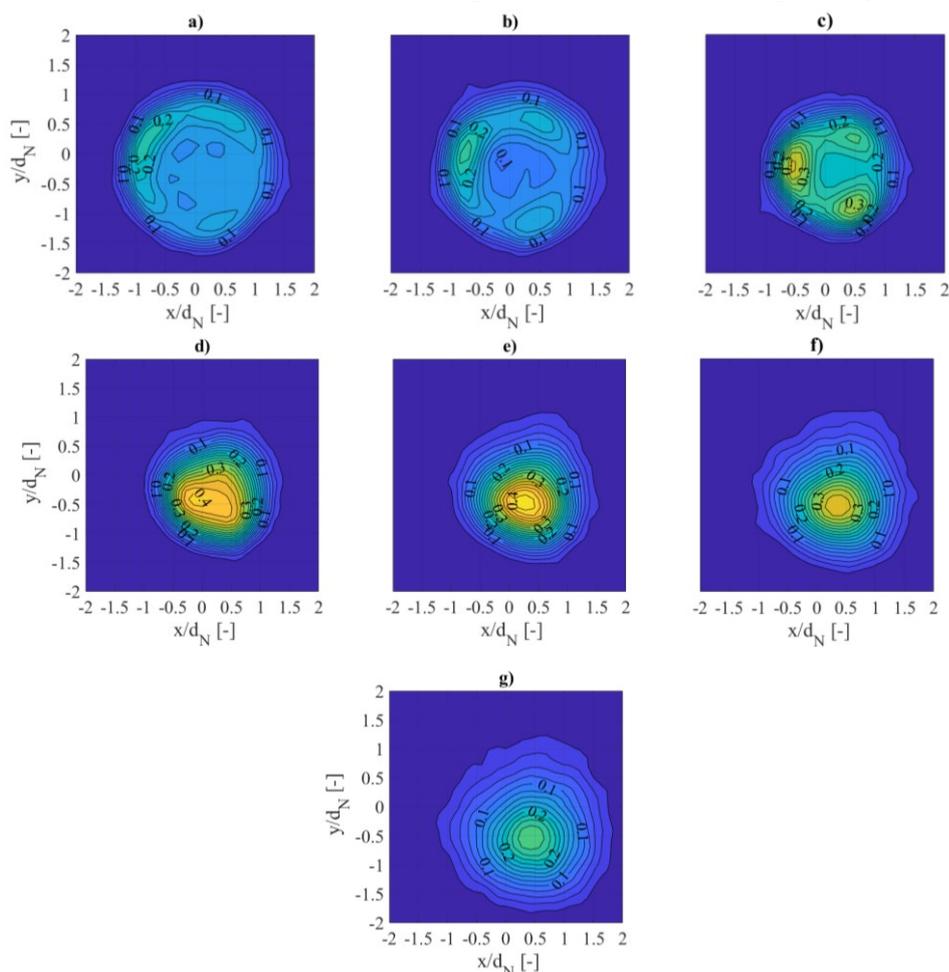


Figura 47 PI ricostruite. Curve iso-livello

a) $Z/d_N=2.78$ b) $Z/d_N=24.17$ c) $Z/d_N=5.56$ d) $Z/d_N=8.33$ e) $Z/d_N=11.11$ f) $Z/d_N=13.89$ g) $Z/d_N=16.67$

Questa rappresentazione permette di mettere ben in evidenza le dimensioni delle aree interessate dalla PI ed i caratteristici comportamenti alle diverse distanze. In particolare, confrontando le figure *a) - c)* si enfatizza l'effetto della vicinanza del piano di indagine all'ugello sulla dimensione della bolla di ricircolo. Inoltre, appare ben evidente come la PI evolva secondo una direzione che non coincide con quella geometrica prevista, e seguita dal sistema di posizionamento del sensore SMSA.

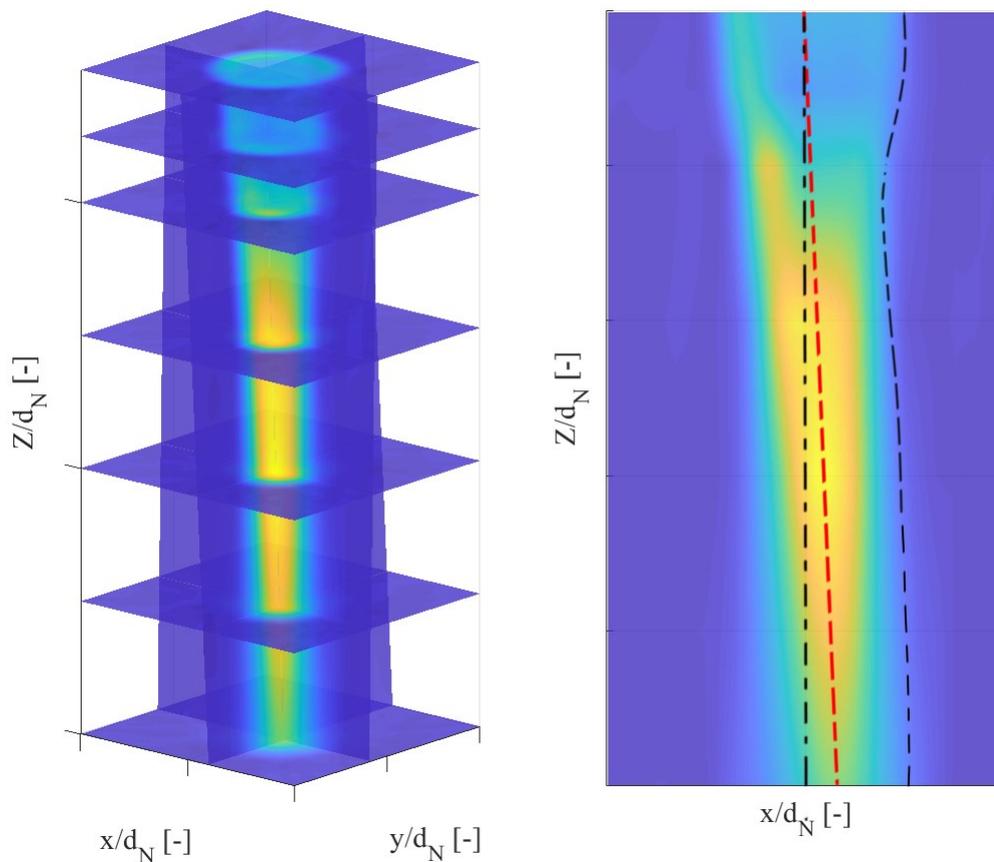


Figura 48 Direzione dell'evoluzione assiale

La Figura 48 riporta una rappresentazione 3D della distribuzione della PI ottenuta ai diversi piani di indagine della Figura 47. La scala cromatica associata è proporzionale al valore di PI ed i valori tra i diversi piani sono ottenuti per interpolazione lineare a partire da questi. Questa rappresentazione non deve essere considerata, ovviamente, come rappresentativa della struttura del getto (Figura 31), anche se da questa dipende direttamente, ma permette di evidenziare come il getto evolva secondo una direzione diversa da quella geometrica attesa, la cui proiezione nel piano $x-z$ è evidenziata in Figura 48 a destra. È comunque interessante notare la forma bombata in corrispondenza della cella d'urto ed un angolo di diffusione trascurabile.

2.8.4 Effetto della spaziatura Δx

Come detto per distanze di impatto superiori a $Z/d_N = 8.33$, gli andamenti tendono a divenire progressivamente Gaussiani. Osservando le curve iso-livello, o i parametri delle gaussiane interpolatrici, si può notare come la deviazione standard spaziale σ , sia pari a circa 1 mm in entrambe le direzioni. Ricordando che il contenuto in frequenza di una distribuzione gaussiana è anche esso gaussiano, e ricordando la relazione tra la deviazione standard spettrale e quella spaziale $\sigma_f = 1/(2\pi\sigma)$, ne consegue che, volendo cogliere il 97% del contenuto spettrale, occorra una frequenza di campionamento pari ad almeno $2 \cdot 3\sigma_f$, ovvero una spaziatura $\Delta x = 1 \text{ mm}$. La scelta della spaziatura $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$, ovvero una frequenza di campionamento spaziale pari a 4 volte la minima, è quindi sufficiente a correttamente campionare gli andamenti. È tuttavia evidente come a distanze inferiori gli andamenti abbiano un contenuto in frequenza maggiore, visti i cambi repentini di pressione riscontrabili nella PI conseguenti alla bolla di ristagno. Per questo motivo si è ridotto il passo di campionamento per verificare la correttezza dell'acquisizione anche alle distanze inferiori.

La spaziatura nella traslazione del sensore è stato quindi posto pari a $\Delta x = 0.125 \text{ mm}$, corrispondente ad una frequenza di campionamento doppia rispetto alla precedente, ovvero circa 8 volte la minima richiesta per il corretto campionamento dei profili gaussiani. Avendo la precedente campagna di indagine mostrato come il getto interessasse un'area del diametro di circa 6 mm, il diametro dell'area di indagine del sensore è stata ridotto da 10 mm a $2R = 8 \text{ mm}$. L'incremento angolare conseguente è stato scelto pari a $\Delta\vartheta = 2.8^\circ$. Sono stati inoltre indagati ulteriori piani alle distanze di 12.5 e 17.5 mm. La Figura 49 b) riporta gli andamenti ottenuti per i diversi piani di indagine ed al fine di facilitarne il confronto, gli andamenti di ottenuti alla spaziatura $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$ già presentati in Figura 37.

Come si può notare dal confronto tra gli andamenti, la distribuzione della PI ricostruita ai diversi piani di indagine è la medesima con le due spaziature. Questo conferma la correttezza degli andamenti ricostruiti dal sensore. Per facilitare il confronto tra le ricostruzioni alle due diverse spaziature, si riportano in Figura 50 gli andamenti sovrapposti in modo tale da evidenziarne le differenze. Sui medesimi sono riportati i profili bidimensionali degli andamenti ottenuti sezionando gli stessi con due piani paralleli all'asse x e y rispettivamente passanti per il cento dell'area indagata. Gli andamenti si riferiscono alle distanze di $Z/d_N = 5.56 \text{ a)}$, e $Z/d_N = 11.11 \text{ b)}$

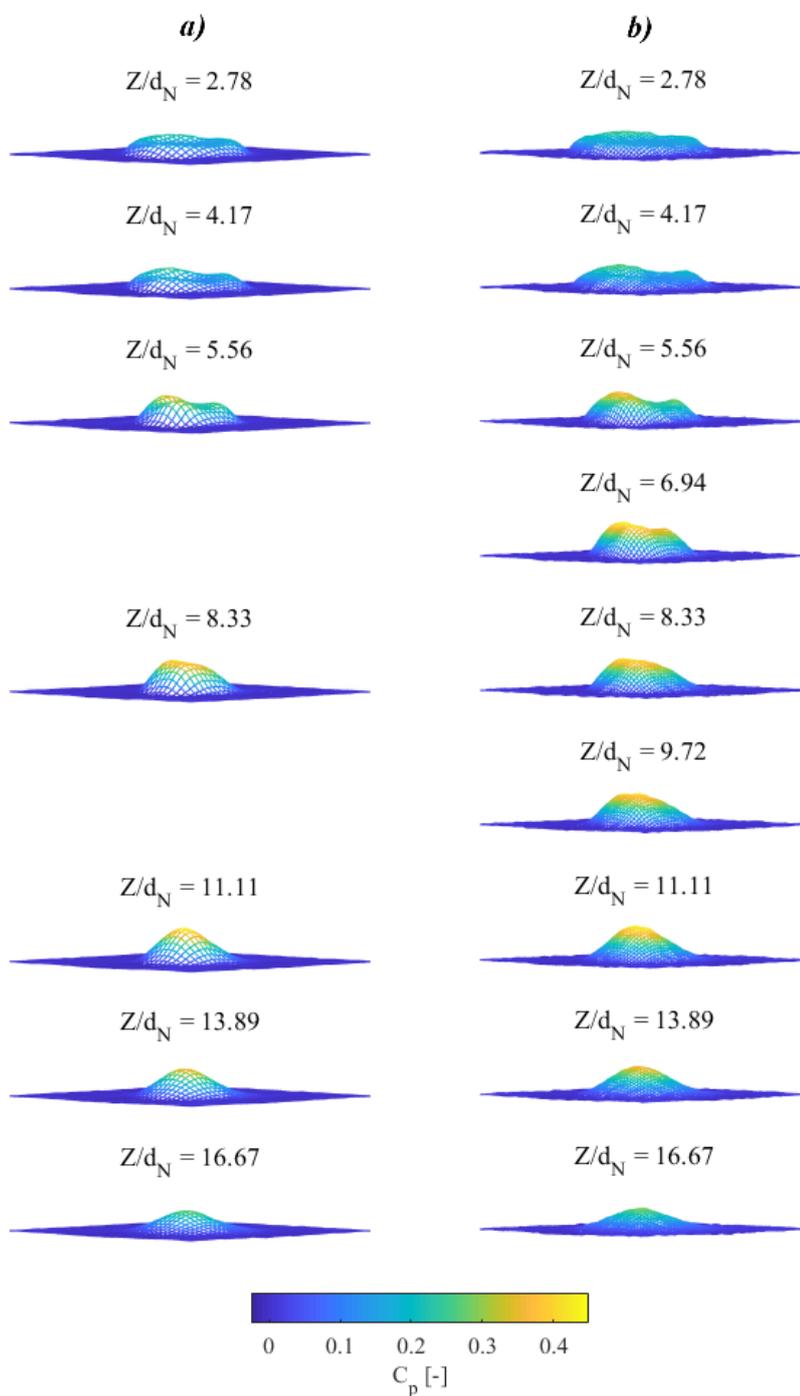


Figura 49 Andamento PI a diverse distanze dall'uscita dell'ugello.
 a) $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$ b) $\Delta x = 0.125 \text{ mm}$

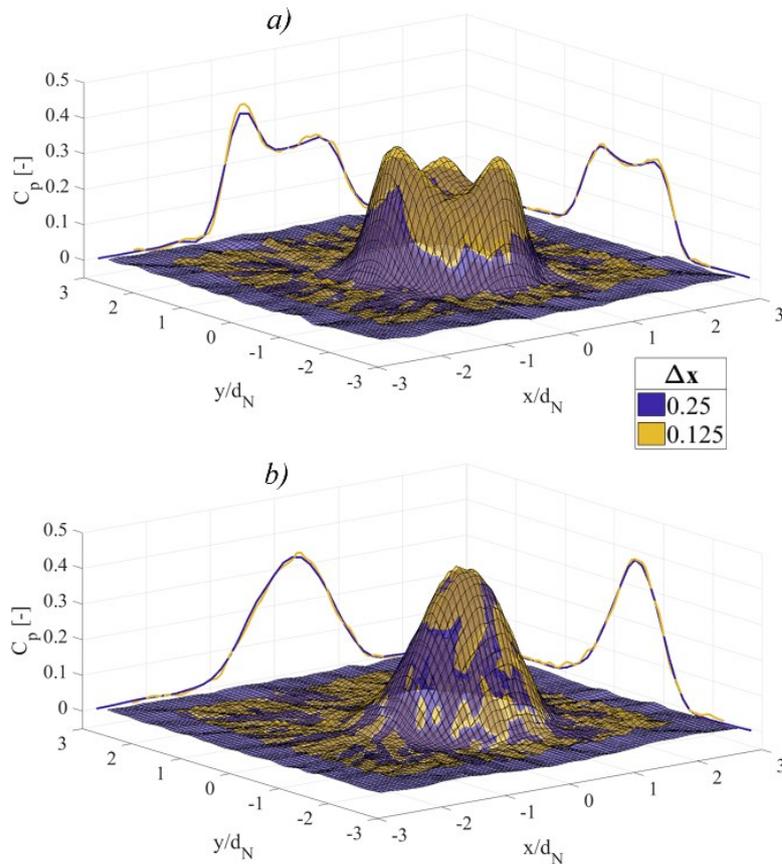


Figura 50 Confronto tra le PI a diversi Δx . a) $Z/d_N = 5.56$ b) $Z/d_N = 11.11$

Osservando i pattern a distanza maggiore, Figura 50 b), si nota come le ricostruzioni alle due spaziatore siano sovrapponibili, al di là di piccole variazioni imputabili all'esperimento. Tali variazioni sono attribuibili alle fluttuazioni della pressione di alimentazione ed alla dinamica dell'elettrovalvola impiegata per generare il getto. Richiamando l'andamento temporale della FI riportato in Figura 36 a) è evidente come la stessa presenti una deviazione standard dell'ordine del 1%. Questo conferma che la frequenza di campionamento più bassa correttamente comprende l'intera banda del segnale.

Confrontando gli andamenti alla distanza del piano di indagine inferiore, Figura 50 a), si nota che la forma ottenuta non sia diversa nelle due prove, ma osservando i picchi della PI, appare evidente come l'entità di questi sia superiore nell'acquisizione a $\Delta x = 0.125$ mm, ovvero l'andamento a tale spaziatore (in giallo) sia più ripido rispetto al caso precedente (in blu). Questo conferma come i precedenti parametri di campionamento siano in grado di cogliere le frequenze più basse (e.g. la frequenza associata alla dimensione maggiore, cioè la forma di insieme), ma trascuri una parte delle frequenze più alte (associate al dettaglio e quindi ai cambi più repentini).

Al fine di quantificare le differenze nelle ricostruzioni imputabili alla spaziatore di campionamento, è stato valutato l'integrale sotteso agli andamenti, ovvero la QM globale o FI, al variare del raggio di un'area circolare centrata sull'andamento stesso. La Figura 51

riporta gli andamenti degli integrali per le due spaziature di campionamento alle diverse distanze ugello-superficie di impatto. Sugli stessi grafici, inoltre, è riportata la differenza relativa percentuale tra le due quantità.

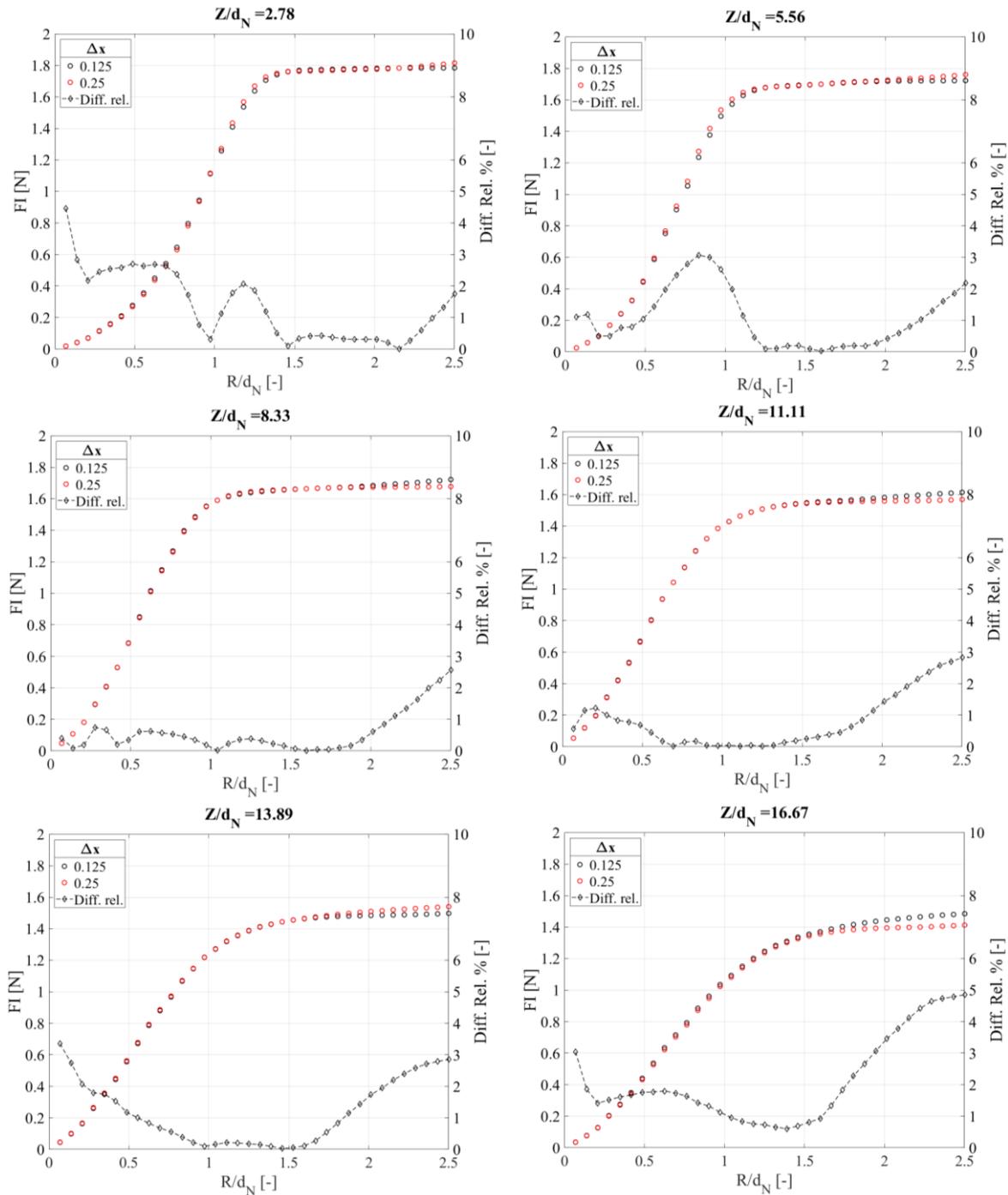


Figura 51 Integrali PI al variare del raggio

Osservando gli andamenti degli integrali si nota come siano praticamente sovrapposti per le due spaziatore impiegate. Questo conferma, da un punto di vista integrale, come le ricostruzioni siano confrontabili.

Osservando l'andamento della differenza relativa è possibile trarre alcune considerazioni aggiuntive. Si nota, infatti, come alle distanze ugello-superficie di impatto inferiori la differenza relativa sia maggiore entro un raggio normalizzato pari a 1, entro il quale raggio si localizzano i picchi di pressione, la cui differenza è stata analizzata in Figura 50. Per gli andamenti alle distanze maggiori, invece, si nota come la differenza relativa si attesti tipicamente al di sotto del 2% fino a distanze normalizzate pari a 2, per poi tendere a crescere a distanze superiori. Questo comportamento è attribuibile al fatto che gli andamenti ottenuti con spaziatura $\Delta x = 0.125 \text{ mm}$ risultano essere più rumorosi di quelli a spaziatura maggiore, e che tale rumore è significativo nelle zone dove la PI tende ad annullarsi.

Infine, è stato effettuato un test χ^2 per stabilire il grado di similarità tra gli andamenti ottenuti utilizzando le due spaziatore, e stabilire la correttezza del campionamento scelto. Alle distanze di impatto superiori a 15 mm , ovvero dove gli andamenti divengono simil-gaussiani, il test ha evidenziato come i due andamenti possano ritenersi identici con un livello di significatività inferiore al 5%, confermando la bontà del campionamento alla spaziatura maggiore. Per quanto riguarda le distanze inferiori, il test χ^2 non permette di confondere i due andamenti, evidenziando come, campionando con la spaziatura maggiore venga trascurata una parte significativa del contenuto in frequenza del segnale. Per acquisirne correttamente l'andamento, occorrerebbe ridurre la griglia di campionamento fintantoché non si ottengono andamenti confondibili. Considerando, tuttavia, che la forma dell'andamento è rimasta pressoché inalterata e che lo scopo del lavoro è quello di evidenziare le potenzialità e criticità del sensore, e non studiare getti d'aria, si è deciso di non rifinire ulteriormente la griglia di campionamento.

Si ricorda, infine, come il sensore nasca principalmente per l'analisi di spray diesel i cui andamenti della PI dovrebbero essere simili per forma, dimensioni e FI a quelli ottenuti con aria alle distanze di impatto $Z/d_N \geq 8.33$. Pertanto, l'analisi effettuata permette di affermare come la distribuzione della QM di uno spray diesel possa essere campionata correttamente mediante il sensore SMSA adottando un passo di campionamento di $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$.

2.8.5 Effetto inclinazione del piattello

È stata condotta una breve analisi di sensibilità dei risultati all'inclinazione della superficie del sensore SMSA rispetto all'asse dell'ugello. L'obiettivo è quello di valutare l'influenza di un errore di posizionamento del sensore e non di analizzare il comportamento del getto in tali situazioni. Per questo motivo, l'analisi è stata condotta alla distanza di 20 mm , cioè nella zona di lungo raggio del getto, avendo garantito le condizioni di alimentazione dell'ugello precedentemente impiegate. L'inclinazione α è stata imposta paria a 0° , 5° e 15° ruotando l'intero sistema di posizionamento e l'angolo è stato misurato rispetto all'asse dell'ugello. Il sensore è stato quindi traslato in modo tale che il centro dell'area di indagine coincidesse per tutte le prove.

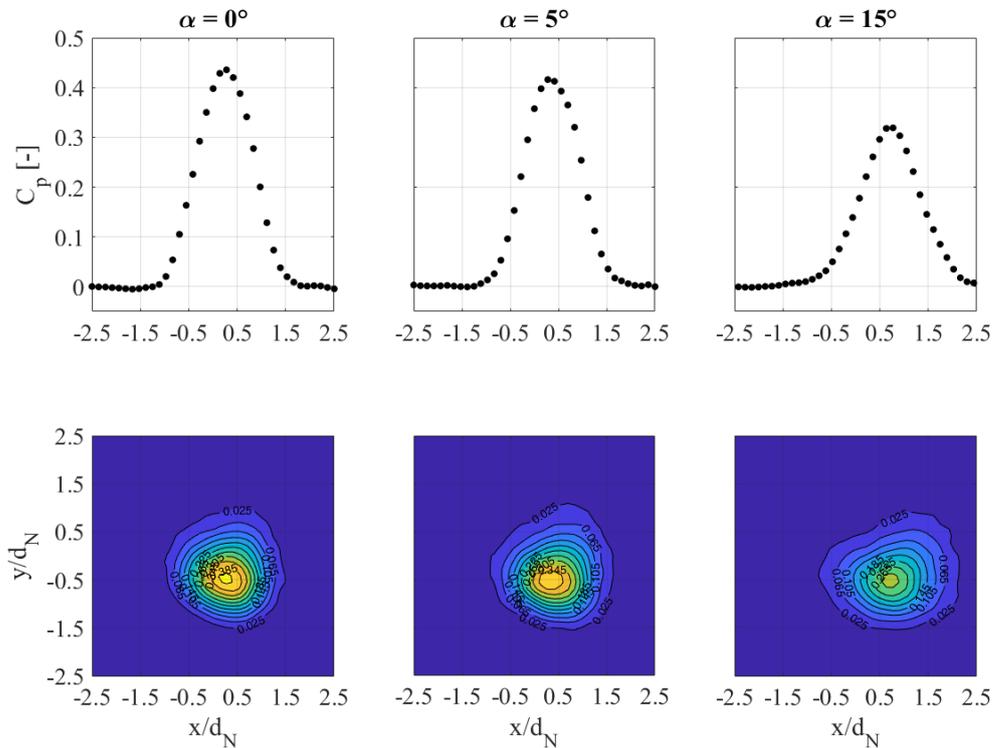


Figura 52 Effetto dell'inclinazione del sensore. $Z/d_N = 11.11$

La Figura 52 riporta in basso le curve iso-livello degli andamenti normalizzati della PI ottenuti ai tre diversi angoli e in alto le sezioni bidimensionali passanti per il picco della pressione. Per facilitare il confronto la Figura 53 riporta le sezioni degli andamenti della PI di Figura 52 in un unico grafico. Osservando gli andamenti ottenuti si nota come l'inclinazione del piattello abbia come effetto quello di spostare il picco di pressione, nella direzione dell'inclinazione e di abbassarne il valore. Si assiste inoltre ad una deformazione dell'andamento che si allunga in detta direzione. Questo risultato rispecchia quanto riportato in letteratura [46], [59]. Questo comportamento della PI nell'impatto su superfici inclinate può essere utilizzato per stabilire la vera direzione dell'evoluzione nel caso degli spray diesel o nel caso di distanze di lungo raggio. Eseguendo una campagna di indagine a diverse inclinazioni della superficie di impatto si può infatti ricercare il massimo dell'andamento e quindi il picco nella PI, da cui la direzione dell'evoluzione. La precisazione sulla tipologia di getto è d'obbligo in quanto, nel caso di getti sotto-espansi, qualora la distanza di impatto e le condizioni del getto siano tali da comportare la presenza del disco di Mach e della bolla di ricircolo precedentemente analizzata, si assiste ad un picco nella PI che cresce all'aumentare dell'inclinazione del piattello [59].

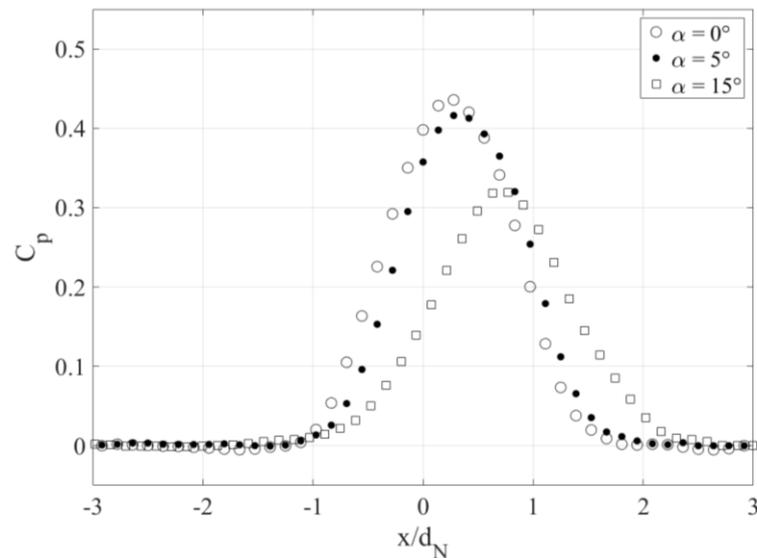


Figura 53 Sezione della PI per diverse inclinazioni del sensore

2.8.6 Misura della QM globale

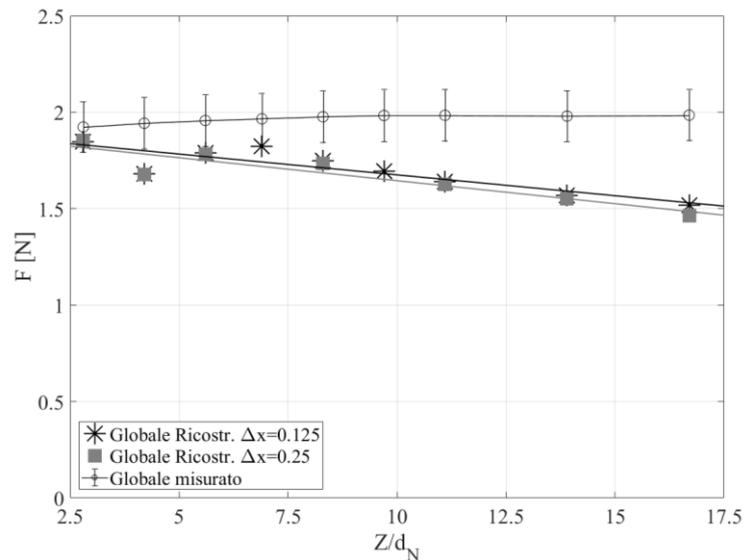


Figura 54 FI vs distanze di impatto

La Figura 54 riporta il confronto tra la FI globale del getto (cerchi con barra rappresentativa dell'intervallo di confidenza del 95%) misurata dal trasduttore posizionato al di sotto del piattello, e quindi sensibile alla FI dell'intero getto, e la FI calcolata come integrale sotteso alla distribuzione ricostruita mediante il sensore SMSA alle due diverse spaziature (asterischi e quadrati). La differenza tra le due quantità aumenta all'incirca dal 4% al 23% aumentando la distanza ugello-superficie di impatto da 5 mm a 30 mm. Questa tendenza è una conseguenza della diversa distribuzione della PI. Di fatto, spostandosi a valle la

distribuzione della PI (dall'andamento gaussiano in questa zona) vede una riduzione del picco di pressione ed un aumento della varianza, assumendo un andamento più "morbido". L'area su cui la pressione agente è confrontabile all'errore sperimentale diventa pertanto più grande. Questo effetto può essere ridotto selezionando trasduttori di forza maggiormente sensibili e progettando un amplificatore di carica dedicato in sostituzione di quello commerciale adottato.

Una soluzione intuitiva per correggere la discordanza mostrata potrebbe essere quella di utilizzare il valore globale della FI sperimentalmente rilevato dal trasduttore posto al di sotto del piattello, introducendo un opportuno fattore di scala, come proposto in [35]. Tale soluzione, non sarebbe tuttavia corretta in quanto introdurrebbe una distorsione nella distribuzione della pressione senza variare la dimensione dell'area di impatto. Nonostante quanto detto, la buona concordanza tra il valore misurato e quello calcolato della FI, a piccole distanze tra il sensore e l'ugello (ovvero quando la distribuzione della PI è più ripida) valida sia la misurazione della PI-QM ottenuta mediante il sensore SMSA, sia la tecnica sviluppati.

2.9 Conclusioni e sviluppi futuri

In questa prima parte dell'attività di tesi è stata sviluppata una tecnica, denominata *Stratigraphic Momentum Spray Analysis* (SMSA), e relativo sensore per l'analisi della distribuzione spaziale della quantità di moto di spray e getti. Il sensore sviluppato sfrutta gli algoritmi propri delle tecniche tomografiche, in particolare l'algoritmo di retroproiezione filtrata (FBP) e lo schema di proiezioni a fascio parallelo (PBP). Grazie a questa tecnica è possibile ricostruire la distribuzione spaziale della quantità fisica di interesse, nel caso in esame la quantità di moto, a partire da un set di integrali di linea rilevati secondo opportune direzioni.

Le prestazioni della tecnica SMSA sono state analizzate e confrontate sulla base di considerazioni teoriche e numeriche rispetto a quelle di un sensore di tipo puntuale che rappresenta la principale soluzione per il rilevamento della pressione di impatto di getti e spray. Il contenuto in frequenza (spaziale) del segnale rilevabile dipende dalla dimensione fisica dell'elemento sensibile per entrambe le tecniche, agendo questi come dei filtri spaziali. Tuttavia nella tecnica SMSA, a differenza di quanto possa avvenire in un sensore puntuale, il contenuto in frequenza del campione aumenta al diminuire dell'incremento spaziale di campionamento. Questo implica che esiste una dimensione fisica del getto che si intende analizzare per la quale risulti più conveniente l'analisi utilizzando il sensore SMSA anziché uno puntuale. Mediante la tecnica proposta è quindi possibile analizzare getti o spray aventi area di impatto del diametro di pochi millimetri. Da un punto di vista della griglia di misurazione, entrambe le tecniche implicano il medesimo numero di punti di misura.

È stata quindi realizzata una prima versione del sensore SMSA in cui il piattello di impatto risulta costituito da due metà. I primi test condotti hanno permesso di evidenziare alcune criticità che hanno portato allo sviluppo di una seconda versione del sensore. Questo sensore

è stato quindi impiegato per analizzare la distribuzione spaziale della QM, ovvero la PI, di un getto d'aria in condizioni di sotto-espansione. Il getto è stato ottenuto impiegando un ugello commerciale semplicemente convergente del diametro di 1.8 mm alimentato con aria e sottoposto ad un rapporto di pressione di 7.25:1. L'analisi è stata condotta a diverse distanze dal piano di uscita dell'ugello e l'incidenza dei parametri di prova è stata valutata. Gli andamenti della PI ottenuti mediante la tecnica proposta rispecchiano in modo soddisfacente quelli riportati da ampia letteratura per getti di aeriformi in condizioni di sotto-espansione.

Infine, la forza di impatto globale, calcolata come integrale della distribuzione della pressione di impatto ricostruita, si presenta in discreto accordo con quella direttamente rilevata dal sensore globale presente nell'apparato sperimentale.

Un possibile sviluppo futuro potrebbe essere quello di realizzare un sensore dotato di più elementi sensibili disposti parallelamente, in modo da consentire un rilevamento simultaneo di più integrali di linea e quindi di ridurre il numero di traslazioni per acquisire la singola proiezione. La tecnica tomografica esposta, inoltre, potrebbe rappresentare la soluzione alle problematiche che affliggono i trasduttori che impiegano film piezoelettrici o capacitivi. Si potrebbe pertanto pensare di non realizzare più una matrice per il diretto rilevamento della distribuzione di impatto, non potendosi in tal caso soddisfare contemporaneamente i requisiti di risoluzione spaziale e temporale, ma un fascio di lunghi elementi rettangolari. In questo modo il numero di elementi di interesse si ridurrebbe notevolmente e si potrebbero ottenere elevate frequenze di campionamento. Questi elementi sarebbero quindi rappresentativi degli integrali di linea e sarebbe possibile acquisire la singola proiezione in un'unica soluzione per poi ruotare il sensore secondo gli algoritmi esposti e ricostruire la PI.

Nomenclatura

Abbreviazioni

CR	Common-Rail
FBP	Algoritmo di Retroproiezione Filtrata (<i>Filtered Back Projection</i>)
FI	Forza di Impatto
MDO	Marine Diesel Oil
NME	Errore massimo normalizzato (<i>Normalized Maximum Error</i>)
NRMSE	Errore quadratico medio normalizzato (<i>Normalized Root Mean Square Error</i>)
PBP	Proiezione a fascio parallelo (<i>Parallel Beam Projection</i>)
PI	Pressione di Impatto
QM	Quantità di Moto
SMSA	<i>Stratigraphic Momentum Spray Analysis</i>
TC	Tomografia Computerizzata

Simboli

$\Delta\theta$	Spaziatura di campionamento angolare
Δx	Spaziatura di campionamento lineare
C	Coefficiente
d	Diametro
D	Diametro del piattello di impatto del sensore SMSA
F	Forza sul piattello
I	Valore locale della pressione di impatto
M	Numero di proiezioni
N	Numero di punti di misura
n	Numero di punti nella griglia di ricostruzione
p	Pressione
r	Raggio del sensore puntuale
R	Raggio dell'area di indagine
S	Superficie
t	Tempo
v	Velocità

V	Volume
w	Spessore dell'elemento sensibile del sensore SMSA
$x y z$	Coordinate del Sistema di riferimento
Z	Distanza ugello-piattello
Φ	Flusso di quantità di moto dello spray iniettato
α	Inclinazione della superficie del sensore
β	Rapporto di espansione
ρ	Densità
σ	Deviazione standard
ϑ	Direzione angolare della proiezione

Pedici

0	Ambiente di scarico
cr	Critico
CV	Volume di controllo
f	Dominio delle frequenze
i	Punto i -esimo (x_i, y_i)
M	Valore Massimo
N	Ugello
z	Direzione assiale

Apici

p	Pressure
*	Distribuzione ricostruita
◦	Ambiente di accumulo

Capitolo 3
Analisi Ottica di Spray

3.1 Introduzione

La generazione di uno spray può avvenire secondo diverse modalità, ma, essenzialmente, quello che occorre è un'elevata velocità relativa tra il liquido che si intende atomizzare e il mezzo nel quale lo si inietta [14]. Nel caso di un iniettore diesel questo risultato è ottenuto convertendo l'energia di pressione posseduta dal combustibile in energia cinetica, attraverso il passaggio in un foro di piccolo diametro, da circa $100\ \mu\text{m}$ per iniettori automobilistici a più di $1\ \text{mm}$ nel caso di grandi motori navali. Il fenomeno di frazionamento della colonna liquida è definito breakup primario, mentre la successiva disgregazione delle gocce in goccioline più piccole è denominato breakup secondario. Si osserva che, nel caso di iniettori diesel, la disintegrazione della colonna liquida, a causa delle alte velocità relative, avviene immediatamente all'uscita dell'iniettore [14], [60]. Le prime gocce in uscita dal foro del polverizzatore possiedono un'elevata energia cinetica e cedono parte della propria quantità di moto al gas dell'ambiente circostante; questo viene accelerato e le gocce progressivamente rallentate. Le gocce che sopraggiungono durante il processo di iniezione vengono così a trovarsi in un ambiente dotato di una certa velocità che, pertanto, opporrà loro una minor resistenza all'avanzamento. A causa di questo comportamento le gocce tendono ad accumularsi nella parte frontale del getto formando una zona ad elevata densità definita fronte dello spray nonché a deviare dal proprio asse determinando la caratteristica forma a cono.

La caratterizzazione di uno spray può avvenire in termini microscopici, riferendosi cioè alla velocità delle gocce, alla distribuzione statistica del diametro di queste ed alla distribuzione spaziale assunta nel getto; oppure secondo un approccio macroscopico, fornendo una descrizione di insieme dello spray attraverso la definizione di parametri quali la penetrazione del fronte e l'angolo di diffusione (Figura 55)

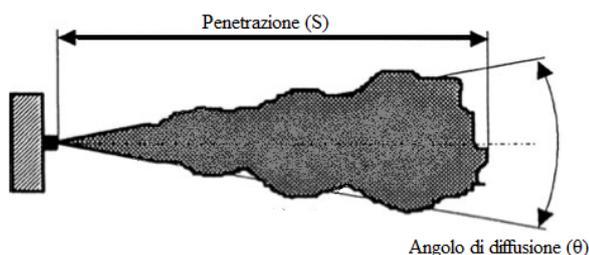


Figura 55 Parametri macroscopici di uno spray

Tra le possibili tecniche di studio degli spray, le tecniche ottiche ricoprono un ruolo di particolare rilievo essendo non intrusive e, pertanto, non alterando l'evoluzione fluidodinamica dello spray [15]. La maggior parte di queste tecniche impiega luce nello spettro visibile, o al più nell'ultravioletto, ovvero con lunghezza d'onda tra 380 e $760\ \text{nm}$ in aria. Questo rappresenta una forte limitazione essendo, a tali lunghezze d'onda, gli indici di rifrazione del combustibile e del gas nel quale si realizza l'iniezione, molto diversi. Per questo motivo si assiste ad un fenomeno di *scatter* della radiazione luminosa che limita le informazioni ottenibili alla "superficie" esterna del getto. Questo implica che la maggior parte delle analisi ottiche permetta al più una caratterizzazione di tipo macroscopico. Questo

tipo di analisi può essere effettuata mediante tecniche di visualizzazione diretta come la fotografia ad alta velocità, che rappresenta la soluzione maggiormente impiegata nell'analisi di spray diesel.

3.1.1 Penetrazione del fronte

Con penetrazione del fronte (S) si indica la massima distanza percorsa dallo spray nell'ambiente nel quale viene iniettato. È un parametro di grande importanza, rappresentativo dell'utilizzo dell'aria in camera di combustione e quindi del miscelamento aria-combustibile. Questa grandezza deve essere accuratamente definita in relazione alle caratteristiche geometriche della camera di combustione, infatti, qualora la penetrazione fosse eccessiva, lo spray si troverebbe ad impattare sulle pareti della camera di combustione, compromettendo fortemente le prestazioni del motore. Al contrario, penetrazioni eccessivamente ridotte non permetterebbero di sfruttare adeguatamente l'aria in camera non coinvolgendo le zone periferiche nel processo di combustione. È un parametro fondamentale e relativamente facile da misurare; negli anni è stato ampiamente studiato e le relazioni fenomenologiche proposte per descrivere l'andamento temporale della penetrazione, in funzione dei parametri caratteristici dell'iniezione e delle caratteristiche geometriche del polverizzatore [61]–[63] sono in buon accordo.

3.1.2 Angolo di diffusione

L'angolo di diffusione (θ), come la penetrazione, è un parametro fondamentale nella caratterizzazione dello spray, ed è anch'esso rappresentativo dell'utilizzo dell'aria in camera di combustione. Tuttavia, mentre la penetrazione del fronte dello spray risulta essere una grandezza di facile misurazione, l'angolo di diffusione presenta problematiche di definizione e misurazione decisamente più complesse.

Innanzitutto, nella comunità scientifica non vi è consenso unanime nel definire tale grandezza. Infatti, può essere definita come l'angolo compreso tra due rette uscenti dal foro del polverizzatore e tangenti alla superficie esterna dello spray ad una distanza pari a 60 volte il diametro del foro del polverizzatore [14], oppure a metà della penetrazione [64], o al 60% di questa [65], o, anche, ad una distanza arbitraria [66]. Sono state proposte, inoltre, definizioni associate ad un calcolo iterativo da svolgersi contestualmente alla valutazione della penetrazione [63], [67].

In aggiunta alla non univoca definizione dell'angolo di diffusione, si ha un'oggettiva difficoltà nel definire il bordo dello spray. A differenza del fronte del getto che, come sperimentalmente osservabile mediante tecniche ai raggi x [60], è una zona ad elevata densità, la superficie laterale del getto non è caratterizzata da un importante gradiente di densità. Lo spray, infatti, è caratterizzato da una concentrazione di combustibile che presenta un picco in corrispondenza dell'asse e tende ad annullarsi procedendo in direzione radiale. È quindi evidente come sia oggettivamente difficile discriminare dove si posizioni la superficie di confine tra spray e ambiente circostante. Inoltre, essendo le grandezze macroscopiche determinate principalmente attraverso analisi fotografiche, la discriminazione tra spray ed ambiente è effettuata sulla base delle immagini e, come si vedrà

nel seguito, la misura dell'angolo di diffusione dipenderà dall'algoritmo implementato. In letteratura sono molte le relazioni proposte per correlare questo parametro macroscopico alla geometria del polverizzatore ed ai parametri di prova. Tuttavia, complice la non univoca definizione dell'angolo di diffusione e le intrinseche difficoltà nella sua misurazione, i modelli proposti sono spesso in disaccordo tra loro [63].

3.2 Analisi ottica – visualizzazione diretta

L'obiettivo di una tecnica di visualizzazione diretta è essenzialmente quello di visualizzare un fenomeno di breve durata, da qualche decina di microsecondi ad alcuni millisecondi, in cui delle gocce di piccola dimensione ($1 \div 150 \mu m$) si muovono ad altissima velocità (dell'ordine delle centinaia di m/s). La ripresa di un fenomeno di questo tipo è tutt'altro che banale e sono indispensabili un'accurata sincronizzazione dell'evento di interesse con il sistema di acquisizione immagini, una videocamera con un numero di pixel sufficientemente elevato e di dimensioni ridotte per ottenere immagini dalla risoluzione¹⁸ adeguata, ed infine tempi di esposizione estremamente ridotti per “congelare” l'evento ed evitare la sfocatura delle immagini. La fotografia ad alta velocità può essere realizzata seguendo due diversi approcci definibili fotografia e cinematografia ad alta velocità.

3.2.1 Fotografia ad alta velocità

In questo approccio le immagini che compongono l'evoluzione temporale del fenomeno sono relative ad eventi di iniezione diversi (Figura 56). Per ogni iniezione, la videocamera viene sincronizzata con la sorgente di illuminazione all'istante t_i , ottenendo un singolo fotogramma. L'acquisizione è quindi ripetuta più volte in modo da ottenere un campione rappresentativo all'istante considerato. La sincronizzazione è quindi spostata ai successivi istanti $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ e la procedura ripetuta in modo da coprire l'intero processo di iniezione.

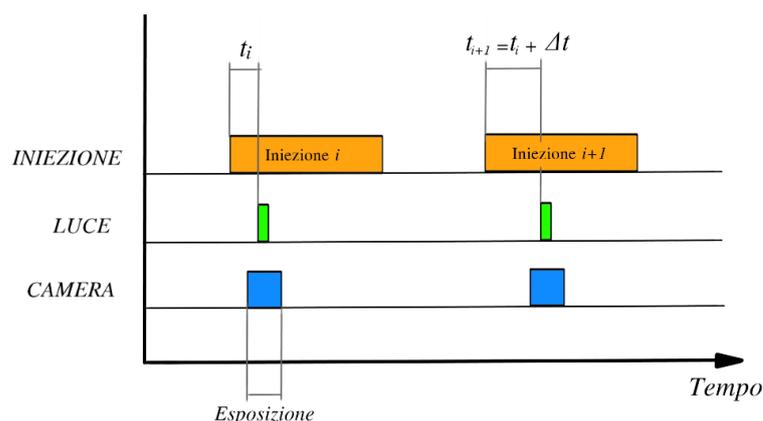


Figura 56 Sincronizzazione degli eventi nel caso di fotografia ad alta velocità

¹⁸ Spesso con risoluzione si indica il numero di pixel del sensore della videocamera. Tuttavia, questa definizione è di per sé poco significativa in quanto non fornisce informazioni in merito all'immagine ottenibile. La risoluzione cui si è interessati è quella dell'immagine, indicata in *pixel/mm*, che risulta essere figlia del setup ottico realizzato.

In questo approccio vengono tipicamente impiegate sorgenti di illuminazione pulsata, e l'esposizione dell'immagine è controllata agendo sulla durata dell'impulso luminoso. Le sorgenti impiegate possono essere di tipo laser, lampade strobo, flash Xenon oppure di tipo LED. Le videocamere, nella maggior parte dei casi, sono dotate di sensori con tecnologia CCD (*Charge Coupled Device*) e, tipicamente, permettono di ottenere risoluzioni maggiori rispetto a quelle impiegate nel caso di cinematografia. Il principale vantaggio di questo approccio è che, a seconda della risoluzione temporale realizzabile nella sincronizzazione degli eventi, è possibile effettuare acquisizioni ad istanti molto prossimi tra loro, realizzando cioè una pseudo-frequenza di acquisizione molto alta. Tuttavia, lo svantaggio è che i singoli fotogrammi appartengono ad eventi di iniezione diversi e quindi la ricostruzione è rappresentativa di un'evoluzione media. Si parla, infatti, di evoluzione *pseudo-real time*. Inoltre, il numero di iniezioni necessario a caratterizzare il fenomeno è molto più alto di quello richiesto nella tecnica cinematografica.

3.2.2 Cinematografia ad alta velocità

Nella cinematografia ad alta velocità, per ogni evento di iniezione viene acquisita l'intera sequenza temporale, che sarà pertanto rappresentativa della singola evoluzione (Figura 57). In questo approccio l'illuminazione è tipicamente di tipo continuo ed il tempo di esposizione è gestito attraverso la videocamera.

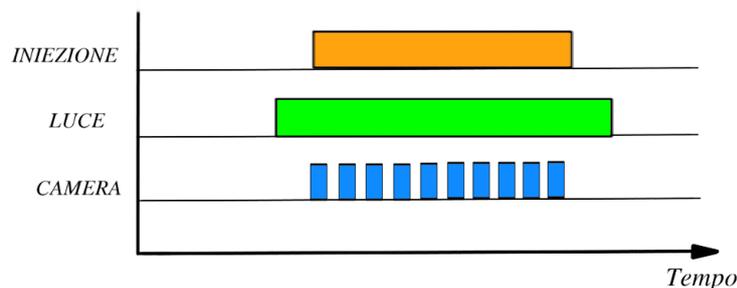


Figura 57 Sincronizzazione nella Cinematografia ad alta velocità

Le videocamere utilizzate impiegano tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) e solitamente realizzano risoluzioni inferiori a quelle ottenibili nel caso di fotografia ad alta velocità. I sensori delle videocamere forniscono una risposta elettrica proporzionale all'integrale dell'energia incidente sulla superficie dei pixel, la quale è quindi convertita in immagine. L'entità della risposta è funzione della quantità di fotoni incidenti nel tempo di esposizione. Date le basse esposizioni indispensabili per acquisire correttamente eventi così rapidi, occorre un'illuminazione ad elevata energia, ovvero dei sensori dotati di pixel molto grandi in modo da collezionare quanti più fotoni possibile. Nelle due tecniche esposte si sfruttano queste considerazioni in modo diametralmente opposto. Nella fotografia ci si concentra sul singolo fotogramma fornendo un'elevatissima illuminazione in un intervallo temporale molto breve. Il tempo di integrazione del sensore è mantenuto elevato e, conseguentemente, i pixel del sensore possono essere di dimensioni ridotte (inferiori a $10 \mu m$). Nella cinematografia, effettuando acquisizioni a frequenze dell'ordine dei $20 \div 100 \text{ kFPS}$, non è possibile generare luci pulsate con sufficiente intensità a tali frequenze e si adotta un'illuminazione continua. Di conseguenza l'esposizione è gestita

dalla videocamera stessa, ma a questo punto il tempo di integrazione non può essere elevato. Per questo motivo si ha la necessità di sensori dotati di pixel molto grandi, capaci di “raccolgere” quanta più luce possibile. In questa applicazione i sensori hanno dimensioni dei pixel tipicamente dell’ordine dei $20 \mu m$.

3.3 Algoritmi di elaborazione e problema della sogliatura

Acquisite le immagini di spray secondo uno dei due approcci descritti, occorre estrarre da queste le caratteristiche macroscopiche di interesse. Per poter valutare tali parametri occorre innanzitutto distinguere ciò che viene considerato spray da ciò che costituisce l’ambiente circostante. Questa operazione, visivamente immediata, deve essere effettuata in modo automatico secondo un criterio che non richieda l’intervento dell’operatore in modo da non risentire di scelte soggettive.

L’operazione di separazione di un soggetto da una scena che lo contiene è definita segmentazione e rappresenta, al di là di casi banali, uno dei più ardui compiti nell’ambito dell’analisi delle immagini [40]. La maggior parte degli algoritmi di segmentazione si basa su due proprietà dell’intensità dei pixel: discontinuità e somiglianza. Gli algoritmi della prima categoria si basano sull’individuazione di bruschi cambi di intensità nell’immagine, come spigoli e bordi, mentre nella seconda categoria rientrano le tecniche che si prefiggono di classificare l’immagine in regioni sulla base di criteri predefiniti. Spesso, per le situazioni più complicate, approcci appartenenti alle due categorie sono combinati tra loro, incrementando le possibilità di successo dell’operazione.

Data la sua semplicità ed intuitività, la principale tecnica di segmentazione, facente parte della seconda categoria, è la sogliatura (*Thresholding*) anche definita binarizzazione. Considerata un’immagine digitale $\psi(x, y)$ in scala di grigi, e definito un livello di intensità luminosa dell’immagine, chiamato soglia T , ogni punto di coordinate (x, y) nel quale $\psi > T$ è classificato come soggetto, viceversa come facente parte dello sfondo. In altri termini, l’immagine sogliata φ è definita come:

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} 1 & \psi(x, y) > T \\ 0 & \psi(x, y) \leq T \end{cases} \quad (14)$$

Questo approccio è definito sogliatura globale ed è facilmente attuabile quando un oggetto è chiaramente distinguibile, ovvero si presenta in condizioni di massimo contrasto rispetto allo sfondo che lo circonda. L’operazione di sogliatura, di per sé, non richiede la valutazione dell’istogramma dell’intensità dei pixel, tuttavia il ragionare su questo permette di fare alcune importanti considerazioni. Le condizioni ottimali per un’operazione di sogliatura richiedono che l’istogramma si presenti come una distribuzione bimodale con due picchi ben distinti. In tal caso, il valore di soglia ottimale può facilmente essere individuato in corrispondenza dell’avvallamento tra i due picchi. A titolo di esempio, in Figura 58, si riporta una situazione di questo tipo relativamente ad un’immagine con intensità ad 8-bit (ovvero il cui valore di intensità del pixel può variare da 0 a 255). L’immagine di Figura 58 è ottenuta

corrompendo l'originale, realizzata con due quadrati di intensità pari a 60 e 150, con del rumore gaussiano a media nulla e deviazione standard di 8 livelli di intensità.

Con riferimento questo esempio scegliendo un livello di soglia tra 100 e 120, si ottiene una perfetta segmentazione dell'oggetto, ovvero il quadrato centrale separato dallo sfondo. Il risultato dell'operazione è riportato in Figura 59.

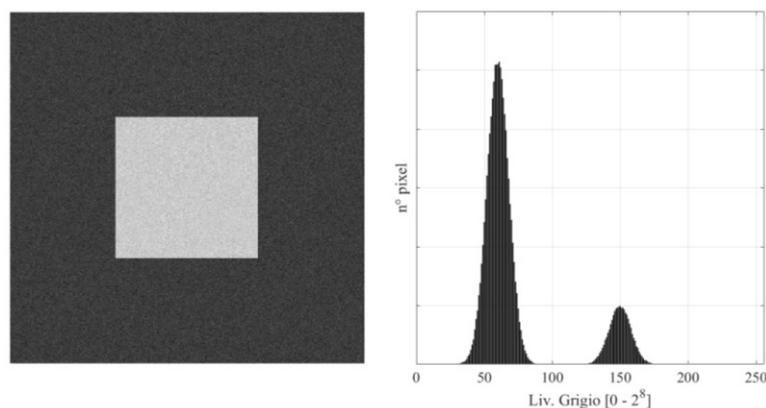


Figura 58 Immagine a 8-bit e relativo istogramma dell'intensità dei pixel

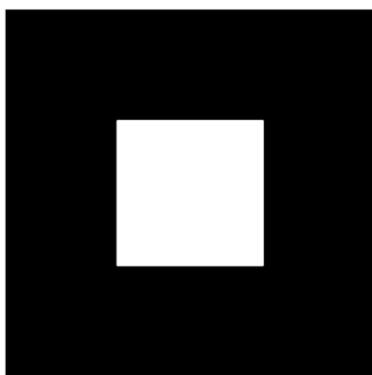


Figura 59 Immagine di figura 56 segmentata

Anche la sogliatura di un caso semplice come quello di Figura 58 richiede comunque un minimo di elaborazione preliminare. Per una perfetta segmentazione, infatti, occorre eseguire un'operazione di filtraggio spaziale dell'immagine per evitare che piccole zone nell'immagine vengano assegnate allo sfondo, benché facenti parte del quadrato interno. Questo comportamento, attribuibile al rumore, è ben rappresentativo di quanto avviene con immagini reali dove il rumore è sempre presente.

Nella maggior parte dei casi reali ci si trova in situazioni ben lontane dall'esempio su riportato. Tipicamente, l'istogramma non presenta due picchi ben distinti ed è difficile, se non impossibile, individuare l'avvallamento tra i due a causa della natura stessa dell'oggetto fotografato e delle condizioni di illuminazione. Per meglio comprendere cosa avvenga in un caso reale, in Figura 60 è stato riportato un possibile pattern di illuminazione che, come si vedrà, è abbastanza tipico nelle acquisizioni di spray diesel dove la sorgente luminosa è posizionata lateralmente allo spray e l'immagine ripresa perpendicolarmente a questa.

La Figura 61 riporta l'immagine di Figura 58 moltiplicata per il pattern di illuminazione con il risultante istogramma. Come si può notare da quest'ultimo, l'avvallamento facilmente individuabile nell'istogramma di Figura 58, non è più riscontrabile e l'approccio precedente non può essere attuato, così come non si può definire una soglia globale senza prima correggere l'illuminazione difforme, benché visivamente risulti banale distinguere il quadrato centrale nell'immagine.

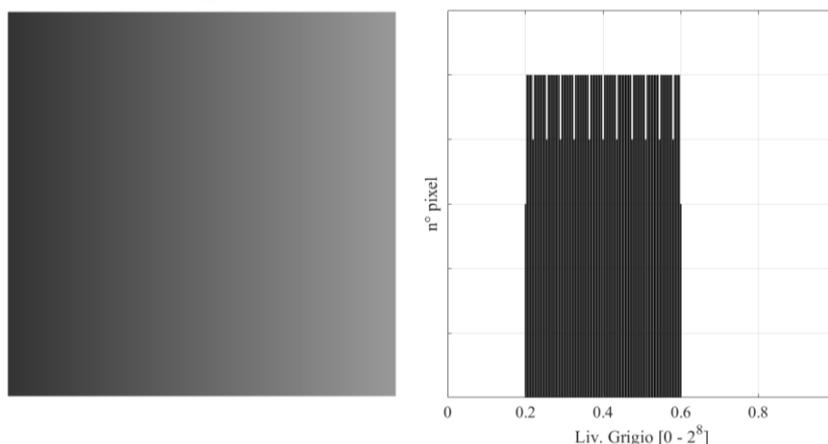


Figura 60 Possibile pattern di illuminazione non uniforme. Rampa di intensità

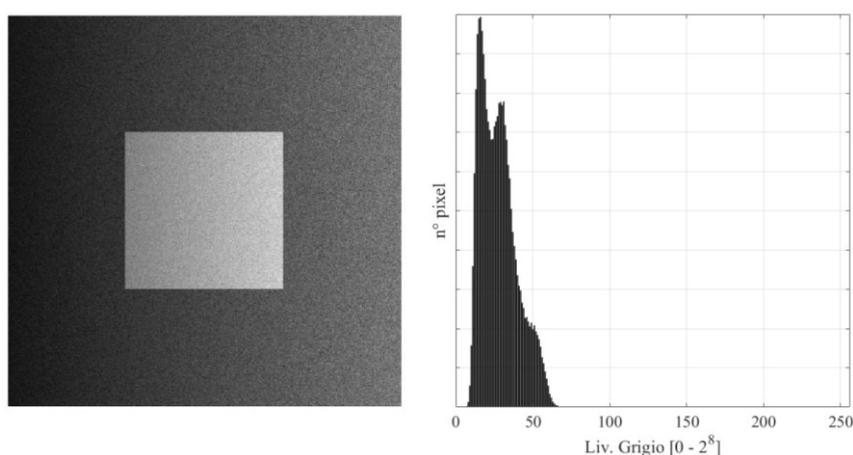


Figura 61 Immagine di Figura 57 moltiplicata per il pattern di Figura 59.

L'analisi di immagini di spray diesel rappresenta un caso estremamente complicato a cui applicare la tecnica di sogliatura.

La Figura 62 riporta le immagini di spray diesel, a due diversi istanti temporali, ed il relativo istogramma dove l'asse delle ordinate è stato limitato per rendere visibile la parte attribuibile allo spray. Come è facile notare le distribuzioni ottenute sono molto lontane dall'esempio di Figura 58. L'istogramma, inoltre, a parità di illuminazione, varia al variare dell'istante temporale considerato, occupando lo spray porzioni di immagine diverse. Con getti poco sviluppati, quindi, la parte imputabile allo spray ha influenza ancor più bassa ed è difficilmente individuabile. Sulla base di queste considerazioni è chiaro come definire un criterio con cui effettuare la distinzione di ciò che è spray da ciò che rappresenta lo sfondo sulla base degli istogrammi non sia affatto semplice.

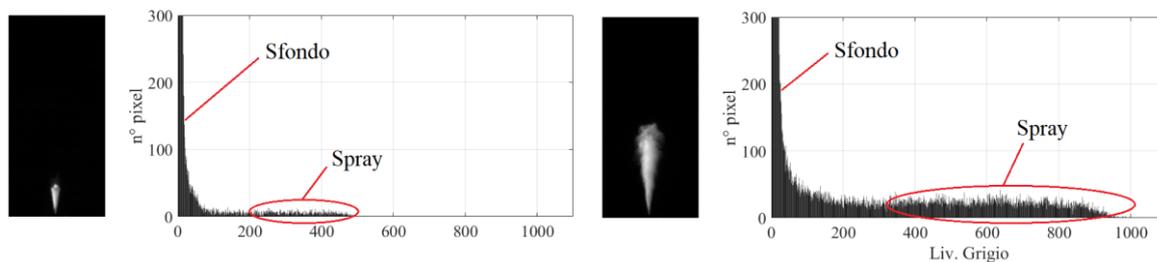


Figura 62 Esempio di spray e relativi istogrammi

Oltre alla mera separazione del soggetto dallo sfondo, nell'analisi di spray, l'obiettivo è l'ottenimento di informazioni quantitative: penetrazione ed angolo di diffusione. Una corretta estrazione di tali parametri dovrebbe essere indipendente dall'algoritmo implementato. In Figura 63 sono riportati l'andamento della penetrazione e dell'angolo di diffusione estratti dall'immagine di Figura 62 di destra, al variare del livello di soglia che, sulla base dell'istogramma dell'immagine, è stato assunto nel range $T=50\div 250$. Alcune delle immagini sogliate ottenute sono riportate in Figura 64. La penetrazione è stata calcolata a partire da queste, considerando la distanza tra il polverizzatore e l'ultimo pixel bianco lungo l'asse passante per il polverizzatore stesso. L'angolo di diffusione è stato valutato come l'angolo compreso tra le semirette uscenti dal foro del polverizzatore e passanti per il bordo dello spray ad una distanza del 50% della penetrazione precedentemente valutata¹⁹.

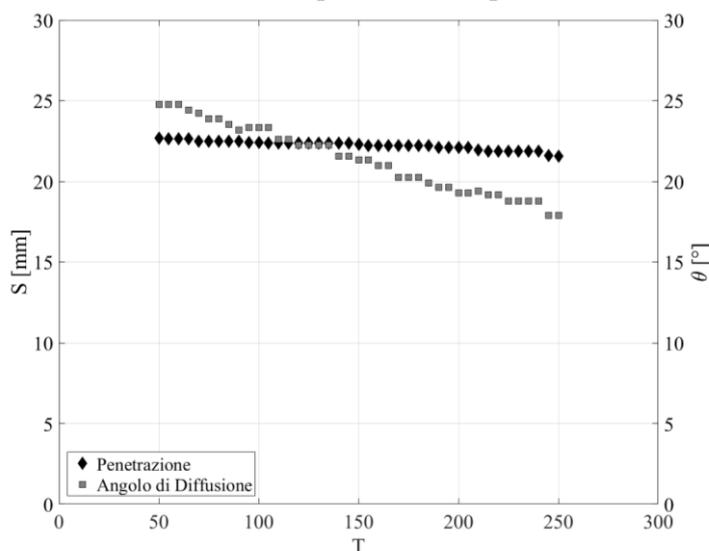


Figura 63 Effetto della sogliatura su penetrazione e angolo di diffusione

Dalla Figura 63 è evidente come la penetrazione sia poco influenzata dal livello di soglia, esibendo una variazione minore del $\pm 5\%$ ($\pm 1\text{mm}$) nell'intero intervallo di sogliature considerato. L'angolo di diffusione, invece, risulta fortemente influenzato dal livello di soglia adottato. Esso mostra, nell'intervallo di soglie considerato, una variazione del $\pm 15\%$ ($\pm 4^\circ$).

¹⁹ Secondo una delle possibili definizioni di questo parametro.

La motivazione di questo comportamento può essere compresa osservando la Figura 65 dove è riportata l'immagine originale dello spray ed i profili di intensità radiali al variare della distanza dal foro (a sinistra) e lungo la direzione assiale (a destra).

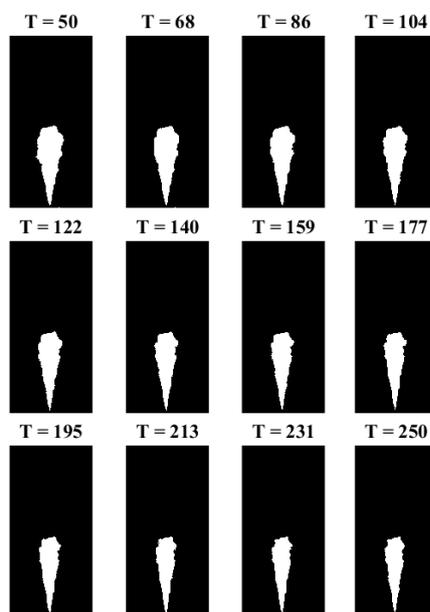


Figura 64 Immagini sogliate per diversi valori di soglia T

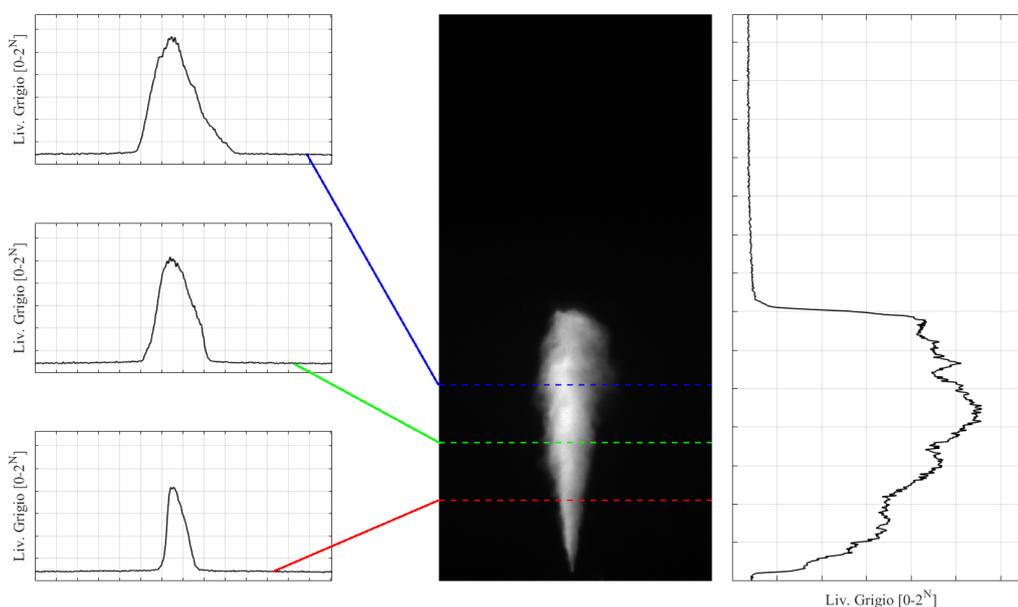


Figura 65 Profili di intensità luminosa - Livello di grigio di uno spray

Il profilo di intensità nella direzione assiale in corrispondenza del fronte dello spray presenta un gradiente dell'intensità luminosa particolarmente elevato. Questo produce un netto contrasto locale tra spray e sfondo. Risulta quindi chiaro come variando il livello di soglia, la posizione del pixel rappresentativo della penetrazione si allontani molto poco dal foro.

Osservando invece i profili radiali di intensità luminosa, si nota come lungo tale direzione si abbia un gradiente poco accentuato; conseguentemente, una piccola variazione del livello di sogliatura comporta una significativa variazione della misura dell'angolo di diffusione.

Il problema esposto è talvolta sottovalutato e nessuna informazione viene fornita in merito alla tecnica di elaborazione utilizzata per ottenere i parametri macroscopici a partire dalle immagini acquisite [68]–[70]. In [63], [71]–[74] il livello di soglia è scelto arbitrariamente o selezionato sulla base dell'istogramma nell'avvallamento tra i due picchi, in modo da ottenere un risultato “visivamente” soddisfacente per l'intero set di immagini. Tuttavia, per quanto mostrato, tale soluzione non è soddisfacente in quanto dipende dalla soggettività dell'operatore e, comunque, impone una scelta di compromesso poiché l'istogramma varia durante l'evoluzione dello spray.

L'approccio seguito in [75] utilizza una tecnica definita posterizzazione (*Posterization*). Questa tecnica può essere interpretata come una sogliatura multilivello e non implica un'unica transizione da nero a bianco, ma un certo numero di livelli di grigio. Dal momento che il livello di posterizzazione rappresentativo del bordo è scelto, come rimarcato dagli autori, arbitrariamente sulla base qualitativa dei risultati ottenuti, nessun beneficio deriva dall'implementare questa tecnica rispetto alla sogliatura.

Molti ricercatori hanno proposto dei criteri per definire la soglia in modo automatico basandosi sull'analisi dell'istogramma. In [76] è descritto come operare con immagini aventi istogrammi privi di due picchi ben distinti, utilizzando la sola distribuzione dello sfondo e scegliendo la soglia in corrispondenza del cambio di concavità di questa. Questo algoritmo implica il calcolo della derivata dell'istogramma ed il filtraggio numerico di questa mediante filtri la cui dimensione è definita sulla base dell'esperienza. Appare evidente come questa procedura, benché proposta come automatica, di fatto implichi ancora l'intervento dell'operatore nella fase di calibrazione dei parametri dell'algoritmo, svolto sulla base dell'analisi visiva finalizzata a compensare la variabilità introdotta dal setup sperimentale.

Altre tecniche [65], [77]–[79] seguono approcci di natura statistica. L'istogramma normalizzato di un'immagine viene considerato come una stima della funzione di probabilità che un pixel possieda un dato livello di intensità luminosa. L'obiettivo di queste tecniche è di minimizzare la probabilità di assegnazione erronea di un pixel in una classe (ovvero come spray o come sfondo). L'istogramma è considerato come la somma pesata di due distribuzioni relative allo spray ed allo sfondo ed il valore di soglia è scelto sulla base di un test di massima verosimiglianza (*Likelihood Ratio Test* - LRT). Questa tecnica implica la stima delle funzioni che descrivono le distribuzioni dell'intensità dello sfondo e dello spray, che, tuttavia, non sono note a priori e variano da immagine a immagine. Questo presuppone che per una corretta applicazione del metodo debba essere prestata estrema cura al setup sperimentale in termini di illuminazione prevedendo, ad esempio, il lavaggio della camera in continuo, in modo che le condizioni di illuminazione siano il più costanti possibile ed abbiano, quindi, influenza ridotta sugli istogrammi. La stima della distribuzione dello sfondo viene effettuata interpolando l'istogramma con diverse funzioni e scegliendo la migliore in termini statistici mentre la distribuzione dello spray è sempre assunta gaussiana, senza

tuttavia avere una evidenza di tale affermazione. Il metodo si rivela comunque valido ed è largamente impiegato.

In [80]–[85] sono impiegati per l’analisi degli spray approcci statistici di applicazione generale nell’analisi delle immagini. In particolare, si tratta dei metodi di definizione del livello di soglia ottimale conosciuti come criterio della Massima Entropia [86] e metodo di Otsu [87]. Queste tecniche si rivelano valide ai fini della mera operazione di sogliatura, ma producono risultati molto diversi gli uni dagli altri. Per evidenziare i diversi risultati ottenibili le immagini di spray relativi a tre diversi istanti temporali dell’iniezione sono state elaborate con i due metodi citati e riportate in Figura 66.

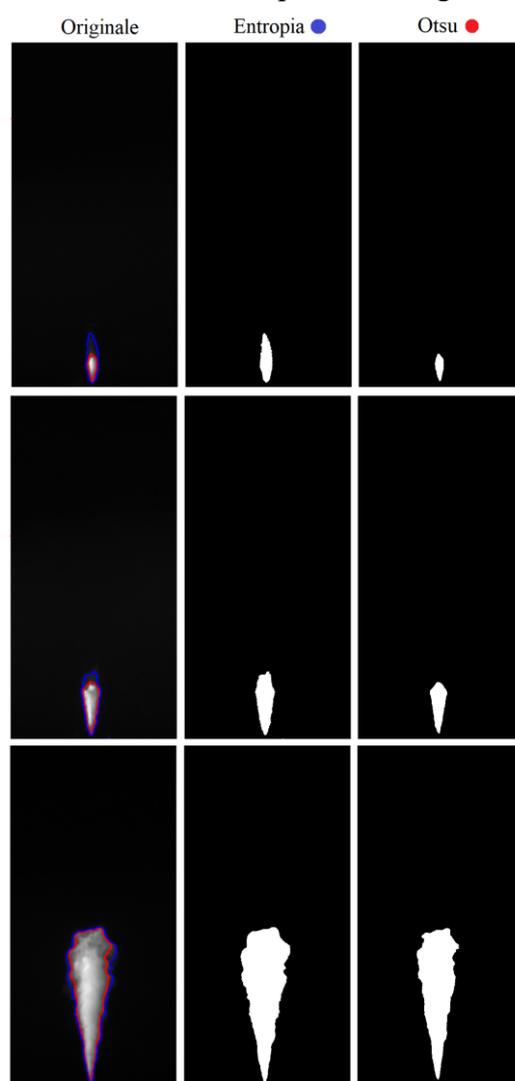


Figura 66 Confronto tra metodo della Massima Entropia e metodo di Otsu

La colonna centrale e quella di destra riportano le immagini binarizzate con i valori di soglia ottenuti tramite i due metodi (indicati in alto). I relativi contorni sono riportati sulle immagini originali nella colonna di sinistra. Osservando la Figura 66 si evince come i contorni degli spray ottenuti mediante le due tecniche siano significativamente diversi, come, ovviamente, le relative penetrazioni ed angoli di diffusione. Un confronto analogo è stato effettuato in

[81] dove il metodo di Otsu viene confrontato con il metodo LRT citato in precedenza. Anche in questo caso si mette in evidenza come le due tecniche portino ad angoli di diffusione che differiscono di oltre il 24%.

Diverso dagli approcci statistici è quello riportato in [88]. In questo lavoro la determinazione dell'angolo di diffusione è effettuata indipendentemente dalla sogliatura interpolando il profilo radiale dell'intensità luminosa delle immagini con una funzione gaussiana a diverse distanze dall'origine del polverizzatore. Nonostante gli autori affermino come la miglior interpolazione si ottenga con una funzione gaussiana simmetrica, la semplice analisi visiva dei profili radiali riportati a titolo di esempio in Figura 65 evidenzia come tale affermazione non possa essere generalizzata. L'illuminazione difforme potrebbe infatti "distorcere" l'immagine dello spray sbilanciandone l'intensità a seconda del pattern di illuminazione.

Va evidenziato come le tecniche citate, normalmente applicate per l'analisi di spray, non siano in grado di gestire pattern di illuminazione difformi. Per fare in modo che l'operazione di sogliatura abbia successo, senza per ora fare considerazioni in merito all'effettivo valore dei parametri ottenuti, occorre un'adeguata elaborazione preliminare delle immagini. Primo fra tutti, occorre effettuare una correzione dello sfondo, e quindi del pattern di illuminazione, in modo tale da eliminare l'effetto di quest'ultimo. Questa operazione non è talvolta praticabile, in quanto non è possibile ottenere una stima corretta dello sfondo, oppure risulta essere poco efficace ai fini della sogliatura.

Tra gli algoritmi di definizione automatica della soglia, infine, rientra l'algoritmo proposto in [67]. Tale algoritmo è basato sulla decomposizione di L'ève-Karhunen (*Karhunen-L'ève Decomposition* - KLD) ovvero sull'analisi delle componenti principali (*Principal Component Analysis* - PCA). Questo algoritmo verrà ripreso in questa tesi, proponendo due nuove derivazioni che saranno confrontate con le principali tecniche di analisi.

3.4 Algoritmo KLD ed Evoluzioni

L'algoritmo KLD di sogliatura prende spunto da una tecnica conosciuta come metodo delle Autofacce (*Eigenfaces*) [89] implementato nell'ambito della visione artificiale per il riconoscimento dei volti.

Un'immagine digitale può essere considerata come una funzione bidimensionale $f(x,y)$ il cui valore assunto dal pixel di coordinate x e y è rappresentativo dell'intensità luminosa dello stesso. L'immagine è costituita da un numero di pixel $N = l \times h$, con l ed h rispettivamente larghezza e altezza dell'immagine in pixel. Anziché considerare l'immagine digitale nella convenzionale forma matriciale, è possibile fornirne una rappresentazione vettoriale, concatenando le colonne a formare un singolo vettore colonna di dimensione $(l \cdot h) \times 1$. La singola immagine sarà quindi un punto, descritto dal vettore, in uno spazio N -dimensionale rappresentativo di tutte le immagini di dimensione $l \times h$. Tali immagini, ovviamente, potranno raffigurare qualsivoglia soggetto, ma le immagini di soggetti con caratteristiche simili, ad esempio volti umani, o spray nel nostro caso, si disporranno all'interno di questo spazio in una zona circoscritta, cioè in un sottospazio. Questa regione

contiene le informazioni maggiormente rilevanti che caratterizzano quella data famiglia di immagini. L'idea alla base della tecnica delle Autofacce, o più in generale delle Autoimmagini, è definire un sottospazio, quindi un set ridotto di vettori, che ben descriva la sola famiglia cui si è interessati. Questo obiettivo è ottenuto mediante tecniche di riduzione della dimensionalità come la decomposizione di *Lòeve-Karhunen* (KLD) anche definita trasformata di *Hotelling* o Analisi delle Componenti Principali (PCA) [90]. Queste tecniche nascono in ambito statistico per la semplificazione di set di dati, e successivamente sono state applicate con successo alla compressione di segnali, o finalizzate al riconoscimento [91].

3.4.1 Algoritmo KLD di sogliatura

L'algoritmo proposto in [89] è impiegato in [67] per la determinazione in modo automatico del valore di soglia ottimale con cui effettuare la binarizzazione delle immagini di spray.

Si consideri ψ l'immagine di spray che si intende analizzare di dimensione $N = (l \times h)$ rappresentata come vettore colonna di dimensione $(l \cdot h) \times 1$. A questo punto si generi un database costituito da n immagini binarie φ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) ottenute sogliando l'immagine originale ψ con n livelli di sogliatura equi spaziate tra il minimo ed il massimo valore di intensità luminosa nell'immagine. La Figura 67 riporta l'immagine originale ed il database di immagini soglia costruito²⁰.

A partire dalle n immagini binarizzate si determina quindi l'immagine media:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad \varphi_i, \bar{\varphi} \in \mathbb{R}^{N \times 1} \quad (15)$$

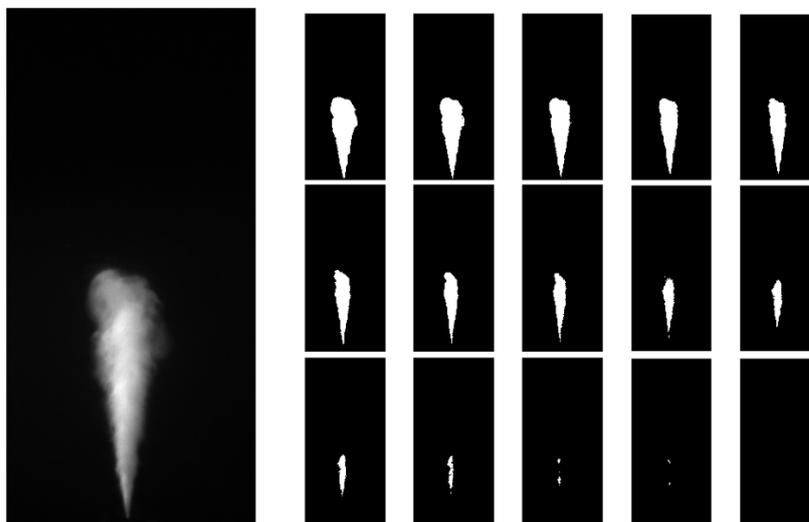


Figura 67 Immagine originale (a sinistra) e database delle immagini soglia

²⁰ Si ribadisce che l'algoritmo opera sulle immagini in forma di vettori. Qui rappresentati, per ovvie ragioni, come immagini.

Successivamente si valutano i vettori deviazione delle singole immagini soglia rispetto alla media:

$$\boldsymbol{\omega}_i = (\boldsymbol{\varphi}_i - \bar{\boldsymbol{\varphi}}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

A partire dai vettori deviazione si definisce la matrice deviazione concatenando i vettori secondo le colonne:

$$\mathbf{D} = \{\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \dots, \boldsymbol{\omega}_n\} \quad \mathbf{D} \in \mathbb{R}^{N \times n} \quad (17)$$

se ne calcola la matrice di covarianza:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\omega}_i \boldsymbol{\omega}_i^T = \mathbf{D} \mathbf{D}^T \quad \mathbf{C} \in \mathbb{R}^{N \times N} \quad (18)$$

Da questa matrice quadrata è possibile determinare una base dello spazio delle immagini soglia. Allo scopo si valutano gli autovalori non nulli λ_j ($j = 1, 2, \dots, M$), con $M \leq N$, e gli autovettori \mathbf{e}_j linearmente indipendenti denominati, per questa applicazione, Autoimmagini, legati da:

$$\mathbf{C} \mathbf{e}_j = \lambda_j \mathbf{e}_j \quad (19)$$

Secondo la definizione di base, ogni immagine dello spazio immagini soglia può essere rappresentata come combinazione lineare delle autoimmagini costituenti la base.

La determinazione degli autovalori della matrice di covarianza \mathbf{C} risulta essere particolarmente onerosa da un punto di vista della potenza e del tempo di calcolo. Difatti si tratterebbe di determinare le radici di un polinomio di grado N^2 con N rappresentativo delle dimensioni dell'immagine, ad esempio 1024×768 o 1280×1024 . Fortunatamente, derivando la matrice covarianza solo da n immagini binarie, al più si avranno n autovettori significativi, essendo gli altri associati ad autovalori nulli. Questo può essere dimostrato considerando la matrice di covarianza ridotta \mathbf{B} , definita come:

$$\mathbf{B} = \mathbf{D}^T \mathbf{D} \quad \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (20)$$

Siano \mathbf{v}_j gli autovettori di \mathbf{B} e μ_j gli autovalori non nulli di questa. Da cui, per la definizione stessa di autovettore:

$$\mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{v}_j = \mu_j \mathbf{v}_j \quad (21)$$

pre-moltiplicando ambo i lati per \mathbf{D} si ha:

$$\mathbf{D} \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{v}_j = \mathbf{D} \mu_j \mathbf{v}_j \quad (22)$$

$$(\mathbf{D} \mathbf{D}^T) \mathbf{D} \mathbf{v}_j = \mu_j \mathbf{D} \mathbf{v}_j \quad (23)$$

E ponendo quindi $\mathbf{e}_j = \mathbf{D} \mathbf{v}_j$ si ottiene:

$$\mathbf{C} \mathbf{e}_j = \mu_j \mathbf{e}_j \quad (24)$$

del tutto analoga alla (19). Si deduce quindi che:

$$\lambda_j = \mu_j \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (25)$$

cioè gli autovalori della matrice di covarianza \mathbf{C} e della matrice di covarianza ridotta \mathbf{B} sono gli stessi, ma le dimensioni della matrice ridotta sono $(n \times n)$ anziché $(N \times N)$ con $n \ll N$. È evidente il beneficio di considerare la matrice ridotta \mathbf{B} anziché quella di covarianza \mathbf{C} .

A questo punto ogni immagine dello spazio delle immagini soglia può essere approssimata in modo ottimale come combinazione lineare degli autovettori (autoimmagini) determinati:

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_i \cong \sum_{j=1}^M b_{ij} \mathbf{e}_j + \bar{\boldsymbol{\varphi}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (26)$$

Allo stesso modo si può pensare di rappresentare l'immagine originale che sarà correlata alle immagini soglia e quindi descritta nello stesso sottospazio:

$$\hat{\boldsymbol{\psi}} \cong \sum_{j=1}^M a_j \mathbf{e}_j + \bar{\boldsymbol{\varphi}} \quad (27)$$

Nelle Eq. 26 e 27, a_j e b_{ij} sono rispettivamente le coordinate²¹ dell'immagine originale e delle immagini soglia nello spazio calcolato. In tale spazio queste immagini divengono confrontabili ed è possibile valutare le distanze δ_i tra il vettore immagine originale proiettato nello spazio delle immagini soglia $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ e le immagini soglia $\hat{\boldsymbol{\varphi}}_i$:

$$\delta_i^2 = \|\hat{\boldsymbol{\psi}} - \hat{\boldsymbol{\varphi}}_i\|^2 = \sum_{j=1}^M (a_j - b_{ij})^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (28)$$

L'immagine soglia associata alla minor distanza δ_i dall'immagine originale è quindi quella corrispondente al valore di soglia ottimale.

Nella realtà, per una ricostruzione accettabile non occorre nemmeno considerare tutti gli M autovettori, ma un numero M^* inferiore, associato agli autovalori maggiormente significativi, ovvero con valore assoluto maggiore. In [89] e [91] è mostrato come la combinazione lineare di 40 -100 autovettori sia sufficiente per gli scopi di riconoscimento di un volto umano. Nella applicazione agli spray la "complessità" delle immagini è nettamente inferiore a quella di un volto umano²², il che implica che l'utilizzo di un numero inferiore di autovettori permetta di rappresentare le immagini con sufficiente approssimazione (i primi 6 in [67]). A titolo di esempio in Figura 68 sono riportate sotto forma di immagini i 6 autovettori relativi al database soglia dell'immagine di Figura 67.

²¹ Rappresentano cioè i coefficienti con cui scalare gli autovettori per determinare il punto nel sottospazio

²² I volti che per quanto simili sono molto diversi tra loro con molte caratteristiche quali taglio degli occhi distanza tra loro, naso, bocca ecc. Gli spray hanno invece molte meno caratteristiche e forme molto simili.

Nella Figura 69 sono riportate l'immagine originale e l'immagine ricostruita mediante i primi sei autovettori e nella Figura 70 è riportata l'immagine originale e la soglia ottenuta mediante il metodo appena descritto. Per semplificare il confronto, il contorno dell'immagine sogliata è sovrapposto sull'originale (linea rossa).

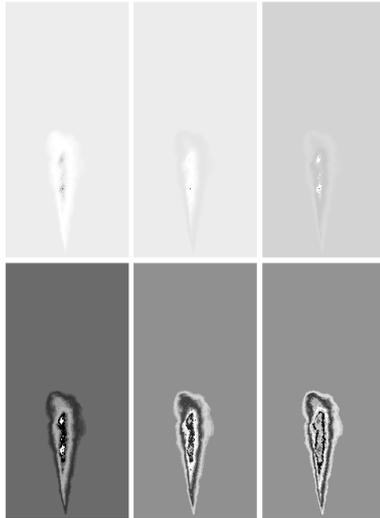


Figura 68 Base costituita dalle prime 6 autoimmagini

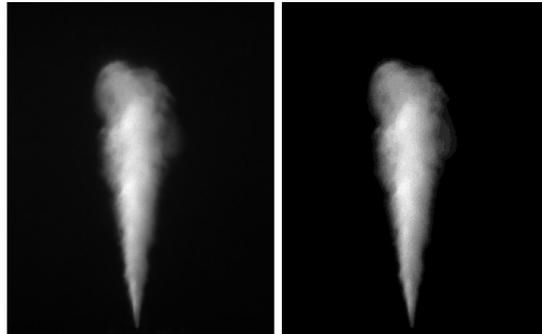


Figura 69 Originale (sinistra) e ricostruita (destra)

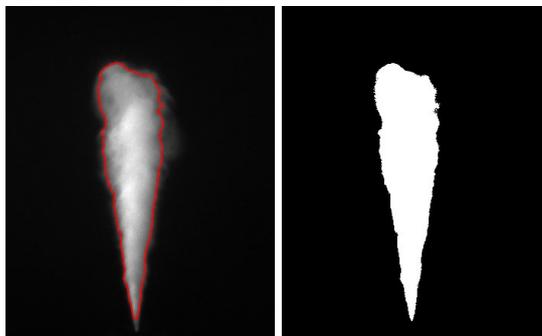


Figura 70 Originale (sinistra) e soglia associata mediante l'algoritmo KLD (destra)

Dall'analisi visiva dell'immagine di Figura 70, il contorno individuato sembrerebbe sottostimare l'effettivo bordo dello spray. Inoltre, in [67] il numero di immagini con cui viene creato il database di immagini soglia non è indicato, così come non è analizzata un'eventuale dipendenza del risultato da questo. Infine, la scelta sul numero di autovettori dovrebbe essere effettuata sulla base di un criterio oggettivo e non sull'analisi visiva dell'immagine ricostruita a partire da questi. Queste considerazioni hanno portato allo sviluppo di una versione modificata dell'algorithmo ed a una sua ulteriore evoluzione.

3.4.2 Evoluzione Algoritmo KLD di Sogliatura

L'immagine binarizzata dello spray ottenuta mediante un'operazione di sogliatura deve ricalcare il più possibile l'effettivo contorno del soggetto. Nel caso di immagini di spray, tuttavia, l'intrinseca natura dell'immagine non rende l'operazione di facile attuazione non avendo il getto un bordo netto e non essendo spesso le immagini acquisite in condizioni di contrasto ottimale a causa della "nebbia" che si genera all'interno della camera di prova per le iniezioni ripetute. La capacità dell'occhio umano di distinguere i contorni è notevole e l'operazione di sogliatura ci risulta immediata. Osservando nel dettaglio il contorno determinato mediante l'algorithmo KLD di due diverse immagini di spray (Figura 71) si nota come questo tenda a sottostimare il contorno dello spray.

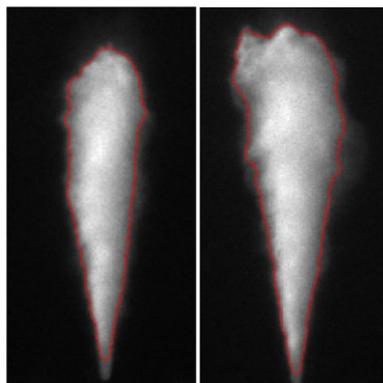


Figura 71 Esempi di contorno determinato con algoritmo KLD

Questa considerazione visiva, benché priva di rigore, permette di evidenziare come parte dell'immagine attribuibile allo spray sia erroneamente assegnata allo sfondo. Per ovviare a tale problematica ed individuare correttamente il contorno dello spray, l'algorithmo è stato modificato nel modo seguente:

Determinata, nel modo precedentemente descritto, l'immagine binarizzata φ_i^{opt} più vicina all'originale ψ , si considera una nuova immagine ottenuta mediante un'operazione di prodotto logico tra l'immagine originale e quella in bianco e nero determinata, dopo opportuna negazione logica.

$$\tilde{\psi} = \psi \wedge \neg \varphi_i^{opt} \quad (29)$$

L'operazione descritta è rappresentata in Figura 72. A questo punto i passaggi dell'algorithmo possono essere ripetuti considerando la nuova immagine $\tilde{\psi}$.

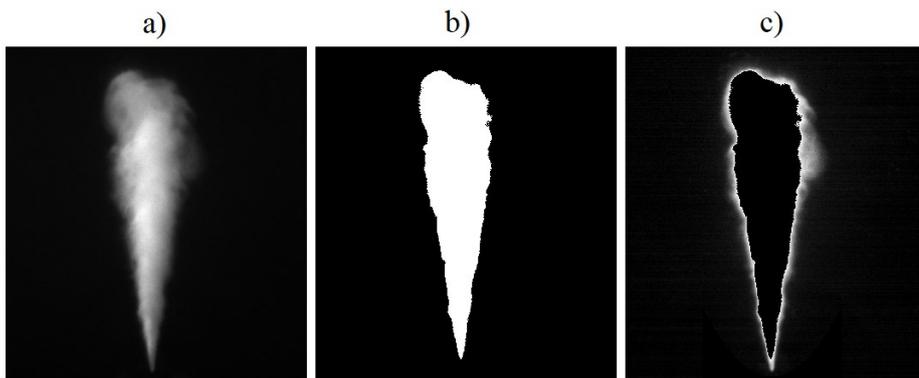


Figura 72 a) Originale b) Soglia Associata c) Originale \wedge \neg Associata

Si determina quindi il database di immagini soglia, se ne valuta la base e quindi la soglia associata secondo il criterio della minima distanza euclidea (Eq. 27). Procedendo in questo modo si ottengono due contorni di spray, quello determinato sull'immagine originale, definito interno, ed uno esterno. A partire da tali contorni è quindi possibile valutare penetrazione ed angolo di diffusione (Figura 73). Nel seguito la penetrazione è misurata come la distanza di una retta perpendicolare all'asse dello spray che include il 99% di pixel bianchi. In modo similare, l'angolo di diffusione è valutato come l'angolo compreso tra due rette uscenti dal foro del polverizzatore comprendenti il 95% dello spray, escludendo il 2.5% di pixel da ambo i lati del getto²³.

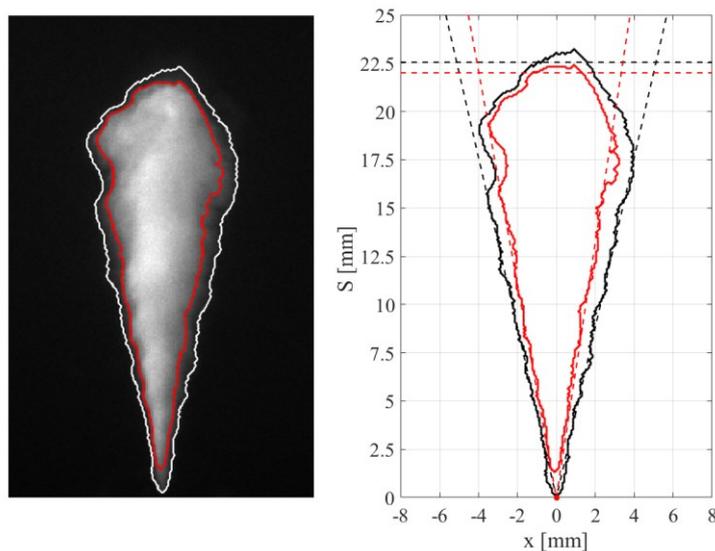


Figura 73 Contorni determinati. Penetrazione e angolo di diffusione

Come detto nella versione dell'algorithm KLD proposta in [67] la base è ottenuta considerando i primi 6 autovalori ed autovettori associati della matrice di covarianza ridotta. Questa scelta è stata effettuata sulla base del confronto visivo tra l'immagine originale e

²³ Secondo una delle possibili definizioni di questo parametro. Come evidenziato in [14] non vi è una definizione univoca e pertanto è indispensabile specificare come è stato quantificato.

l'immagine ricostruita su di un ampio campione di immagini ed è, quindi, una scelta soggettiva, e potrebbe non essere quella ottimale.

Nel seguito viene introdotto un criterio in grado di stabilire dinamicamente immagine per immagine il numero di direzioni principali da impiegare. Prima di definire questo criterio dinamico è bene ricordare che:

- gli autovalori sono rappresentativi della variabilità dei dati e tale rappresentatività è associata al modulo del loro valore (più semplicemente, nel nostro caso, l'autovalore massimo è associato all'autoimmagine che maggiormente influenza la ricostruzione dell'immagine originale);
- il numero degli autovalori dipende dalle dimensioni della matrice di covarianza \mathbf{B} che, nel nostro problema, è associato al numero di immagini soglia adottato.

Risulta quindi evidente che il numero di immagini soglia adottato, come il numero di autoimmagini utilizzate nella base, rappresentino due parametri di soggettività nell'algoritmo KLD.

Assegnato un numero n di immagini soglia e calcolati gli n autovalori della matrice di covarianza ridotta \mathbf{B} ed ordinati per ordine decrescente, definiamo la somma cumulata normalizzata degli autovalori come:

$$\mathcal{S}(M) = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (30)$$

In Figura 74 è riportato l'andamento della somma cumulata normalizzata $\mathcal{S}(M)$ relativa all'immagine di spray di Figura 73. Il numero di immagini soglia è stato assunto pari a 15, 30, 45, 60 e 100.

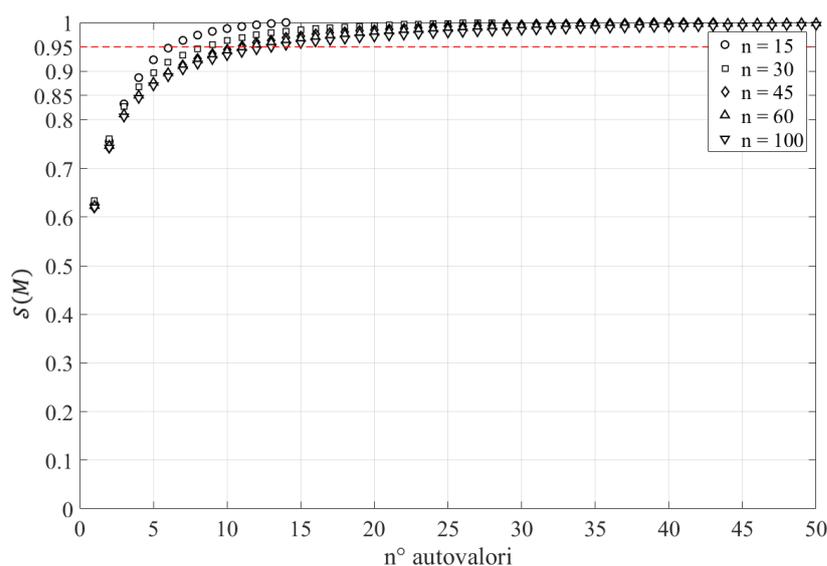


Figura 74 Somma cumulata normalizzata autovalori matrice di covarianza B

Osservando gli andamenti di Figura 74 si può notare come il numero di autovalori, e quindi autovettori, non possa essere fisso, ma debba essere scelto in relazione alla dimensione della matrice di covarianza ridotta. Per l'immagine di spray in esame, si nota come per tutte le dimensioni del database analizzate la scelta dei primi 15 autovalori ed autovettori associati rappresenti il 95% del contenuto di informazioni del database di immagini a dimostrazione del fatto che per l'immagine di spray si possa operare una forte riduzione della dimensionalità.

Sulla base di tale analisi si è deciso di considerare come numero di autovalori significativo, e quindi autoimmagini, quel numero M^* tale per cui la somma cumulata normalizzata è pari a 0.95. Va sottolineato come questa considerazione sia valida per qualunque immagine di spray, e che l'effettivo numero di autoimmagini considerate dipende dall'immagine analizzata.

Definito il criterio di scelta del numero di direzioni principali²⁴ da considerare, occorre analizzare se vi è un'influenza della dimensione del database sui parametri macroscopici misurati. Tale studio è riportato nella parte di analisi sperimentale.

3.4.2 Algoritmo KLD Sintetico (KLDS)

L'algoritmo KLD descritto si propone come un metodo automatico di definizione della soglia ottimale. Come per altre tecniche, quindi, l'estrazione dei parametri caratteristici dello spray è determinata a partire dall'immagine originale convertita in bianco e nero. Nell'algoritmo proposto nel seguito, invece, si definisce un nuovo metodo che consente la determinazione diretta dei parametri macroscopici.

È evidente come la forma dello spray, ad eccezione del verificarsi di fenomeni anormali per i quali la valutazione dell'angolo di diffusione e della penetrazione passerebbe in secondo piano, possa essere schematizzata come un cono con una parte frontale assimilabile ad una calotta più o meno bombata. Partendo da questa considerazione appare evidente la forte correlazione che esiste tra tutte le immagini di spray. Pertanto, disponendo di una collezione di immagini rappresentative di questo insieme, sarebbe possibile, a partire dalla base di questo spazio, rappresentare tutte le immagini di spray.

L'idea è quindi quella di creare un database sintetico, nel senso di definito artificialmente, di immagini binarie di spray. Seguendo il solito approccio se ne calcola la base e, analogamente alla tecnica precedente, si proietta l'immagine da analizzare e le immagini artificiali in questo spazio in modo confrontarle. Una volta individuata l'immagine artificiale più simile all'immagine di spray è automaticamente valutata la penetrazione e l'angolo di diffusione.

Affinché la tecnica funzioni correttamente, il database artificiale deve essere il più significativo possibile in relazione alle immagini che si intende analizzare. Per fare questo si sono generate una serie di immagini di spray aventi penetrazioni, angoli di diffusione e forme della parte frontale diverse.

²⁴ Ovvero del set di autovalori\autovettori, cioè la base di tale spazio.

Una delle maggiori criticità nella tecnica delle componenti principali utilizzata come metodo di riconoscimento è la necessità di avere immagini scalate e registrate spazialmente. In particolare, questo problema è molto sentito nelle applicazioni di riconoscimento del volto [91] e in tale ambito, prima di applicare la tecnica, occorre scalare le immagini del database in modo che occhi, naso e bocca occupino approssimativamente la stessa porzione di immagine e che venga escluso lo sfondo.

Nella tecnica KLD di sogliatura descritta nel paragrafo 3.4.1, il problema non sussiste essendo il database di immagini soglia ottenuto dall'immagine stessa che si intende analizzare; in tal caso le immagini sono naturalmente scalate e spazialmente registrate.

Nell'evoluzione dell'algoritmo qui introdotta, invece, il problema torna ad essere attuale. Infatti, il database dovrebbe essere significativo di tutti gli spray ai diversi istanti di evoluzione, quindi per forma e dimensioni diverse. Generare, tuttavia, un insieme di immagini che comprenda tutte queste forme non sarebbe praticabile dato il numero estremamente elevato di immagini necessario.

La scelta adottata è stata quindi quella di creare un database di immagini artificiali di spray che approssimativamente occupino tutti la stessa porzione dell'immagine e di scalare le singole immagini di spray acquisite in modo da renderle confrontabili alle immagini artificiali. Va inoltre precisato che le dimensioni delle immagini artificiali devono essere identiche a quelle delle immagini di spray che si andranno ad analizzare.

Le immagini artificiali del database sono state create secondo i seguenti parametri:

- l'angolo di diffusione è stato fatto variare tra 5 e 30° con un passo di 0.2°;
- la penetrazione, intesa come distanza tra l'origine della parte triangolare e il pixel bianco più distante lungo l'asse dello spray, è stata assunta pari a metà dell'altezza delle immagini acquisite con una variabilità del 15%, discretizzata in 8 intervalli.

La forma del fronte dello spray è parametrizzata attraverso un'ellisse tangente alla penetrazione imposta ed intersecante il cono in corrispondenza del semiasse perpendicolare all'asse dello spray (in verde in Figura 75). Il semiasse parallelo all'asse dello spray (in blu in Figura 75) è stato fatto variare nel rispetto delle condizioni di tangenza e di intersezione con il cono, tra 0 ed un valore pari ad 1/3 della penetrazione discretizzata in 8 intervalli.

Il database generato risulta essere pertanto costituito da $n = 8064$ immagini artificiali.

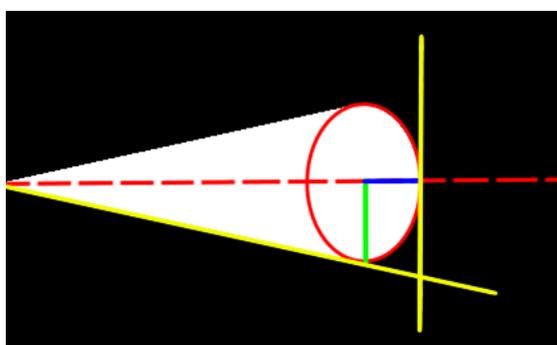


Figura 75 Parametri delle immagini artificiali

La Figura 76 riporta alcune delle immagini artificiali create.

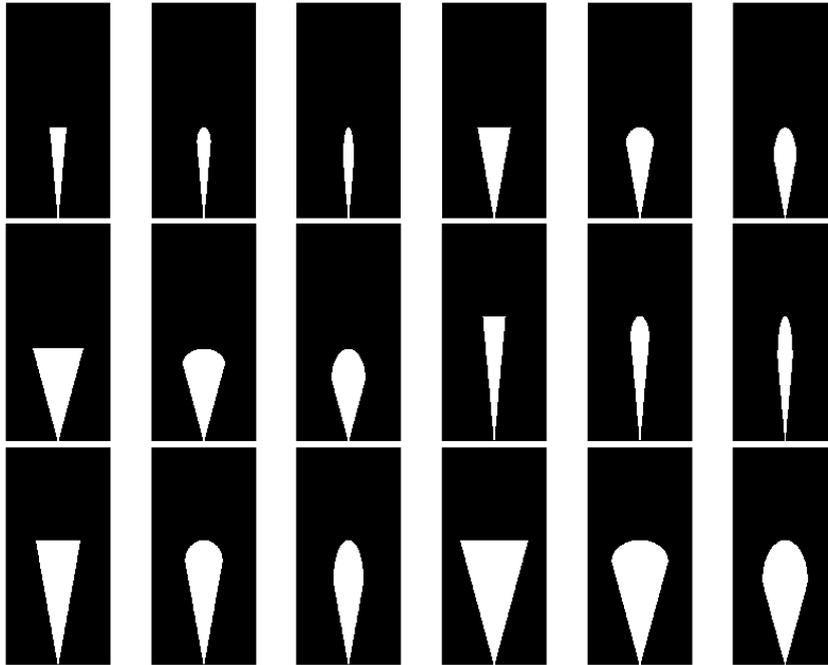


Figura 76 Database Sintetico (solo alcune immagini sono riportate).

Una volta generato il database sintetico, si calcola l'immagine media $\bar{\varphi}$ (Eq. 15) si costruisce la matrice di deviazione \mathbf{D} (Eq. 17) e calcola quella di covarianza ridotta \mathbf{B} (Eq. 20). Infine, si calcolano gli autovettori di \mathbf{B} e si definisce la base dello spazio sintetico.

Il numero di componenti principali da utilizzare è valutato in modo da rappresentare il 95% del contenuto di informazioni.

In Figura 77 è riportato l'andamento della somma cumulata normalizzata, dopo aver riordinato gli autovalori in ordine decrescente.

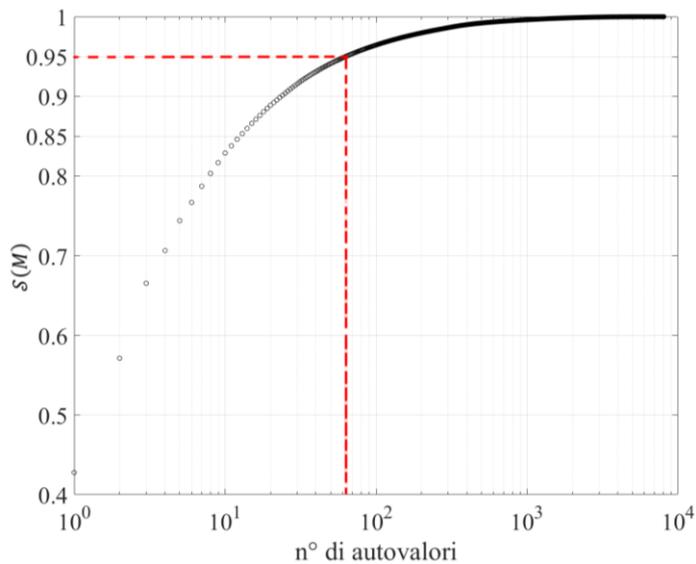


Figura 77 Somma cumulata normalizzata degli autovalori

Il numero di autovalori significativi, e di conseguenza autovettori associati, è quindi stato scelto, per quanto detto nel paragrafo 3.4.2, pari a $M^* = 63$. Per l'analisi successiva, dove si confronta l'immagine di spray con il database di immagini sintetiche, è sufficiente memorizzare le 63 autoimmagini della base e le componenti delle proiezioni delle immagini sintetiche sulla base dello spazio sintetico.

L'analisi delle immagini di spray acquisite può quindi essere svolta proiettando sulla base l'immagine stessa. Le componenti b_{ij} così ottenute per le 63 direzioni principali sono confrontate con le rispettive componenti a_j delle immagini artificiali determinando l'immagine artificiale più rappresentativa (Eq. 28). A differenza dell'algoritmo KLD di sogliatura, però, l'immagine associata è ora geometricamente definita ed il valore di penetrazione ed angolo di diffusione sono i parametri di costruzione dell'immagine stessa.

3.4.3 Procedura di elaborazione di un'immagine KLDS

L'elaborazione inizia con la definizione di alcuni parametri comuni. In particolare occorre definire il centro del foro del polverizzatore ed il fattore di scala delle immagini ovvero la risoluzione in termini di *mm/pixel* delle immagini. Questa operazione è necessaria per ogni tecnica di analisi.

Si crea quindi il database di immagini artificiali. Dette immagini hanno le stesse dimensioni delle immagini da analizzare e sono create secondo le modalità descritte in precedenza. La creazione del database è effettuata soltanto una prima volta e, qualora già calcolato, può essere impiegato anche per successive analisi di immagini di pari dimensione.

L'elaborazione vera e propria delle immagini di spray inizia con l'importazione dell'immagine da analizzare (Figura 78a) a cui segue la rimozione dello sfondo (operazione sempre effettuata a prescindere dalla tecnica di analisi adottata). Questo passaggio è indispensabile per correggere le non uniformità di illuminazione e deve essere effettuata in funzione del setup sperimentale realizzato. Nelle immagini di spray qui adottate l'illuminazione è ottenuta mediante lampada allo Xenon ad alta intensità. La sorgente luminosa è disposta lateralmente allo spray che è ripreso frontalmente dalla videocamera. La sorgente luminosa è collocata esternamente alla camera di prova su un lato della stessa, mentre dal lato opposto è posizionato uno specchio atto a rendere il più possibile simmetrica l'illuminazione.

Lo sfondo è stimato per ogni singola immagine sfruttando le parti di immagine "libere" dallo spray. In questo modo la correzione tiene conto delle possibili fluttuazioni dell'intensità luminosa tra un evento e l'altro nonché, essendo la lampada posizionata solo da un lato e riflessa da uno specchio dall'altro, dell'ombra dello spray stesso. In particolare, lo sfondo è ottenuto mediante interpolazione bilineare dell'intensità luminosa media delle 5 colonne di pixel ai lati dell'immagine (Figura 78b). La Figura 78c (la cui intensità è scalata per motivi di visualizzazione) evidenzia il pattern di illuminazione portato lateralmente attraverso gli accessi ottici. Lo sfondo stimato è quindi sottratto all'originale ottenendo l'immagine corretta sulla quale eseguire l'analisi.

Per eseguire correttamente l'analisi mediante l'algoritmo KLDS è necessario scalare l'immagine in modo da renderla confrontabile con le immagini del database. Come indicato in sede di costruzione, gli spray artificiali occupano approssimativamente metà dei pixel dell'altezza dell'immagine. Il fattore di scala è quindi ottenuto proprio con una prima approssimativa valutazione della penetrazione che, come visto nella parte introduttiva, è di semplice valutazione.

La scalatura è effettuata mediante una trasformazione affine di scala ed applicando un interpolatore lineare [40]. La Figura 79 riporta l'immagine originale dopo la correzione dello sfondo (a) ed in seguito al ridimensionamento (b).

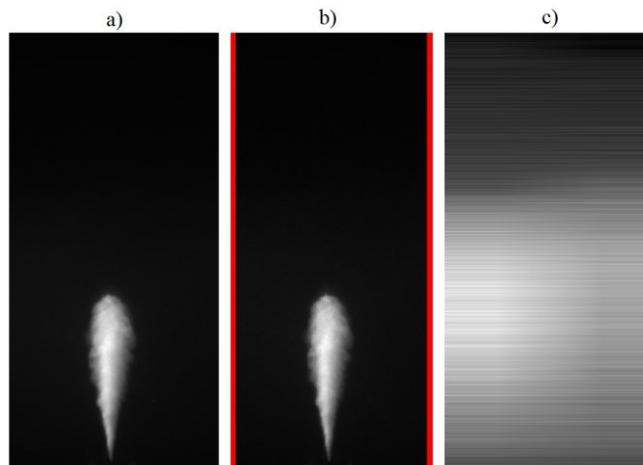


Figura 78 Pre-elaborazione: a) Originale b) Pixel per stima sfondo c) Sfondo stimato

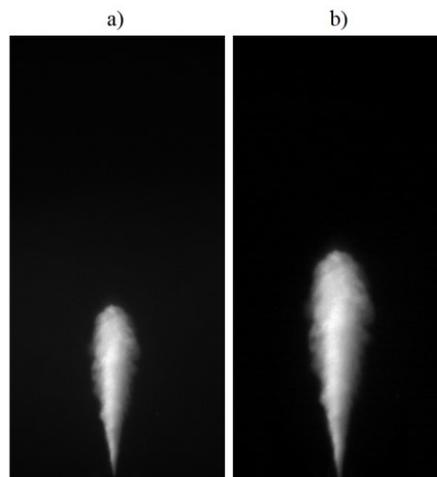


Figura 79 a) Immagine originale b) Immagine scalata

Scalata l'immagine si procede all'elaborazione vera e propria. L'immagine media del database è sottratta all'immagine originale scalata e si individua l'immagine artificiale più simile all'immagine di spray analizzata secondo l'approccio dell'algoritmo KLD canonico. L'immagine artificiale così individuata consente di associare sia la penetrazione che l'angolo di diffusione cercati.

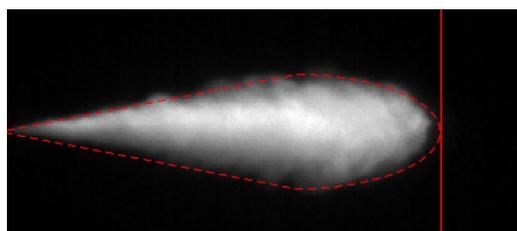


Figura 80 Risultato dell'elaborazione mediante algoritmo KLD Sintetico

La Figura 80 riporta il risultato dell'elaborazione effettuata. In linea rossa a tratti è evidenziato il contorno dell'immagine artificiale associata ed in linea continua la penetrazione. Va ricordato che il valore di penetrazione così ottenuto deve essere corretto secondo il fattore di scala utilizzato nella trasformazione. In Figura 81 sono riportate le immagini relative ad istanti temporali diversi e le elaborazioni ottenute.

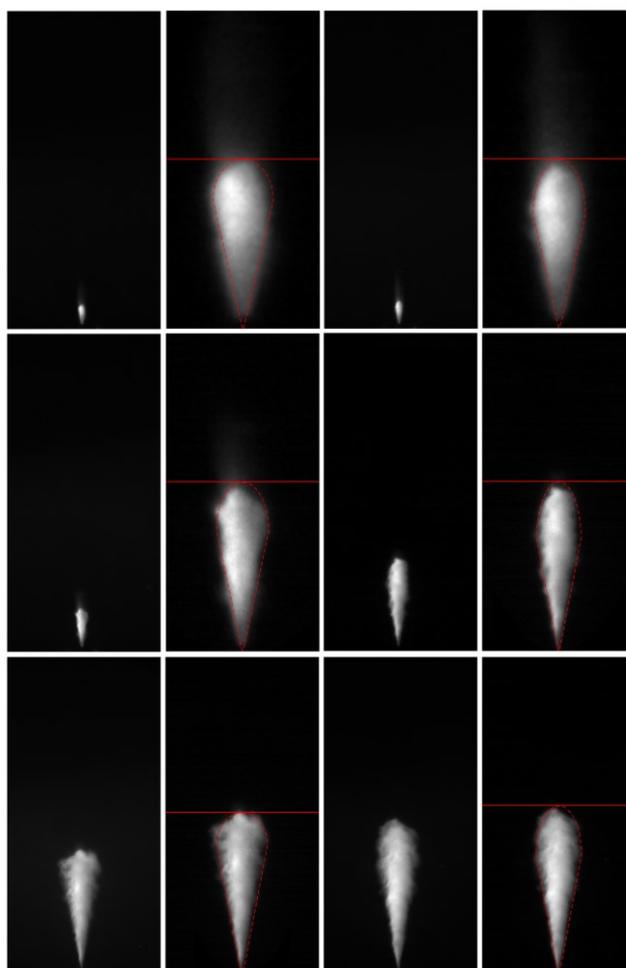


Figura 81 Elaborazione ad istanti temporali diversi

L'analisi di questi risultati evidenzia come l'algoritmo KLDS sia in grado di operare a tutti gli istanti temporali dell'evoluzione dello spray, indipendentemente dalle dimensioni reali degli spray analizzati.

3.5 Analisi Sperimentale

* Setup sperimentale ed immagini da:

C. Dongiovanni, C. Negri, and D. Pisoni, "Macroscopic Spray Parameters in Automotive Diesel Injector Nozzles With Different Hole Shape," 2003.

Gli algoritmi proposti sono stati testati su immagini di spray relative ad un iniettore CR automobilistico. Le immagini sono state acquisite mediante la tecnica della fotografia ad alta velocità e si riferiscono ad uno solo dei 5 fori presenti sul pulverizzatore. L'iniettore è montato su di un giunto sferico, così da poter orientare lo spray oggetto di analisi perpendicolarmente alla videocamera. In questo modo non occorre introdurre alcuna correzione geometrica nei parametri misurati. Il singolo getto è stato isolato mediante un'opportuna capsula in grado di deflettere i getti circostanti senza alterarne l'evoluzione. Questa scelta è praticamente obbligata, data l'illuminazione laterale impiegata. Infatti, i getti circostanti oscurerebbero parte del getto di interesse rendendo difficoltosa l'analisi successiva.

3.5.1 Setup Sperimentale

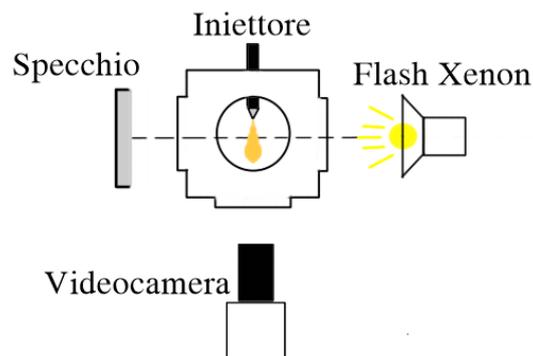


Figura 82 Schema setup sperimentale analisi ottica

Le immagini sono state acquisite ad intervalli progressivamente crescenti di $10 \mu s$, $30 \mu s$ e $200 \mu s$ nei rispettivi intervalli, valutati a partire dall'energizzazione dell'iniettore, di $70 \div 240 \mu s$, $240 \div 600 \mu s$, $600 \div 1600 \mu s$. Per ogni istante di acquisizione sono state effettuate 20 ripetizioni. Il campione di immagini acquisite consta quindi di 700 immagini per ogni condizione di prova.

La videocamera impiegata è una *PCO-SensiCam* con sensore monocromatico, tecnologia CCD, a 12-bit. Questo ha dimensione fisica del pixel pari a $6.7 \mu m \times 6.7 \mu m$. La risoluzione ottenuta nelle immagini è pari a $91 \mu m/pixel$.

L'illuminazione è stata realizzata mediante una lampada allo Xenon ad alta intensità. Le iniezioni sono state realizzate in una camera a volume costante, pressurizzata con Azoto a $3 \pm 0.5\% MPa$ ed alla temperatura di $18 \pm 1^\circ C$.

3.5.2 Condizioni operative

L'analisi sperimentale è stata condotta con riferimento a 5 condizioni operative dell'iniettore rappresentative del suo intero campo di lavoro. In particolare, si sono analizzate tre diverse pressioni di alimentazione del rail (p_r) e cinque tempi di energizzazione del solenoide (ET_m) riportate in Tabella 1.

<i>Test</i>	p_r [MPa]	ET_m [μ s]
A	60	380
B	60	750
C	90	563
D	135	460
E	135	600

Tabella 1 Condizioni operative analizzate

3.6 Risultati e discussione

3.6.1 Influenza numero di autovalori M^* e numero immagini database n

L'algoritmo KLD di sogliatura opera creando un database di immagini soglia ottenute a partire dall'immagine originale. Determinato tale spazio si procede alla determinazione delle direzioni principali di questo, ovvero alla determinazione della base dello spazio delle immagini spray. Vi sono quindi apparentemente due elementi di soggettività nell'algoritmo, ovvero il numero di immagini soglia n ed il numero di autovalori-autovettori associati M^* scelto per rappresentare la base. Per analizzare l'influenza di tali parametri, le immagini relative alle 5 condizioni operative sono state analizzate con l'algoritmo KLD di sogliatura proposto. Si hanno quindi due contorni di spray, definiti interno ed esterno. L'analisi è stata condotta con un numero di immagini soglia n pari a 15, 30 e 60. Il numero di autovettori (direzioni principali) è stato fissato a 6 in un caso [67], oppure definito in modo automatico per ogni immagine adottando il criterio del 95% della somma cumulata degli autovalori della matrice di covarianza ridotta.

Le Figure 83 – 87 riportano gli andamenti di penetrazione ed angolo di diffusione calcolati per le varie condizioni di test (Tabella 1) per il contorno interno (Fig. 83a – 87a) e per quello esterno (Fig. 83b – 87b).

Dagli andamenti dell'angolo di diffusione si nota che mantenere fisso il numero di autovettori a 6, anziché determinarlo in modo dinamico caso per caso, comporta una sovrastima dell'angolo, sia interno che esterno, variabile dal 5 al 10% in tutte le condizioni di test. Per quanto riguarda la penetrazione, invece, la sua valutazione non è influenzata dal numero di autovalori-autovettori impiegati. Questo risultato era in qualche modo atteso essendo la penetrazione poco sensibile al livello di sogliatura. Ne segue che il database di immagini binarie generato per ogni immagine esibisce una limitata varianza relativamente

alla direzione principale “associata” alla penetrazione. I trend degli andamenti rimangono comunque i medesimi, ma si può notare osservando le bande di incertezza, specialmente nei primi istanti di iniezione, si riducano adottando la scelta dinamica del numero M^* di autovettori.

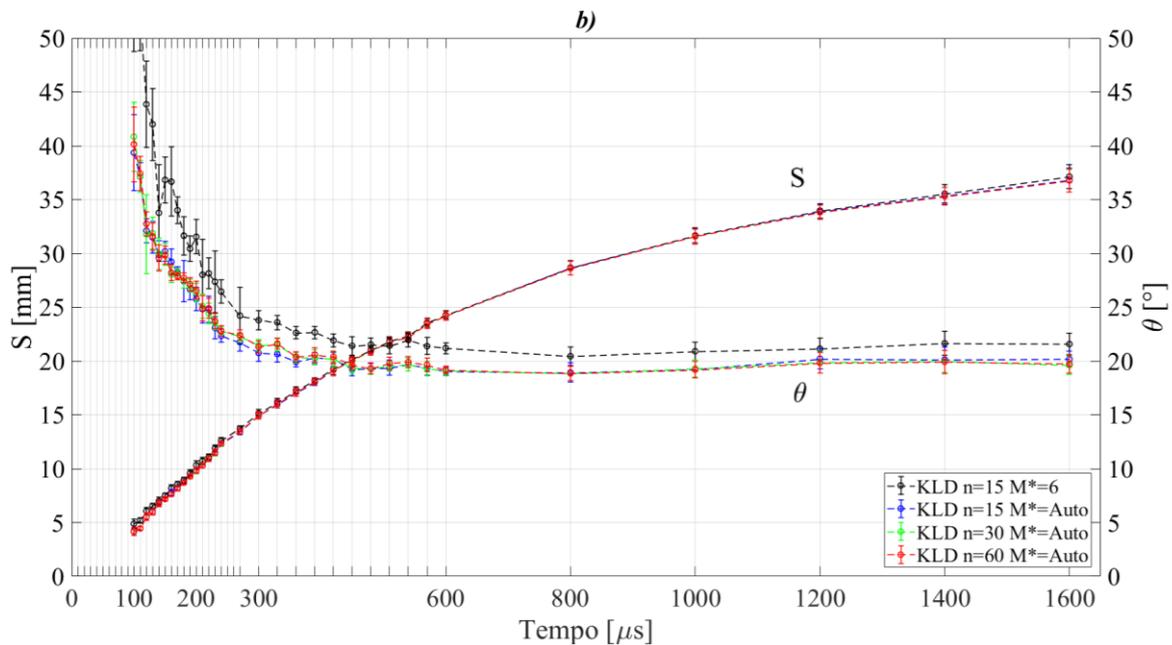
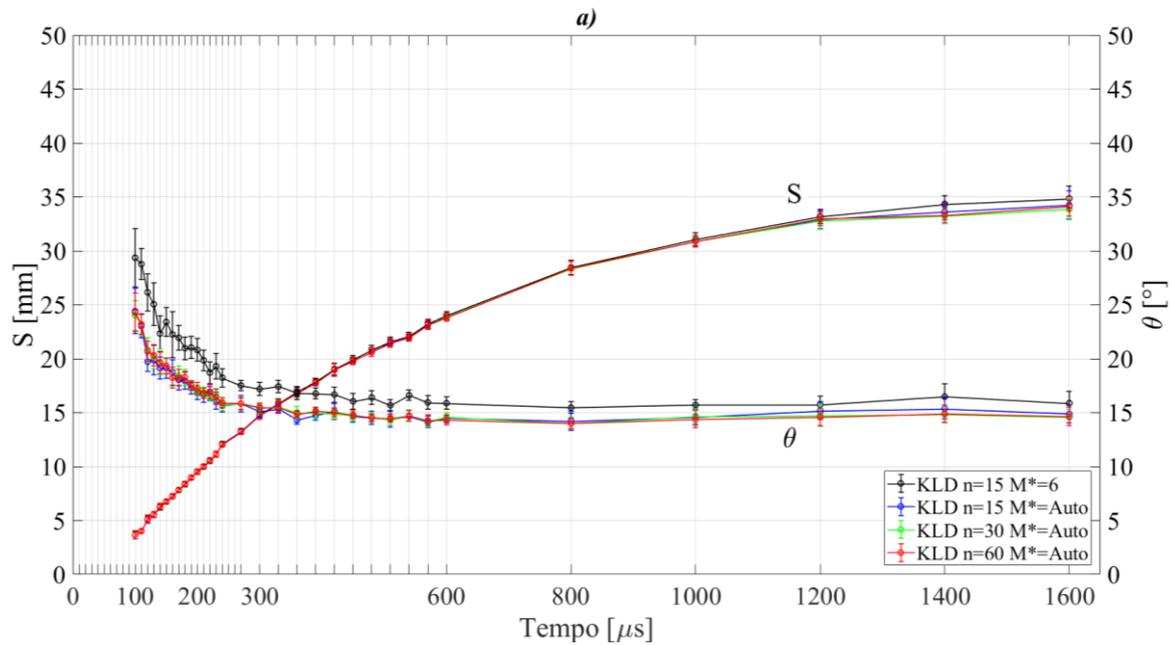


Figura 83 Test A: Influenza n e M^* . a) Contorno Interno b) Contorno Esterno

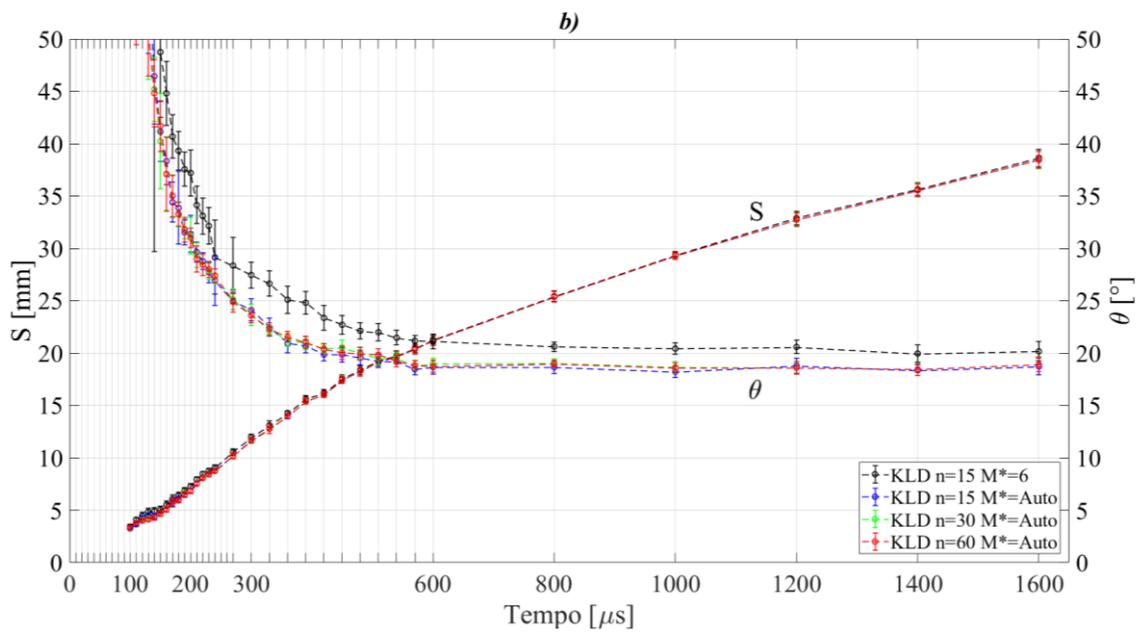
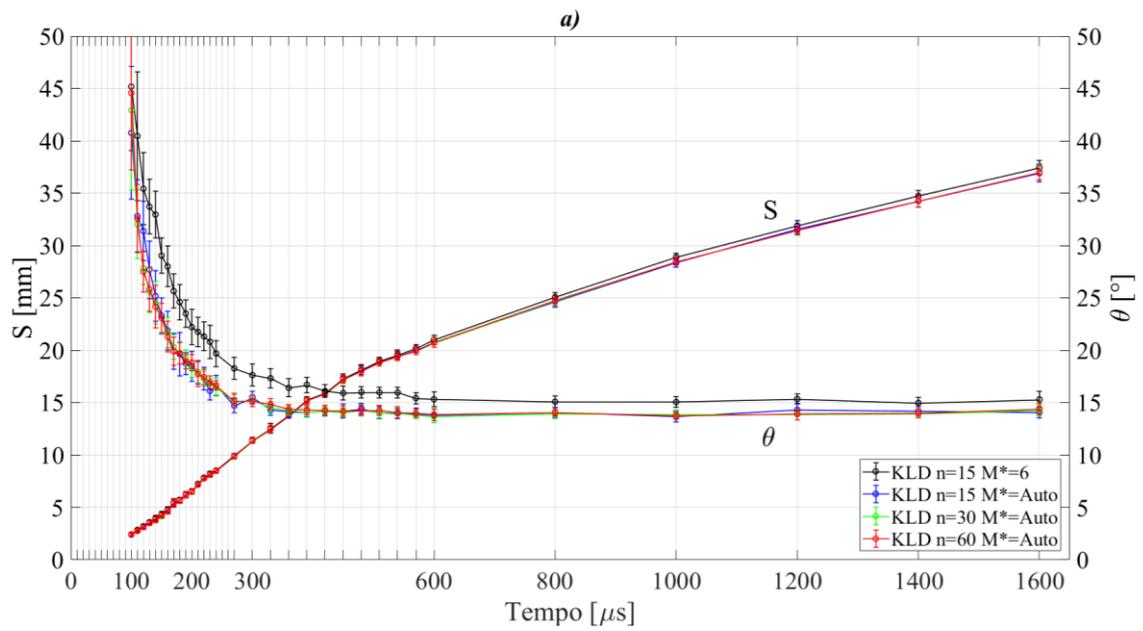


Figura 84 Test B: Influenza n e M*. a) Contorno Interno b) Contorno Esterno

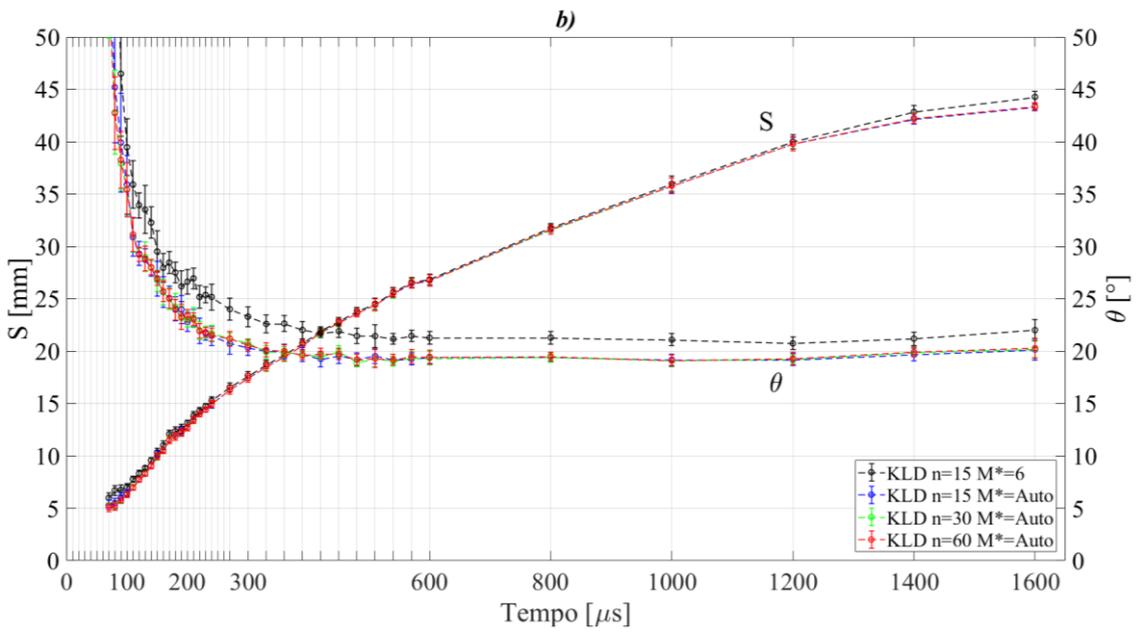
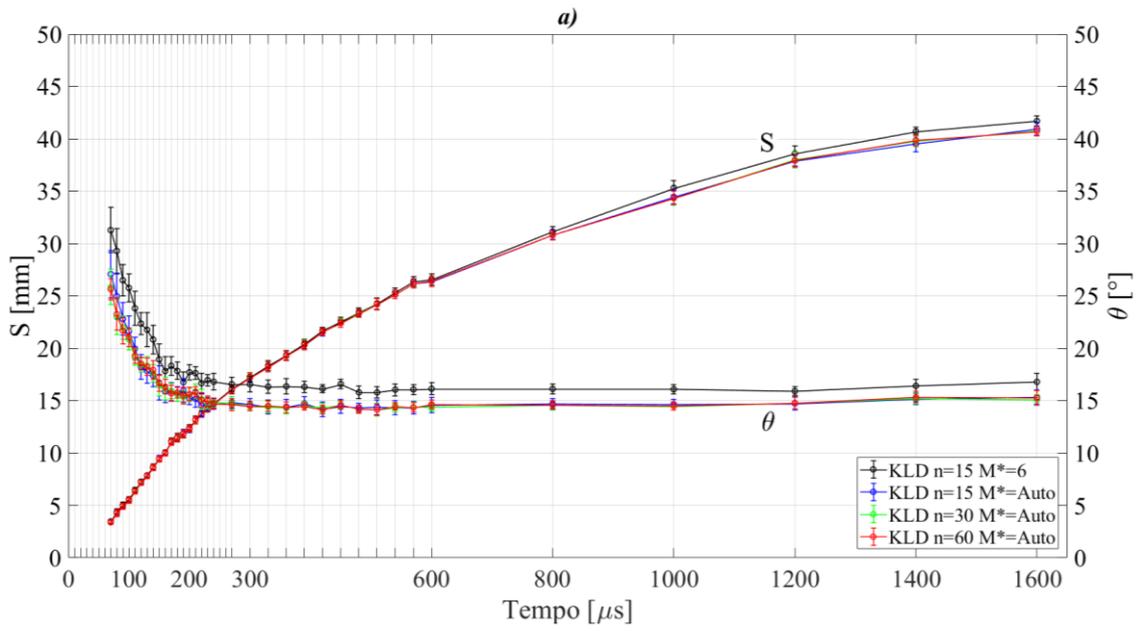


Figura 85 Test C: Influenza n e M*. a) Contorno Interno b) Contorno Esterno

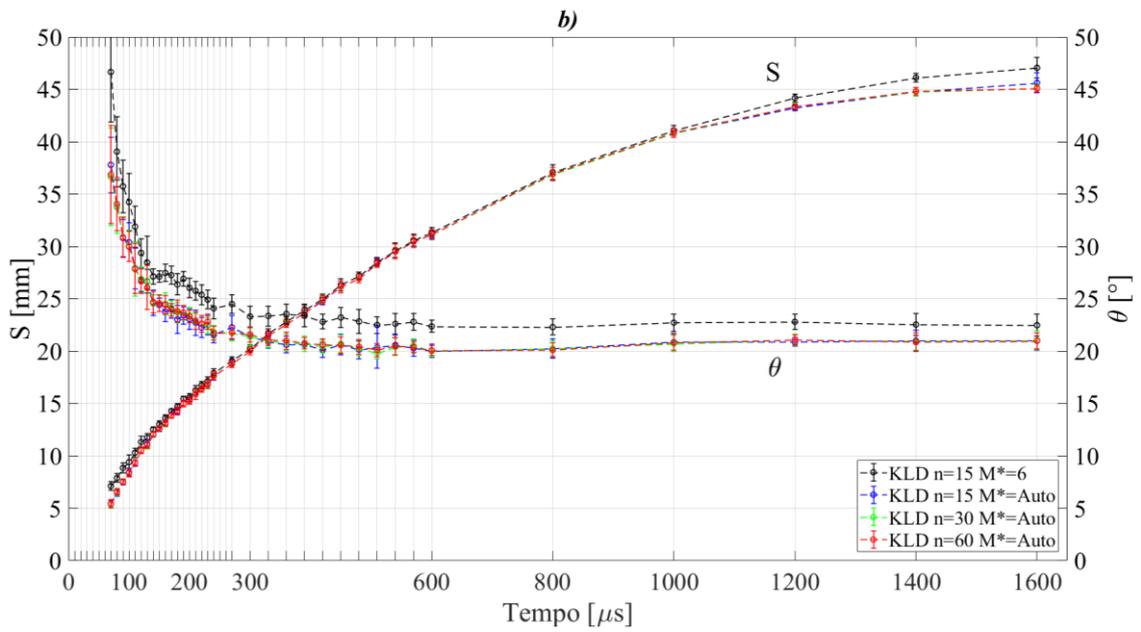
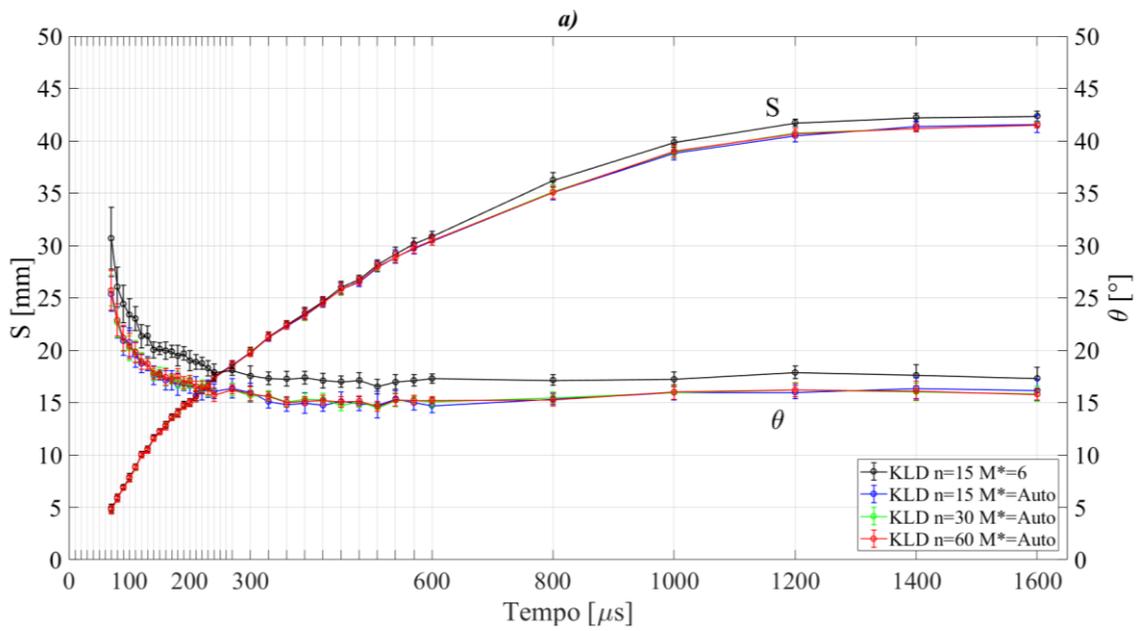


Figura 86 Test D: Influenza n e M^* . a) Contorno Interno b) Contorno Esterno

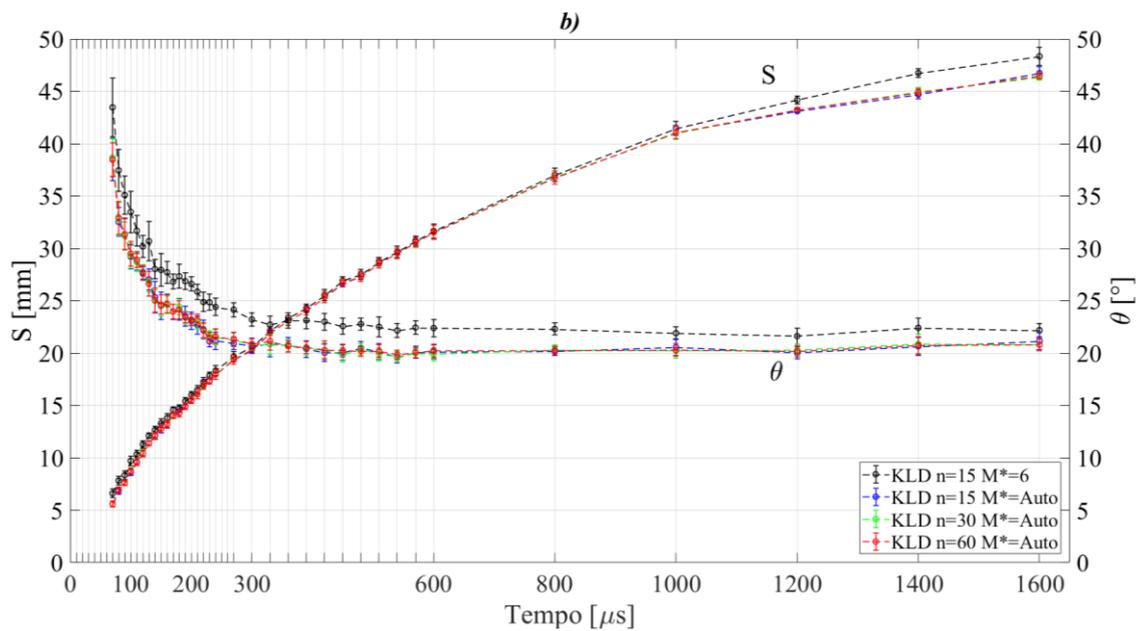
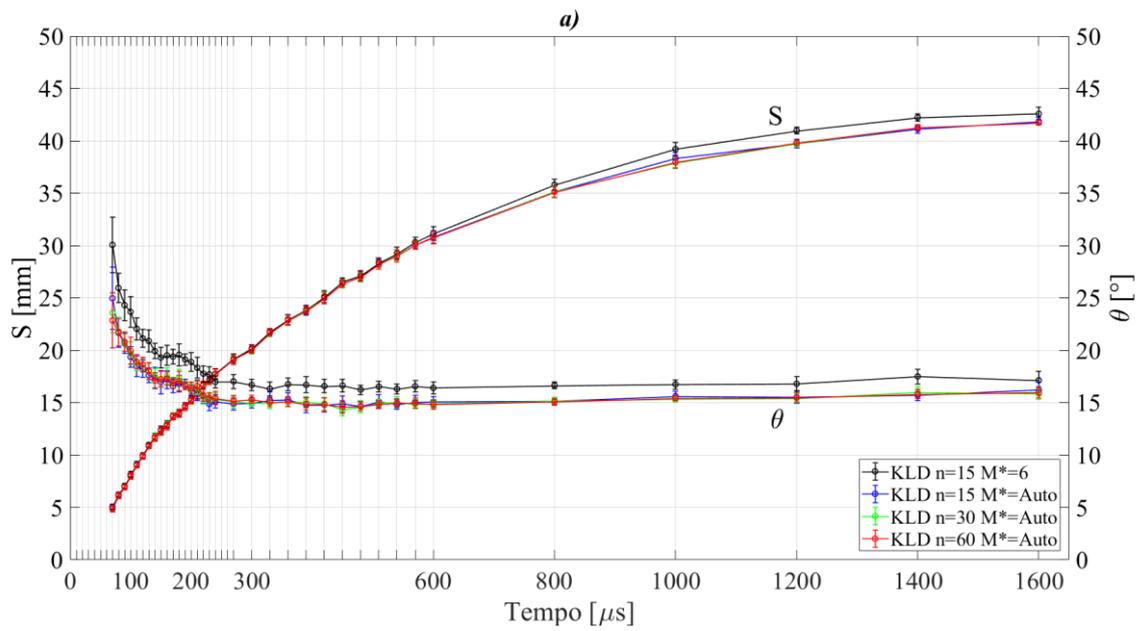


Figura 87 Test E: Influenza n e M^* . a) Contorno Interno b) Contorno Esterno

Sempre le Figure 83 – 87 evidenziano come il numero di immagini del database, crescendo da 15 a 60, non influenzi significativamente i valori di penetrazione ed angolo di diffusione ottenuti. Inoltre, passare da $n=15$ a 30 o 60 comporta un aumento dei tempi di analisi dell'intera sequenza temporale del 20% o del 66% rispettivamente, come mostrato in Figura 88.

Per le analisi successivamente riportate si è scelto quindi di fissare il numero di immagini soglia $n=15$ ed alla determinazione automatica del numero di autovalori $M^*=Auto$.

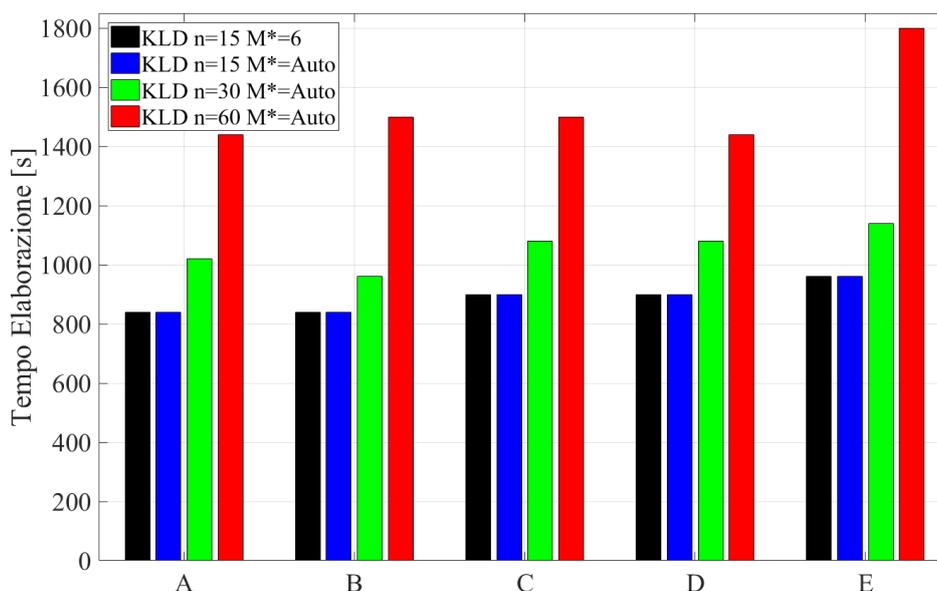


Figura 88 Tempi di elaborazione al variare di n e M^*

Va tuttavia sottolineato come il valore di 15 potrebbe essere figlio del setup sperimentale, in particolare del sistema di illuminamento. Per motivi tecnici non è stato possibile condurre una campagna sperimentale adottando illuminazioni diverse per valutare la sensibilità del metodo proposto a tale parametro. Tale attività sarà svolta in futuro. Nel caso questa dipendenza dovesse essere confermata, il metodo proposto sarebbe ugualmente applicabile, previa una campagna di test per determinarne il numero di immagini soglia minimo caratteristico del setup sperimentale utilizzabile anche per le successive analisi.

Confrontando i risultati relativi alla procedura con contorno interno ed esterno, si osserva che l'angolo di diffusione determinato con riferimento al contorno esterno tenda mediamente ad essere superiore del 25% rispetto a quello del contorno interno. La penetrazione, al contrario, esibisce una variazione minima tra i due contorni, e risulta leggermente più significativa agli istanti iniziali e finali dell'iniezione.

A titolo di esempio si riportano in Figura 89 le immagini degli spray relative a tre diversi istanti temporali per le condizioni di funzionamento A e D su cui sono stati sovrapposti i contorni interno ed esterno determinati. Osservando tali contorni si nota come il profilo interno tenda a sottostimare l'effettiva dimensione dello spray, mentre quello esterno, determinato tramite l'algoritmo di sogliatura modificato, ricalchi fedelmente il bordo del getto. È quindi questo il contorno da considerare per determinare il valore di penetrazione ed angolo di diffusione. Tuttavia, questa considerazione rimane di natura puramente qualitativa e per potersi pronunciare in merito alla correttezza del valore calcolato occorrerebbe associarsi ad una misura oggettiva quale, ad esempio, quella ottenuta dalla distribuzione spaziale della quantità di moto.

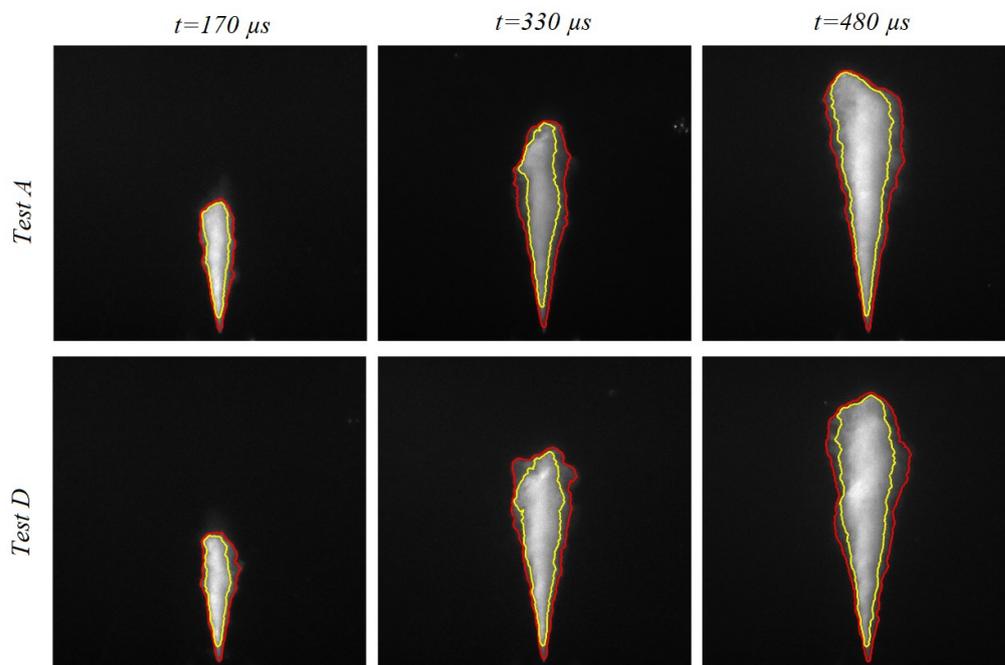


Figura 89 Confronto Contorno Interno ed Esterno

3.6.2 Confronto con metodo di Otsu e della Massima Entropia

Le immagini acquisite sono state analizzate mediante due dei principali metodi di sogliatura impiegati nel campo dell'analisi degli spray, ovvero il metodo di Otsu ed il metodo della Massima Entropia. Il metodo della Massima Entropia è stato applicato solo ai casi D ed E, in quanto eccessivamente oneroso dal punto di vista computazionale (circa 30 volte superiore) e che, come si vedrà, mal si presta all'analisi.

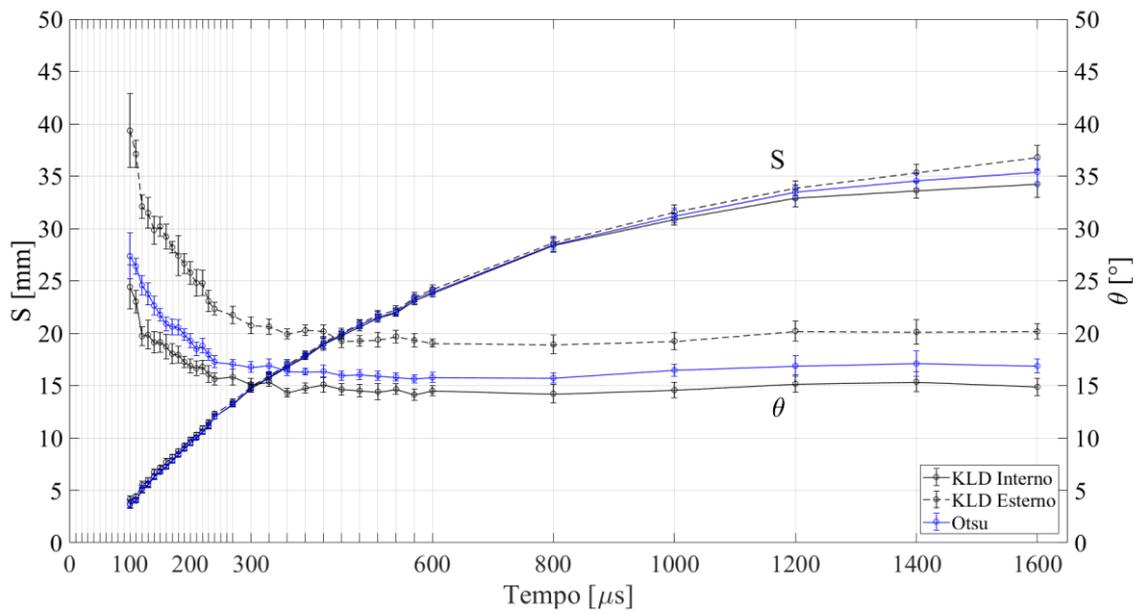


Figura 90 Test A. Confronto KLD – Otsu

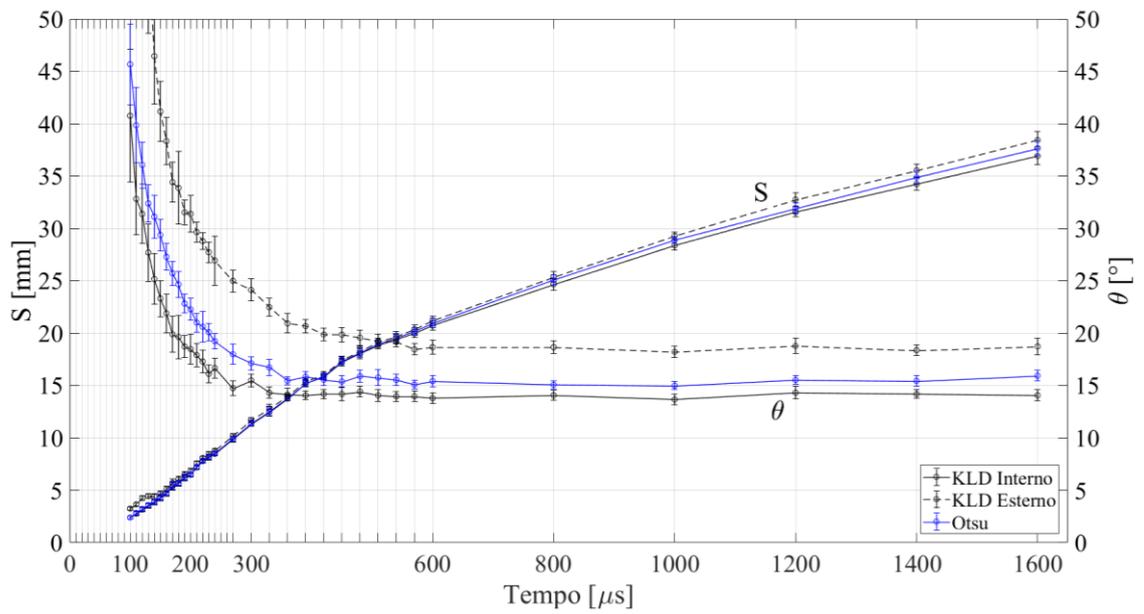


Figura 91 Test B. Confronto KLD – Otsu

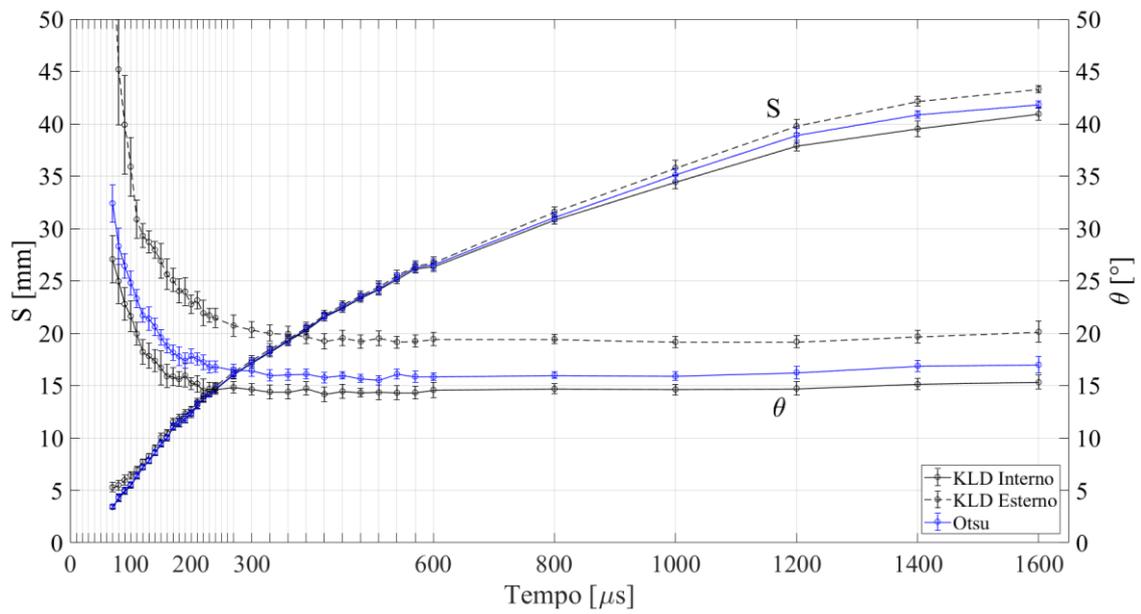


Figura 92 Test C. Confronto KLD – Otsu

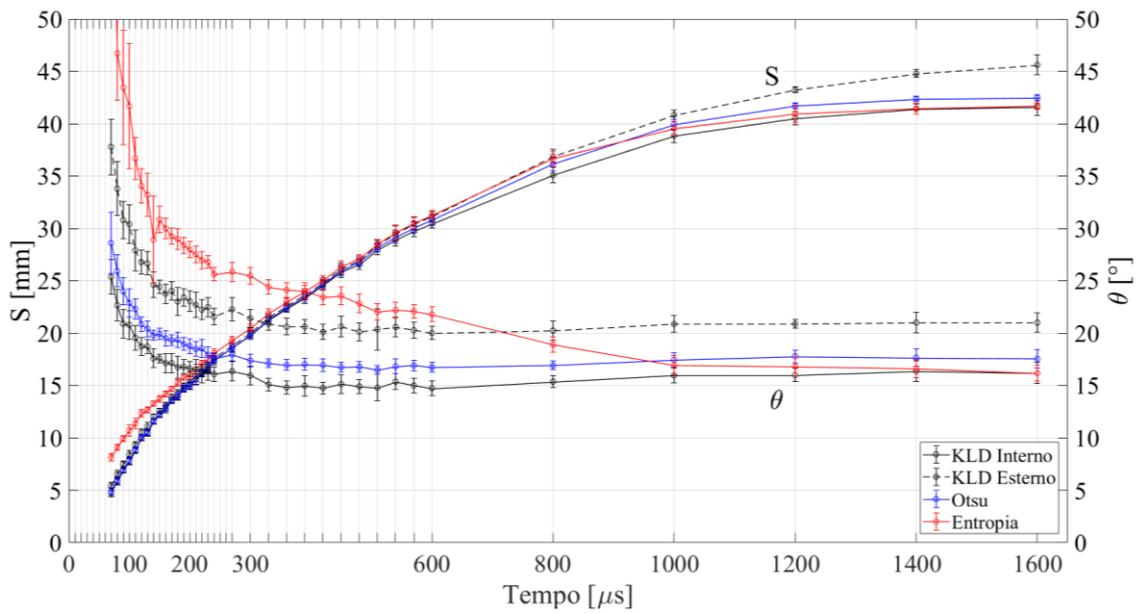


Figura 93 Test D. Confronto KLD – Otsu – Entropia

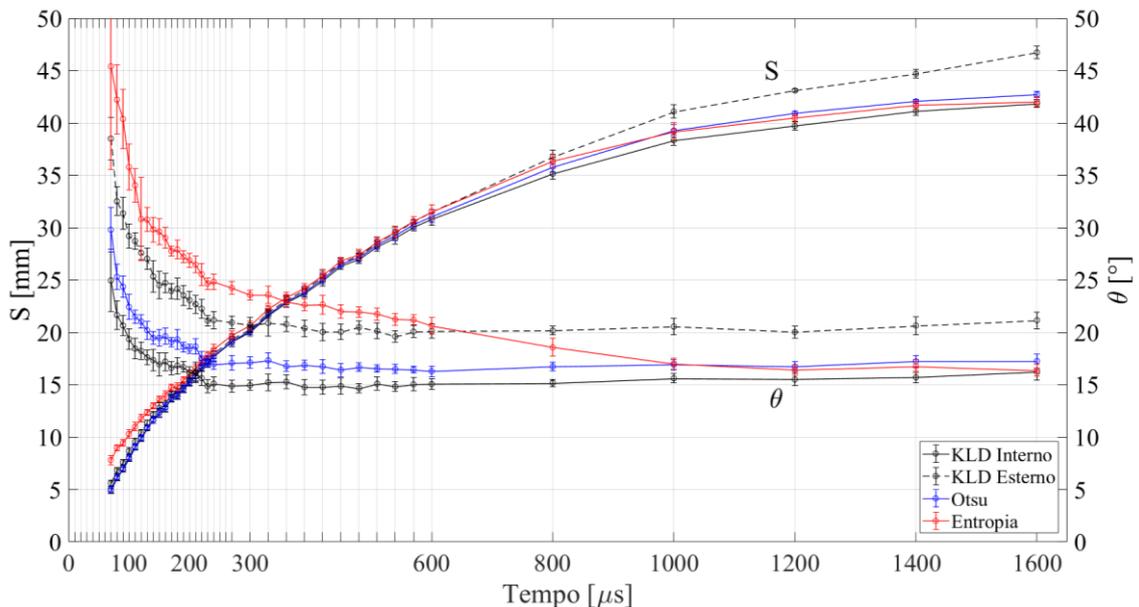


Figura 94 Test E. Confronto KLD – Otsu – Entropia

I risultati dei vari metodi (KLD con contorno interno ed esterno, Otsu e Massima Entropia) in termini di penetrazione ed angolo di diffusione sono riportati nelle Figure 90 – 94.

Osservando tali figure si osserva che:

- Metodo di Otsu fornisce:
 - valori dell'angolo di diffusione sempre intermedi tra quelli forniti dai metodi KLD;
 - valori di penetrazione confrontabili a quelli forniti del metodo KLD con contorno interno, dai quali differiscono, in tutte le condizioni analizzate, meno del 3%;
- Metodo KLD:
 - le differenze nei valori di penetrazione valutati con riferimento al contorno esterno ed interno, sono dell'ordine di grandezza dell'incertezza sperimentale nei primi istanti dell'evoluzione e sino a $600 \mu s$, per raggiungere differenze dell'ordine del 10% per tempi elevati ($1600 \mu s$);
- Metodo della Massima Entropia:
 - gli andamenti di penetrazione ed angolo di diffusione presentano un comportamento anomalo nei primi istanti dell'evoluzione, sino ai $600 \mu s$, se confrontati con quelli degli altri metodi;
 - per istanti successivi ai $600 \mu s$ l'andamento di penetrazione ad angolo di diffusione si allineano con quelli forniti dagli altri algoritmi.

La spiegazione del comportamento anomalo riscontrato con il metodo della Massima Entropia potrebbe derivare da un'eccessiva sensibilità della tecnica alle condizioni di illuminazione, benché preventivamente corretta, oppure alla riflessione della luce nella camera da parte dell'olio iniettato nelle precedenti iniezioni. A titolo di esempio si riporta in Figura 95 una elaborazione che evidenzia il malfunzionamento della tecnica.

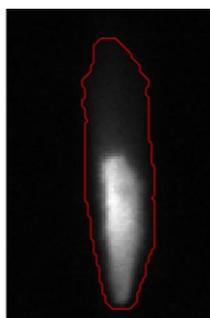


Figura 95 Metodo Massima Entropia. $t=70 \mu s$, Test D

3.6.4 Algoritmo KLD sintetico

Il metodo denominato KLD sintetico è stato impiegato per analizzare lo stesso set di immagini di spray precedentemente analizzato con gli altri metodi. I risultati ottenuti sono quindi stati confrontati con quelli forniti dai metodi KLD con contorno interno ed esterno. Le Figure 97 – 101 riportano tale confronto.

Osservando i valori di penetrazione si nota come l'andamento fornito dall'algoritmo sintetico (in rosso) sia sovrapposto a quello fornito dal metodo KLD con contorno esterno (linea a tratti) per tutte le condizioni di prova.

Per quanto riguarda l'angolo di diffusione, l'andamento ottenuto ricalca quello relativo al metodo KLD con contorno esterno tra i $270 \mu s$ e i $1600 \mu s$ con un valor medio mediamente superiore a questo del 4%.

È molto interessante osservare l'andamento dell'angolo di diffusione fornito dal metodo KLD sintetico nei primi istanti (tempi inferiori ai $270 \mu s$). Esso, infatti, presenta un andamento diverso da tutti gli altri metodi (KLD con contorno interno/esterno, Otsu e Massima Entropia). Questo perché i vari algoritmi implementati producono nei primi istanti dell'iniezione dei contorni di spray per cui è molto difficile definire un relativo angolo di diffusione, mentre mediante la tecnica KLD sintetica la forma conica del getto, visivamente facilmente distinguibile, è individuata già nelle prime fasi dell'evoluzione (Figura 81 e 96).

Il vantaggio principale dell'algoritmo KLD sintetico è quello di rendere confrontabili set di dati ottenuti da esperimenti diversi essendo sufficiente impiegare nell'analisi la stessa base di autovettori. Ovviamente, il requisito fondamentale rimane sempre quello che le dimensioni delle immagini di spray siano le medesime.

È doveroso osservare che la tecnica così come proposta non è in grado di operare con spray asimmetrici o con direzioni dell'evoluzione non concordi a quella delle immagini sintetiche. Questo, ovviamente, perché il database di immagini artificiali non contempla tale caratteristica.

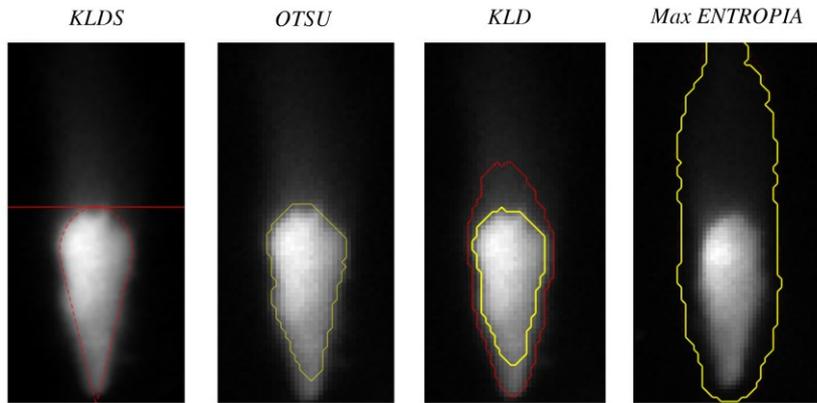


Figura 96 Confronto degli algoritmi nei primi istanti di iniezione

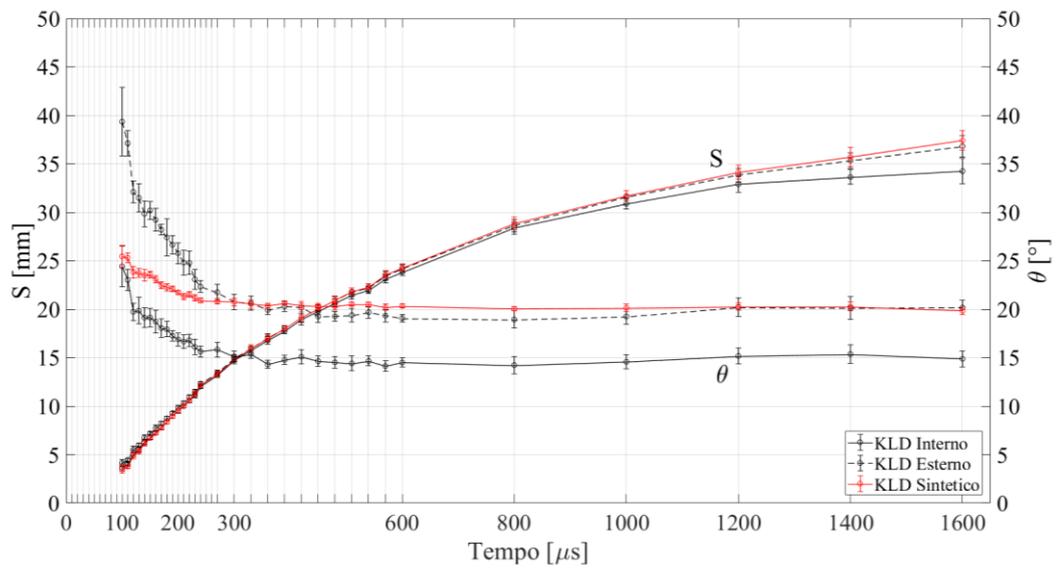


Figura 97 Test A. Confronto KLD e KLD Sintetico

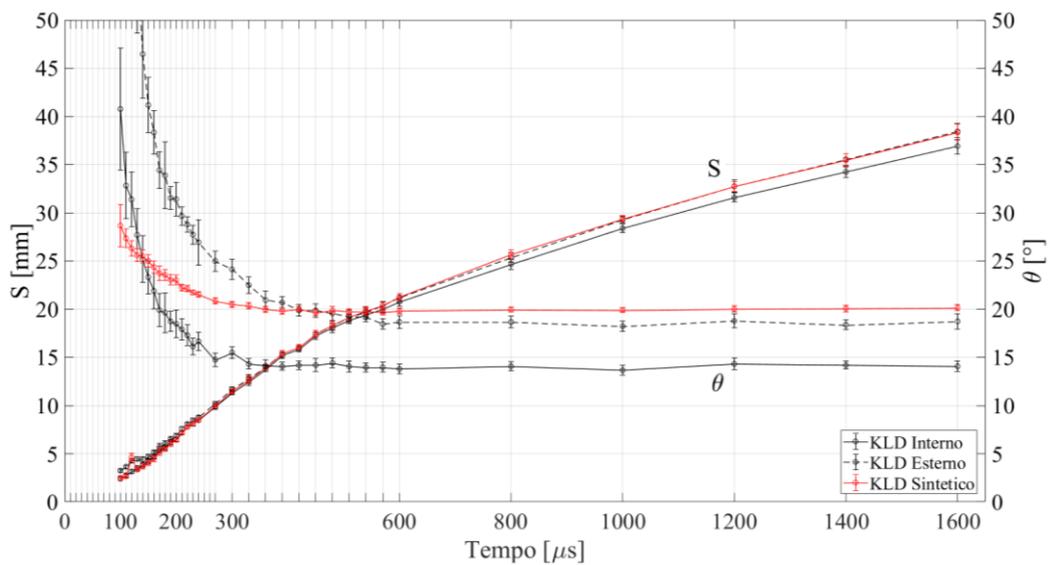


Figura 98 Test B. Confronto KLD e KLD Sintetico

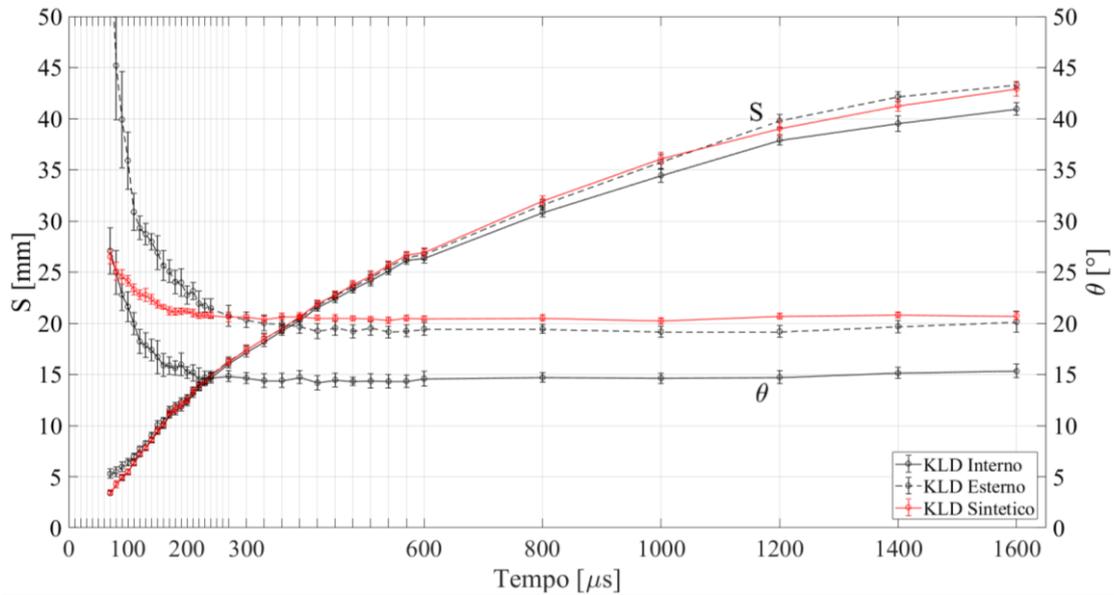


Figura 99 Test C. Confronto KLD e KLD Sintetico

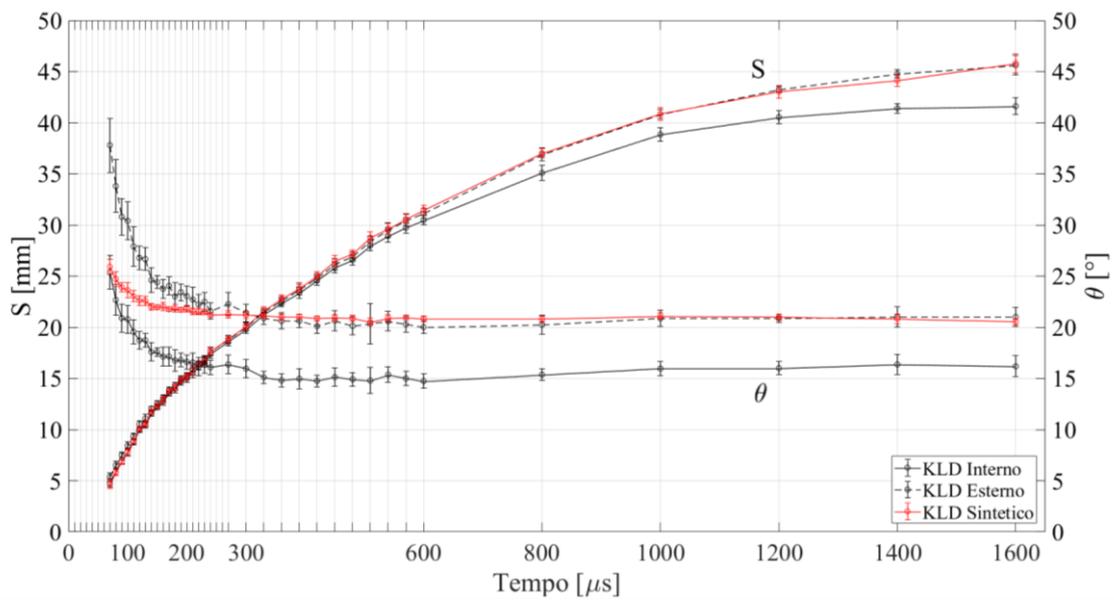


Figura 100 Test D. Confronto KLD e KLD Sintetico

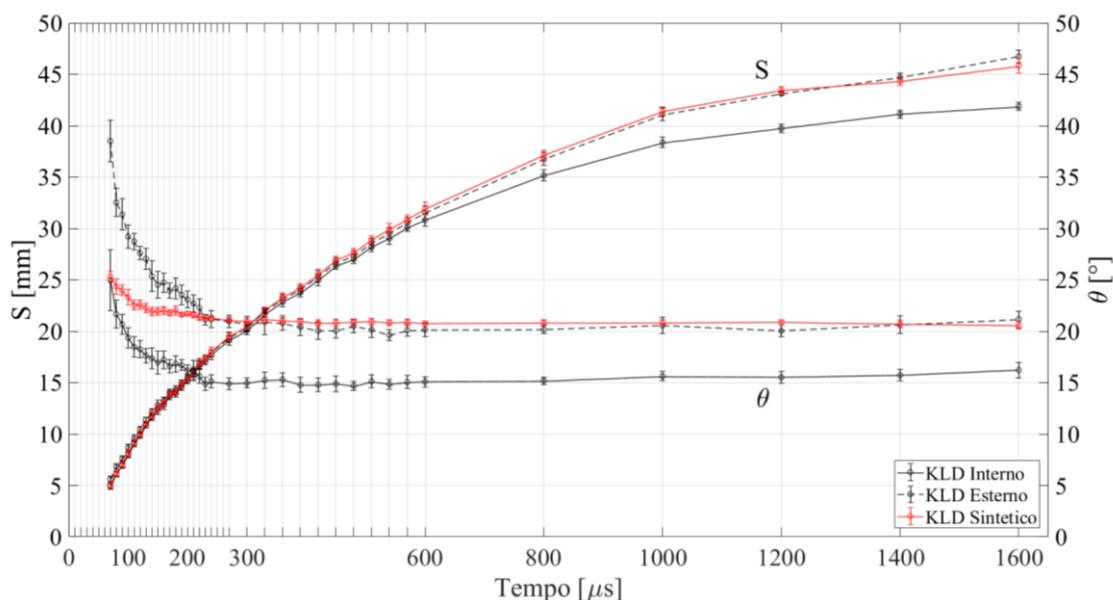


Figura 101 Test E. Confronto KLD e KLD Sintetico

3.7 Conclusioni e sviluppi futuri

In questa seconda parte sono stati analizzate le criticità comuni alle principali tecniche adottate per l'estrazione delle caratteristiche macroscopiche degli spray a partire da immagini ottenute mediante la tecnica della visualizzazione diretta.

L'algoritmo KLD di sogliatura proposto in [67] è stato criticamente analizzato ed una sua versione modificata proposta e testata elaborando le immagini di spray automobilistici relative a 5 condizioni operative. È stato evidenziato come la versione originale dell'algoritmo producesse un contorno sottostimato dello spray. Nella nuova versione è stato determinato un secondo contorno, definito esterno, che risulta essere quello visivamente più vicino all'effettivo bordo del getto. Al fine di eliminare tutte le soggettività del metodo è stato introdotto un criterio per stabilire in modo dinamico il numero di direzioni principali da impiegare nell'analisi. Se tale parametro fosse lasciato fisso si avrebbe una sovrastima del contorno dello spray. È stato inoltre mostrato come il numero di immagini soglia non influenza gli andamenti di penetrazione ed angolo di diffusione e che questo può essere mantenuto pari ad un valore minimo la cui entità potrebbe tuttavia essere figlia del setup sperimentale. Occorrerebbe pertanto testare tale parametro utilizzando sorgenti di illuminazione differenti.

È stato presentato e testato un nuovo algoritmo, definito KLD sintetico. Questo algoritmo prevede la generazione di un database artificiale con cui condurre l'analisi delle immagini e questo rappresenta il principale punto di forza di questa tecnica rendendo confrontabili dati di setup differenti. Sulla base dell'analisi visiva dei contorni determinati, la soluzione esposta permette di analizzare gli spray anche nelle primissime fasi dell'iniezione dove le

altre tecniche tendono a fornire valori di angolo di diffusione del getto eccessivi. Questo algoritmo, nella sua versione attuale, non consente di gestire spray asimmetrici, il che rappresenta una limitazione da eliminare con il suo sviluppo.

Tutti gli algoritmi proposti sono stati confrontati con i metodi di Otsu e della Massima Entropia che rappresentano due tra le principali soluzioni impiegate per la sogliatura delle immagini. L'analisi visiva del bordo del getto valutato mediante l'algoritmo KLD modificato è il più vicino all'effettivo contorno del getto. Tuttavia, non è possibile stabilire quale degli algoritmi fornisca la misurazione maggiormente corretta dell'angolo di diffusione. La soluzione potrebbe essere quella di confrontare il risultato delle tecniche ottiche con quello ottenibile dalla misura meccanica della quantità di moto. Attività, questa, attualmente da completare.

Infine, si è evidenziato come tipicamente le tecniche di sogliatura non siano in grado di gestire pattern di illuminazione difformi ed un'adeguata preelaborazione dell'immagine sia indispensabile. Per valutare le potenzialità degli algoritmi occorrerebbe effettuare le analisi in condizioni di illuminazione diverse, impiegando sorgenti di diverso tipo e pattern difformi.

Partendo da queste considerazioni si è deciso di realizzare un banco sperimentale, che sarà brevemente descritto nel Capitolo 4, per l'analisi ottica di spray diesel in grado di consentire un'analisi combinata delle tecniche ottiche con la tecnica SMSA e permetta di testare diverse sorgenti luminose e diversi pattern di illuminazione.

Nomenclatura

Abbreviazioni

CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CR	Common-Rail
ET	Tempo di Energizzazione
FPS	Fotogrammi Per Secondo
KLD	Decomposizione di Loeve-Karhunen (Karhunen Loeve Decomposition)
LED	Light Emitter Diod
LRT	Test della massima verosimiglianza (Likelihood Ratio Test)
PCA	Analisi delle component principali (Principal Component Analysis)

Simboli

\wedge	Prodotto logico
\neg	Negazione logica
\mathbf{B}	Matrice di covarianza ridotta
\mathbf{C}	Matrice di covarianza
\mathbf{D}	Matrice deviazione
h	Altezza dell'immagine in pixel
M	Numero di autovalori non nulli di \mathbf{B}
M^*	Set ridotto di direzioni principali (numero di autovalori-autovettori per determinazione base)
n	Numero di immagini binarie (immagini soglia)
N	Numero di pixel dell'immagine
p	Pressione
S	Penetrazione
T	Intensità del pixel di soglia
t	tempo
x,y	Coordinate cartesiane del pixel
l	Larghezza dell'immagine in pixel
\mathbf{e}, \mathbf{v}	Autovettore
$S(M)$	Somma cumulata normalizzata degli M autovalori di \mathbf{B}

δ	Distanza euclidea immagine originale e soglia proiettate sulla base
θ	Angolo di diffusione
λ, μ	Autovalore
σ	Deviazione standard
φ	Immagine digitale sogliata
ψ	Immagine digitale
ω	Vettore deviazione

Pedici

m	Main
r	Rail

Apici

T	Trasposto
-----	-----------

Simboli sovrascritti

—	Immagine media
^	Immagine ricostruita
~	Immagine risultato di & logico tra immagine soglia interna negata e immagine originale

Capitolo 4

**Apparato Sperimentale per l'analisi ottica di
spray diesel**

4.1 Introduzione

Nel seguente capitolo viene brevemente descritta la struttura sperimentale realizzata per l'analisi ottica di spray diesel. Il banco è stato ottimizzato per l'implementazione della tecnica definita cinematografia ad alta velocità; tuttavia, il banco è stato realizzato in modo che anche l'approccio fotografico potesse essere agevolmente implementato, prevedendo l'impiego dell'illuminazione tipica di questa tecnica. La progettazione del banco è stata effettuata avendo come scopo principale il confronto dei diversi algoritmi di elaborazione al variare delle condizioni di illuminazione, inoltre, nella definizione delle caratteristiche della camera di iniezione, si è fatto in modo che lo stesso apparato potesse essere impiegato anche per condurre l'analisi SMSA, permettendone uno studio combinato sia ottico sia meccanico. Infine, la taglia dell'apparato è stata ottimizzata con esplicito riferimento ad iniettori CR per motori DF navali.

L'apparato è costituito da una camera di iniezione, pressurizzata mediante un inerte per replicare le condizioni di densità in camera di combustione caratteristiche del funzionamento del motore, da un sistema di ricircolo per la separazione dell'olio iniettato dal gas di pressurizzazione e, infine, di un sistema di illuminamento LED realizzato su misura. L'apparato permette l'analisi a temperatura ambiente, ovvero in condizioni non evaporative.

4.2 Analisi preliminari

Le immagini elaborate nel capitolo precedente sono state ottenute isolando un singolo spray mediante un'opportuna capsula applicata al polverizzatore. Tale scelta è da ritenersi pressoché obbligata dovendo, in tale setup, impiegare un'illuminazione laterale [67]. Questa soluzione preclude l'analisi d'insieme degli spray attraverso la quale valutare l'uniformità della rosa dei getti. Questa analisi di insieme è, tuttavia, di primaria importanza volendo analizzare le prestazioni dell'iniettore oggetto di test. L'apparato sperimentale che si vuole realizzare deve consentire, pertanto, sia un'analisi dell'intera rosa che del singolo spray, nell'intero campo di lavoro, ovvero dalle piccole iniezioni pilota alle iniezioni "tutto aperto". Occorre, pertanto, preliminarmente individuare le caratteristiche delle iniezioni che si intende analizzare nel detto campo di lavoro per poter da queste determinare le specifiche del banco.

Considerando la tipologia di iniettori di interesse si possono individuare i seguenti estremi caratteristici di funzionamento:

- le iniezioni pilota potranno avere durate comprese tra $500 \div 800 \mu s$;
- le iniezioni relative al funzionamento in solo diesel in un punto a pieno carico, possono durare $7000 \div 8000 \mu s$;
- pressioni di iniezione variabili tra $140 MPa$ e $220 MPa$;
- gli iniettori potranno avere polverizzatori con un numero di fori compreso tra 7 e 10 e dal diametro variabile tra $0.25 \div 0.44 mm$.

4.2.1 Stima dell'area d'indagine

Innanzitutto, occorre stimare l'area di indagine da visualizzare nell'analisi degli spray, in modo da definire la dimensione di massima della camera di iniezione e degli accessi ottici da impiegare. Non solo, tale parametro è di fondamentale importanza in quanto determina la risoluzione spaziale ottenibile nelle immagini, per un dato sistema ottico, definito da videocamera, obiettivo fotografico e distanza del piano focale visualizzato.

La stima è effettuata considerando un semplice modello di penetrazione [69] tra quelli reperibili in letteratura, che coinvolge unicamente i dati disponibili in questa fase preliminare.

$$S = d_o^{0.307} p_r^{0.262} \rho_g^{-0.406} t^{0.568} \quad (31)$$

dove:

- S la penetrazione [m];
- d_o è il diametro del foro del polverizzatore [m];
- p_r la pressione di alimentazione [Pa];
- ρ_g la densità del gas in cui si realizza l'iniezione [kg/m^3];
- t il tempo [s].

La densità del gas presente all'interno della camera di iniezione deve essere rappresentativa della densità che si realizza in camera di combustione durante il funzionamento del motore ad accensione per compressione, e può variare tra 20÷50 kg/m^3 [92]. L'analisi viene condotta in condizioni non evaporative, pertanto, le prove sono realizzate a temperatura ambiente, inoltre le condizioni di densità della camera sono ottenute impiegando un inerte in modo da impedire l'innescarsi della combustione. In particolare, verrà impiegato l'esaffluoruro di Zolfo (SF_6). Questo gas inerte, vista la densità di 6.164 kg/m^3 in condizioni ambiente, permette una pressurizzazione della camera a valori variabili tra 0.35 e 0.9 MPa , notevolmente inferiori a quelli di reale esercizio in camera di combustione. L'iniettore sarà alimentato mediante olio per calibrazione dei sistemi di iniezione diesel (ISO 4113).

Applicando il modello di penetrazione ai dati di funzionamento del sistema di iniezione considerati, ne conseguono due andamenti estremi:

- penetrazioni ridotte, ottenute quando si considera il diametro del foro più piccolo, $d_o = 0.25 \text{ mm}$, la pressione di alimentazione inferiore, $p_r = 140 \text{ MPa}$, e la densità in camera maggiore $\rho_g = 50 \text{ kg/m}^3$.
- penetrazioni estreme, ottenute in presenza dei fori di diametro maggiore, $d_o = 0.44 \text{ mm}$, la pressione di alimentazione maggiore $p_r = 220 \text{ MPa}$, e la densità del gas in camera inferiore $\rho_g = 20 \text{ kg/m}^3$.

In Figura 102 sono riportate le leggi di penetrazione ottenute impiegando il modello dell'Equazione 31. La condizione più restrittiva da considerare in questa fase preliminare è quella di massima penetrazione, la quale, vincola la dimensione minima della camera e del

setup ottico. Si avranno pertanto penetrazioni massime di circa 75 mm nel caso pilota (durate evidenziate dall'area in grigio) ovvero di 250 mm considerando il caso "tutto aperto".

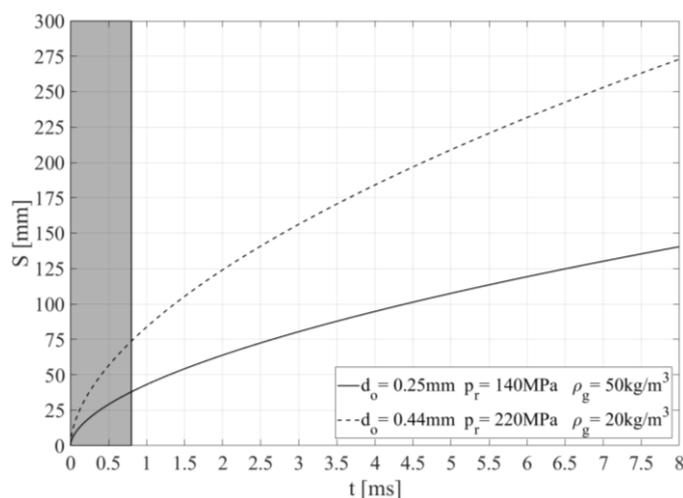


Figura 102 Stima della penetrazione (Equazione 31)

Per quanto riguarda quest'ultimo caso, tuttavia, va considerato che in un'iniezione reale, ove si assiste all'evaporazione e combustione del combustibile, la durata di effettivo interesse risulta inferiore alla durata complessiva del fenomeno di iniezione. Studi specifici effettuati dai produttori riguardanti gli iniettori considerati, hanno evidenziato come in condizioni di temperatura prossime a quelle di funzionamento, per un'iniezione completa, si assista all'evaporazione del getto entro distanze di circa 60 mm .

Volendo comunque mantenere un campo di indagine esteso, sulla base del modello di penetrazione utilizzato, considerando durate di interesse di 3 ms si ottiene un diametro massimo dell'area di indagine pari a circa 300 mm .

4.2.2 Definizione requisiti videocamera

Stabilita la massima dimensione dell'area soggetta ad analisi occorre definire i requisiti minimi che dovrà possedere la videocamera ad alta velocità cercando il miglior compromesso tra dimensione dell'area visualizzata, frequenza di acquisizione e più piccolo dettaglio visibile.

Supponendo di voler effettuare 25 fotogrammi nella durata dell'iniezione pilota, ovvero nel tempo medio di circa $650\mu\text{s}$, occorre una frequenza di acquisizione di almeno 40 kFPS. Come già sottolineato le videocamere capaci di gestire tale quantità di dati scendono a compromessi con il numero di pixel dell'immagine, che viene drasticamente ridotta all'aumentare della frequenza di acquisizione. Il più piccolo dettaglio visibile accettabile, ovvero la risoluzione ottenibile nell'immagine, sarà figlio del setup ottico realizzato quindi dell'insieme di videocamera, ottica fotografica e distanza del piano focale.

Un effetto da tenere in particolare considerazione, quando si intende visualizzare fenomeni così rapidi come gli spray diesel, è l'effetto di sfocatura. Tale effetto deve essere minimizzato mediante un tempo di esposizione il più ridotto possibile. Dalla Figura 102 si evidenzia come lo spray percorra circa 80 mm in 1 ms , ovvero presenta una velocità media

di 80 m/s. Volendo stimare dal modello di penetrazione la velocità, come derivata di questo, si ottengono velocità variabili tra i 300 m/s e circa i 30 m/s (Figura 103).

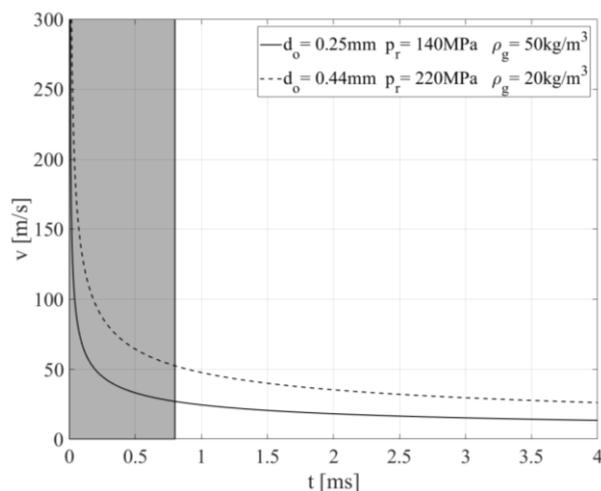


Figura 103 Velocità stimata del fronte dello spray

Attraverso il tempo di esposizione occorre fare in modo che lo spray venga “congelato” in tale frangente così da limitare la sfocatura, idealmente contenendola entro il dettaglio visibile, ovvero entro il pixel, annullandola. La situazione maggiormente critica è quindi nella primissima fase ove si hanno le velocità maggiori. In Figura 104 sono riportati i valori di sfocatura, intesi come distanza del fronte dello spray percorsa nel tempo di esposizione, per diverse condizioni di ripresa immagine.

Accettando, per esempio, un più piccolo dettaglio visibile di 150 μm , si nota che con tempi di esposizione inferiori a 1 μs , ad eccezione dei primissimi istanti dell’iniezione, la distanza percorsa dallo spray rimane entro il pixel, annullando la sfocatura.

Va sottolineato come queste analisi preliminari non permettano per ora di stabilire le effettive prestazioni con le quali effettuare le acquisizioni, ma ne stabiliscono i requisiti minimi necessari ad un corretto studio.

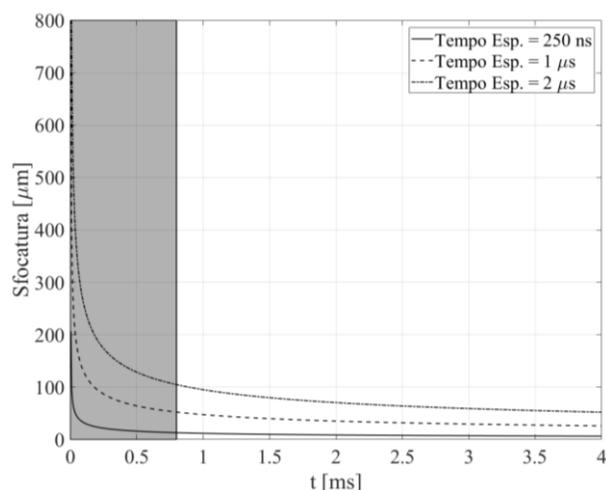


Figura 104 Sfocatura vs. tempo di esposizione

4.3 Apparato Sperimentale

4.3.1 Camera di iniezione

Le dimensioni della camera di iniezione sono state definite, in modo tale da evitare, innanzitutto, ogni limitazione geometrica all'evoluzione dello spray. Inoltre, come detto, la camera è pensata per accogliere al suo interno il sistema di movimentazione del sensore SMSA descritto nel Capitolo 2.

La camera è progettata per essere pressurizzata fino a 1 MPa e presenta un diametro interno di 490 mm ed uno spessore parete di 10 mm . Sono stati inoltre realizzati sulla superficie cilindrica 4 accessi ottici del diametro utile di 100 mm disposti a 90° per poter realizzare illuminazioni esterne o condurre analisi ottiche con illuminazione laterale (Figura 105). Un porta-iniettori intercambiabile permette di testare iniettori diversi. L'accesso ottico attraverso cui effettuare le riprese è posizionato frontalmente all'iniettore, a circa 350 mm dal piano focale medio dell'immagine, ed ha anch'esso diametro utile di 100 mm .

La parete della camera retrostante l'iniettore, ovvero la parete che costituirà lo sfondo delle immagini, è stata rivestita mediante un trattamento antiriflesso, costituito da una verniciatura nera opaca contenente polvere di quarzo in modo da rendere la superficie ruvida e produrre uno scatter della luce incidente, eliminando riflessi indesiderati.

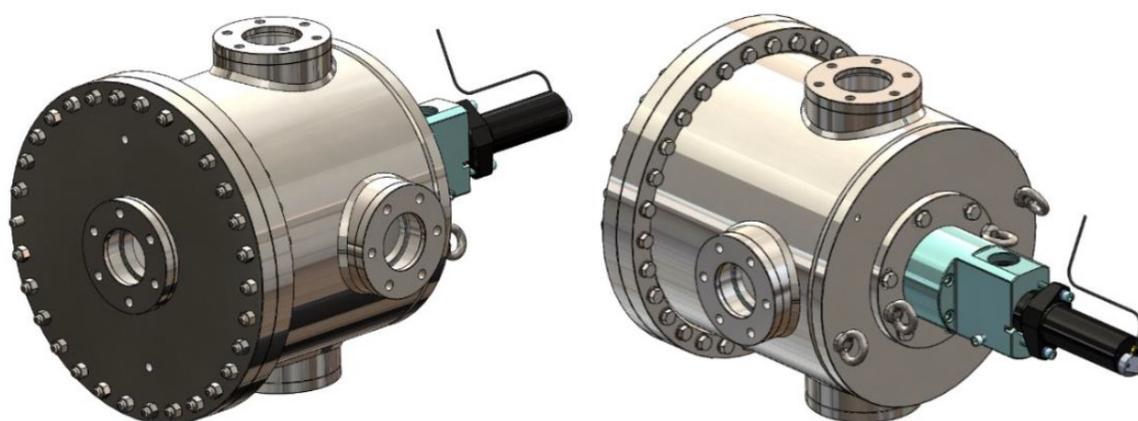


Figura 105 Modello 3D Camera di iniezione

Gli accessi ottici sono realizzati in vetro borosilicato (BK7) dello spessore di 35 mm . In Figura 106 è riportata la curva di trasmissione τ del vetro ottico impiegato (in linea a tratti), contemporaneamente agli spettri della radiazione luminosa di tre possibili sorgenti (Xenon, LED, Laser verde) normalizzati ciascuno al proprio massimo. Analizzando questa figura si nota come la radiazione luminosa con lunghezza d'onda inferiore a 300 nm venga completamente assorbita dal BK7. Pertanto, l'energia emessa dalla sorgente LED e Laser ($\lambda = 532\text{ nm}$), collocandosi a lunghezze d'onda superiori, non viene assorbita. Per quanto riguarda la sorgente Xenon, invece, sarà trasmesso unicamente il contenuto oltre i 400 nm .

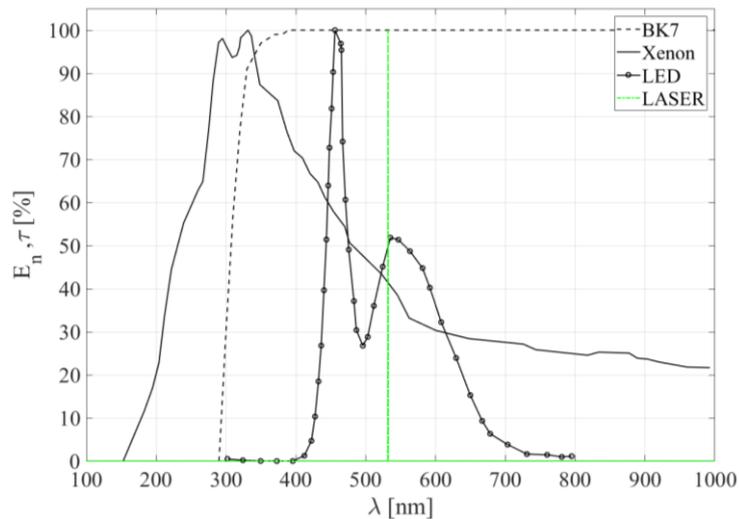


Figura 106 Contenuto spettrale sorgenti luminose e curva di trasmissione BK7

4.3.2 Sistema di alimentazione olio

La pressurizzazione dell'olio di iniezione (ISO 4113) è realizzata mediante una pompa a doppia azione azionata ad aria (*Maximator M189D*) riportata in Figura 107 (a). La pompa presenta un rapporto di moltiplicazione di 1:220 e può essere alimentata con aria fino a 1MPa, ovvero consentire pressioni di alimentazione dell'iniettore fino a 220 MPa. La pompa è in grado di fornire una portata d'olio di circa 0.1 l/min alla pressione massima, consentendo, frequenze di iniezione di circa un'iniezione al secondo quando si impiegano gli iniettori della taglia più grande. La pressione di alimentazione è controllata agendo sull'alimentazione dell'aria attraverso una valvola proporzionale (b).

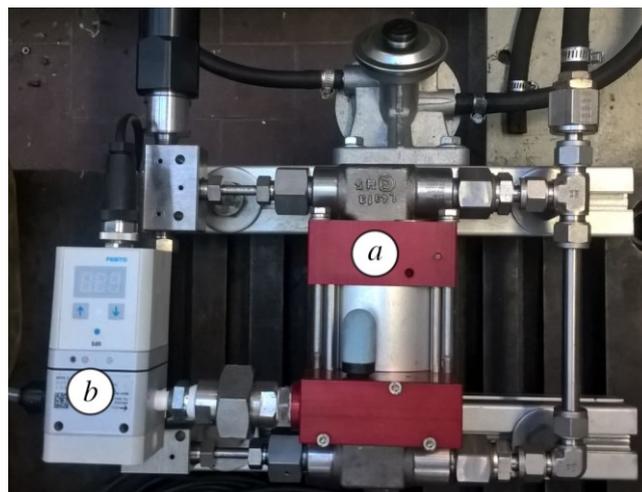


Figura 107 Sistema di alimentazione
a) Pompa di alimentazione b) Valvola proporzionale

4.3.3 Sistema illuminamento LED

La sorgente luminosa da impiegare nell'analisi fotografica deve, innanzitutto, garantire un illuminamento sufficiente alla corretta acquisizione delle immagini e, inoltre, deve illuminare uniformemente tutta l'area di interesse. Come visto, un pattern di illuminazione non uniforme può condizionare fortemente l'operazione di analisi. Tale effetto può essere corretto mediante un'opportuna preelaborazione delle immagini, ma è preferibile minimizzare la necessità di correzione non essendo questa sempre attuabile od ottimale. Un corretto algoritmo di analisi, inoltre, dovrebbe essere indipendente da tali condizioni sperimentali.

Nella totalità degli studi di spray diesel reperibili in letteratura, l'illuminazione è collocata esternamente alla camera di iniezione e, nella maggior parte dei casi, gli spray sono illuminati attraverso accessi ottici disposti lateralmente. Talvolta, l'illuminazione è realizzata frontalmente, sfruttando lo stesso accesso usato per la ripresa, ma, in entrambi i casi, non si è in grado di ottenere un pattern d'illuminazione omogeneo. Per questo motivo, nel setup proposto, oltre a prevedere gli accessi ottici laterali per impiegare un'illuminazione esterna, si è deciso di posizionare la sorgente luminosa all'interno della camera di iniezione.

L'illuminazione è stata realizzata mediante 8 led della potenza di 50 W ciascuno e temperatura di colore di 5000 K . I led sono disposti a formare un anello (Figura 108) e collegati ad un sistema modulare che permette di variare l'inclinazione dei piani di illuminazione dei LED. Nella soluzione riportata in Figura 108 e Figura 109, l'inclinazione dei blocchetti è tale da sovrapporre gli angoli di emissione in modo uniforme e concentrarli nella zona di interesse.

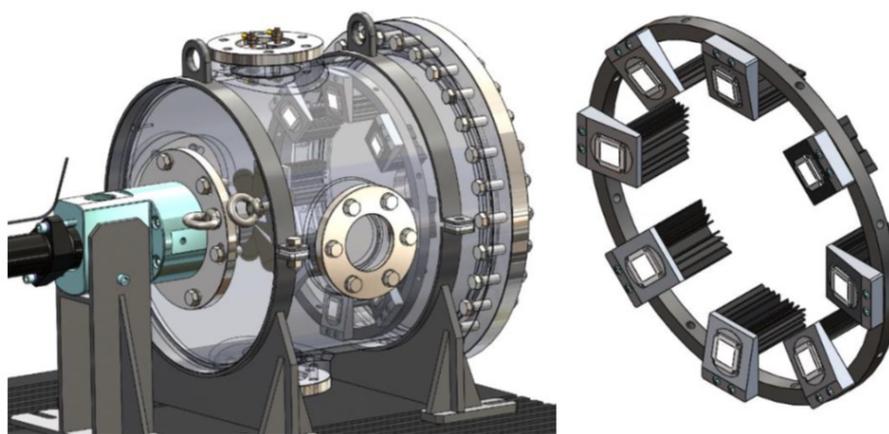


Figura 108 Modello 3D della camera e del sistema di illuminamento



Figura 109 Anello LED realizzato

L'intensità luminosa di un led è proporzionale alla corrente che lo attraversa. Modulando quindi la tensione di alimentazione è possibile variare l'intensità di corrente e quindi l'intensità luminosa. Tipicamente questo controllo è effettuato mediante una tecnica digitale conosciuta come PWM (*Pulse-Width Modulation*). Secondo questa tecnica, la tensione di alimentazione può assumere due soli stati, corrispondenti al valore massimo o a zero. Il dispositivo viene quindi alimentato con un segnale di tensione ad onde quadre a frequenza fissa, variandone il *duty-cycle*, ovvero l'intervallo di tempo nel periodo entro cui la tensione è massima. Ne risulta quindi un valor medio efficace di tensione ai capi del led proporzionale da *duty-cycle*. Nell'applicazione in esame la frequenza di acquisizione dei fotogrammi è confrontabile con la frequenza di modulazione del segnale di tensione tipica di un controllo in PWM. Pertanto questa soluzione non è praticabile, in quanto la videocamera coglierebbe le fluttuazioni dell'illuminazione conseguenti alla modulazione. Per questo motivo si è scelto di controllare i led in modo continuo realizzando un circuito di alimentazione ad hoc.

È stato realizzato un dispositivo di controllo capace di controllare indipendentemente ciascuno degli 8 led. In questo modo, innanzitutto, è possibile bilanciare eventuali differenze di intensità luminosa dovute alla variabilità delle specifiche delle singole componenti elettroniche impiegate nella realizzazione dei circuiti, ma soprattutto, è possibile creare pattern di illuminazione diversi per testare i diversi algoritmi di analisi delle immagini.

Il controller realizzato è riportato in Figura 110. Mediante questo controller è possibile gestire due anelli di 8 led ciascuno. L'interfaccia presenta per ogni led posto all'interno della camera un corrispondente led RGB la cui colorazione è proporzionale all'intensità della luce emessa dal led interno. Il livello di intensità luminosa è impostato attraverso il controller e i led RGB forniscono all'operatore una visualizzazione diretta del pattern realizzato.

Sono state previste tre diverse modalità operative: *illuminazione continua*, *trigger & time* e *trigger esterno*. La modalità *illuminazione continua* permette semplicemente l'accensione o lo spegnimento dei led. La modalità *trigger & time* consente l'attivazione dell'illuminazione sul fronte di salita di un segnale digitale TTL fornito dall'esterno ed il mantenimento dell'accensione per una durata scelta dall'operatore mediante il controller.

Infine, la modalità *trigger esterno* prevede che l'accensione e lo spegnimento seguano i fronti di salita e di discesa di un segnale TTL esterno. In questo modo è possibile sincronizzare l'illuminazione all'evento di iniezione con l'acquisizione delle immagini.

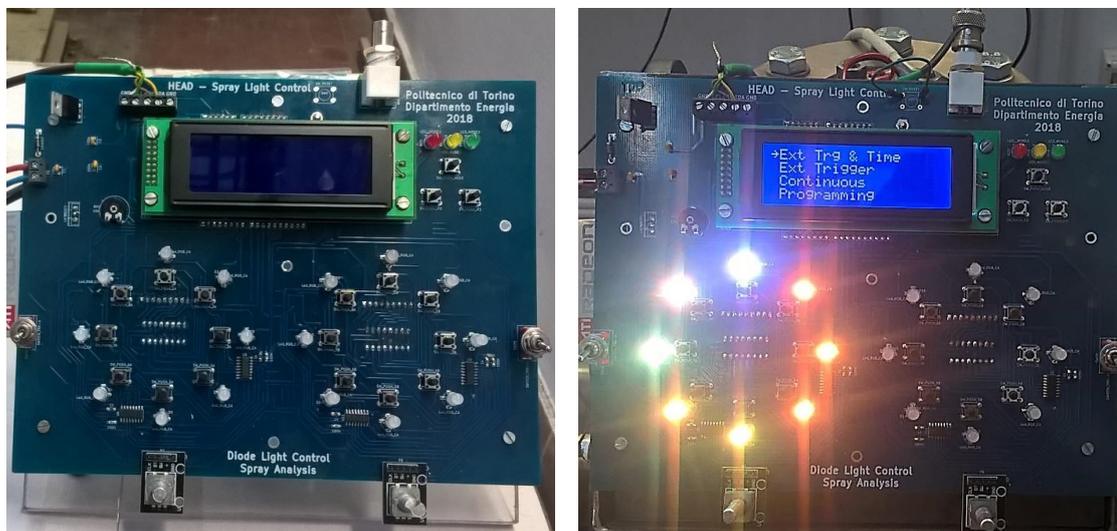


Figura 110 LED Controller

4.3.4 Sistema ricircolo e stoccaggio SF6

Una delle criticità delle prove ottiche deriva dalla variazione delle condizioni della camera tra un evento di iniezione ed il successivo. A seguito dell'iniezione, infatti, si viene a creare una nebbia d'olio all'interno della camera che altera le condizioni di illuminazione per la prova successiva. Tale effetto può essere gestito attraverso un'opportuna elaborazione delle immagini, ovvero tramite algoritmi di analisi robusti, tuttavia, occorre prevedere la possibilità di un ciclo di lavaggio della camera tra due iniezioni successive. Inoltre, il gas utilizzato, l'esafioruro di zolfo, è un "potente" gas serra, e deve essere rilasciato in ambiente in quantità minime. Ne segue che è indispensabile effettuare il recupero, e relativo stoccaggio, al termine della prova. La Figura 111 riporta lo schema dell'impianto di ricircolo realizzato.

L'impianto di ricircolo è dotato di elettrovalvole (*a*) gestite mediante un'interfaccia software appositamente realizzata in modo da configurare l'impianto in ragione della fase che si intende realizzare (es. creazione del vuoto, riempimento, manutenzione). La Tabella 2 riporta le possibili configurazioni e la rispettiva condizione delle valvole (1 = aperto / 0 = chiuso). Il flusso di gas nell'impianto è realizzato tramite un compressore rotativo a palette (*b*) collegato ad un motore elettrico dotato di inverter in modo da controllare il compressore in velocità. La separazione dell'olio dal gas di pressurizzazione è realizzata mediante un gruppo di filtraggio a tre stadi (*c*) per massimizzare il grado di filtrazione. Nel sistema è stato previsto un serbatoio di accumulo (*d*) per lo stoccaggio del gas nelle operazioni di manutenzione e di apertura della camera di test, in modo da limitarne il più possibile dispersione in ambiente. Infine, è presente una pompa per la generazione del vuoto (*e*) per eliminare l'aria dall'impianto prima della pressurizzazione con SF6.

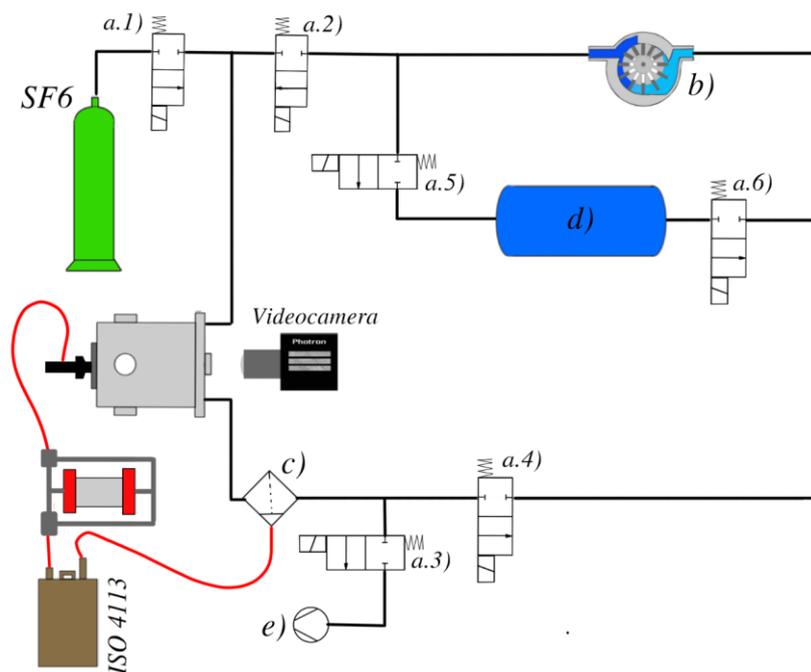


Figura 111 Schema impianto di ricircolo

	a.1	a.2	a.3	a.4	a.5	a.6
Creazione del vuoto iniziale	0	1	1	1	1	1
Pressurizzazione da bombola	1	1	0	1	0	0
Ricircolo	0	1	0	1	0	0
Stoccaggio	0	0	0	1	1	0
Manutenzione	0	0	0	0	0	0
Creazione del vuoto	0	1	1	1	0	0
Riempimento da accumulo	0	1	0	0	0	1

Tabella 2 Configurazioni impianto di ricircolo e condizioni valvole

4.3.5 Videocamera e ottiche

La videocamera in dotazione è una *Photron FASTCAM Mini AX200*. Nella tabella seguente sono riportate le sue principali caratteristiche

Sensore	CMOS (1024 x 1024 px)
Dynamic Range	12-bit monocromatico
Sensibilità (ISO 123232 Ssat)	ISO 40000
Dimensione del pixel [μm]	20
Freq. Acq massima @ 1024 x 1024 px [FPS]	6400
Freq. Acq massima @ 512 x 512 px [FPS]	22500
Freq. Acq massima @ 256 x 256 px [FPS]	67500
Risposta spettrale (500 – 800 nm)	>0.1 A/W
Efficienza quantica (500 – 740 nm)	>30%

Tabella 3 Caratteristiche tecniche della videocamera

La risoluzione delle immagini ottenibile è il risultato dell'intero setup ottico realizzato, ovvero dell'insieme di videocamera, ottiche e distanza del piano focale visualizzato. Occorre quindi definire le caratteristiche delle ottiche da impiegare in relazioni al fenomeno che si intende visualizzare. Indicativamente si possono individuare tre diverse analisi per una caratterizzazione completa dell'iniettore:

- a) analisi delle iniezioni pilota volta a visualizzare l'intera rosa dei getti;
- b) analisi del singolo getto della rosa a frequenze di acquisizione elevate per studiare i fenomeni che si realizzano nei primissimi istanti di apertura dell'iniettore.
- c) analisi delle iniezioni complete in termini di rosa.

Occorre quindi stabilire, dato il setup sperimentale, la lunghezza focale dell'obiettivo fotografico da impiegare nei tre casi

Caso a

La durata delle più piccole iniezioni pilota può essere considerata di 0.5 ms , cui corrisponde un'area d'indagine di circa 100 mm (Figura 102) nelle condizioni con le penetrazioni maggiori. Per mantenere risoluzioni accettabili con la videocamera in esame occorre ridurre la frequenza di acquisizione rispetto ai 40kFPS ipotizzati nell'analisi preliminare. Realizzando circa 12 fotogrammi nella durata di interesse si ha una frequenza di acquisizione di circa 22.5kFPS . Tale frequenza, per la videocamera in dotazione, può essere raggiunta con un numero di pixel di 512×512 (Tabella 3). Proiettando l'intera immagine su tutti pixel disponibili ne consegue un più piccolo dettaglio visibile di $195\text{ }\mu\text{m}$ che si può ritenere soddisfacente. Data la dimensione fisica del pixel della videocamera in dotazione, pari a $20\text{ }\mu\text{m}$, ne consegue un rapporto di ingrandimento paria a circa $M \approx 10$. Considerando che la distanza del piano focale dal sensore, dettate dalla geometria della camera di iniezione è pari a circa $d=450\text{ mm}$, ne deriva una lunghezza focale di $f = d/M = 46\text{ mm}$. Scegliendo quindi un obiettivo con focale da 50 mm si realizza un rapporto di ingrandimento di 9, ovvero un più piccolo dettaglio di $180\text{ }\mu\text{m}$ ed un'effettiva area di indagine di 92 mm .

Al fine di valutare con maggior accuratezza le aree inquadrare con le diverse focali è stato realizzato un modello 3D con cui apprezzare le diverse configurazioni di lunghezze focali e di dimensioni dello spray (Figura 112)

Caso b

Considerando per questa situazione una frequenza di acquisizione di 67.5kFPS , il numero di pixel utili del sensore si riduce a 256×256 , e supponendo di voler inquadrare una penetrazione massima dello spray di 25 mm , ne consegue un dettaglio minimo di $90\text{ }\mu\text{m}$. Per le medesime considerazioni effettuate in precedenza si ha la necessità di un'ottica con focale da 100 mm .

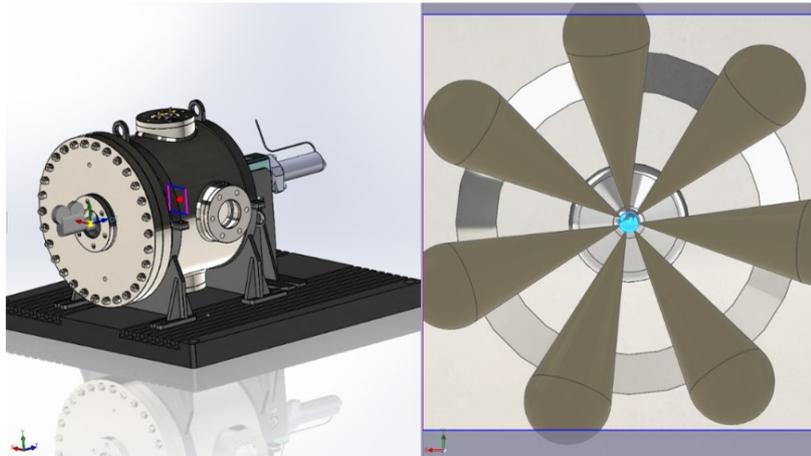


Figura 112 Modello 3D Stima area visualizzata

Caso c

Infine, per il caso dell'iniezione completa realizzata alla più alta frequenza possibile a piena risoluzione (1024 x 1024 @ 6400 FPS). Con una focale da 35 mm si analizza un'area di 260 mm con un dettaglio di 250 μm .

Con le tre focali proposte, 35 mm, 50 mm e 100 mm, si copre l'intero campo di indagine. È comunque evidente come si possano realizzare analisi diverse e valutare fenomeni diversi cambiando le frequenze di acquisizione ed accoppiandovi l'ottica opportuna. Per esempio, lo studio del fenomeno dello sgocciolamento a termine iniezione presenta esigenze molto meno stringenti rispetto alle normali iniezioni e potrà essere quindi analizzato con frequenze più basse ottenendo migliori risoluzioni.

Oltre alle considerazioni in merito alla lunghezza focale occorre considerare l'apertura dell'obiettivo²⁵. Negli obiettivi fotografici più basso è il numero che indica l'apertura massima, più luminoso sarà l'obiettivo. È pertanto indispensabile che l'ottica scelta abbia un'apertura massima la più grande possibile, per permettere alla maggior quantità possibile di luce di raggiungere il sensore nel poco tempo a disposizione, data la ripresa ad alta velocità.

Le ottiche selezionate sono delle ottiche *ZEISS Interlock 1.4/35 – 2/50 – 2/100*

²⁵ L'apertura massima di un obiettivo fotografico è pari alla lunghezza focale rapportata al massimo diametro del diaframma dell'obiettivo. Negli obiettivi fotografici più basso è il numero che indica l'apertura massima, più luminoso sarà l'obiettivo.

4.3.6 Immagini Banco e Acquisizioni Preliminari

Le Figure 113 – 115 riportano alcune immagini del banco ottico realizzato. La Figura 116 riporta una sequenza di immagini di spray ottenuta con il setup sperimentale descritto. L'illuminazione è ottenuta mediante il sistema led realizzato. La frequenza di acquisizione selezionata pari a $20kFPS$.

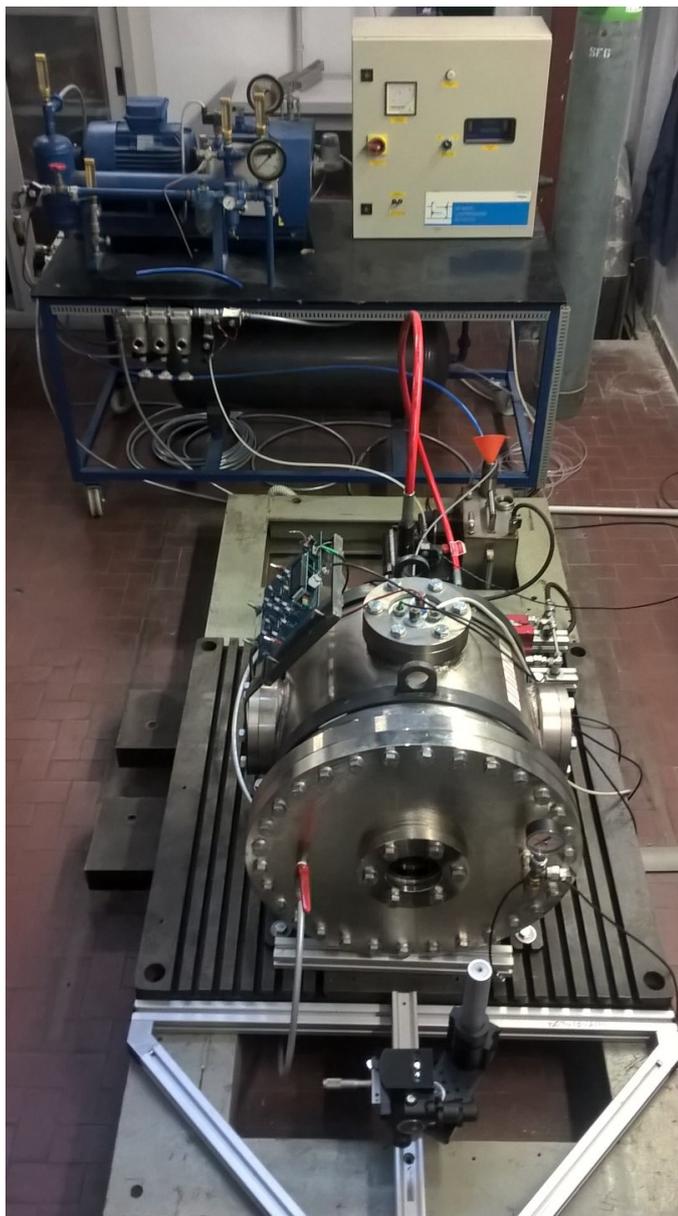


Figura 113 Banco ottico realizzato

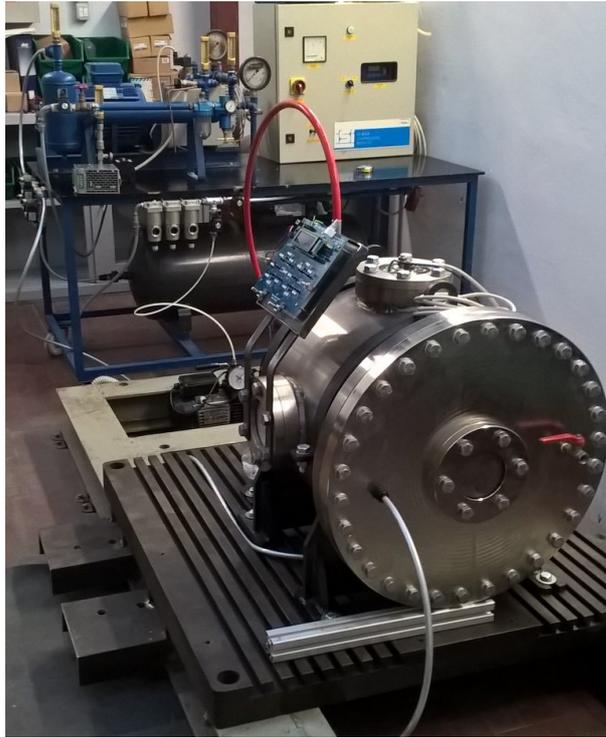
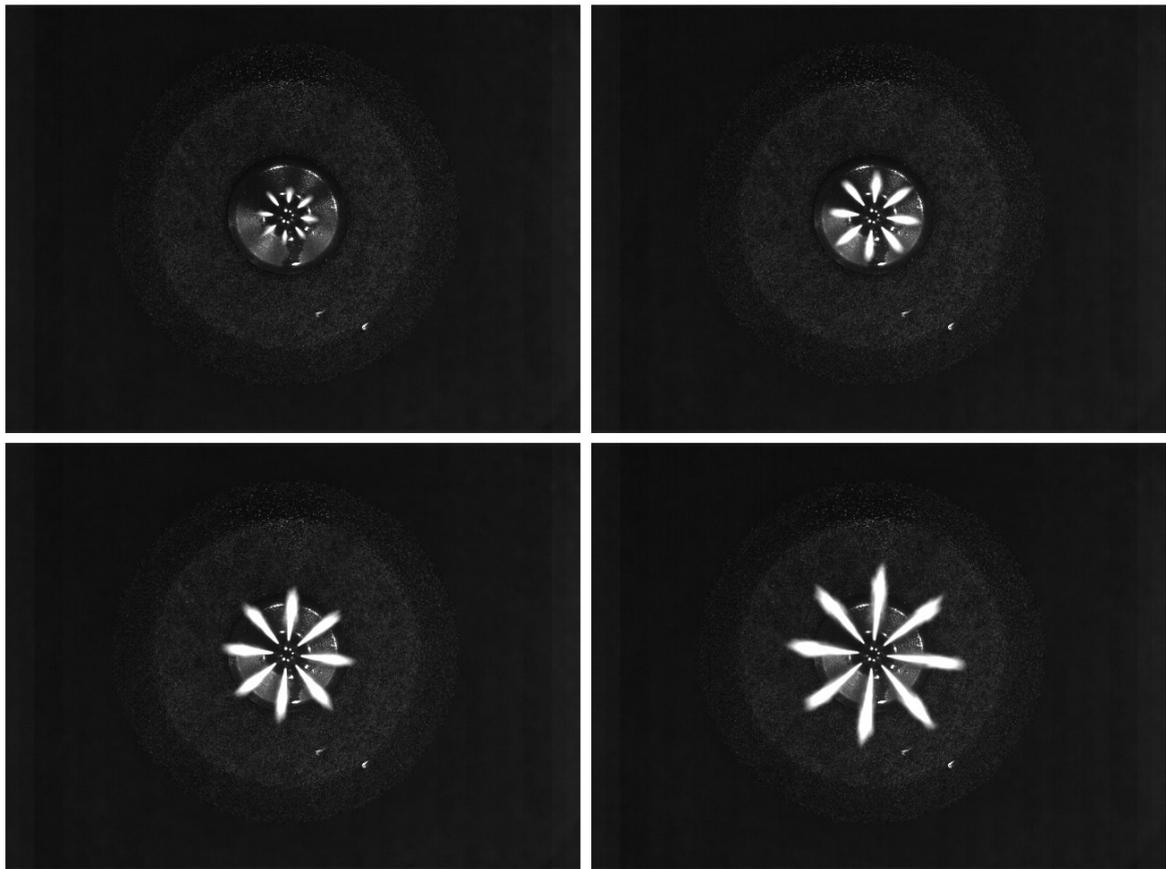


Figura 114 Camera di iniezione



Figura 115 Sistema di ricircolo e stoccaggio



*Figura 116 Immagini di spray
Frequenza di acquisizione 20 kFPS. Illuminazione led interna*

4.4 Conclusioni e sviluppi futuri

È stato progettato e realizzato un apparato sperimentale per l'analisi ottica di spray diesel mediante la tecnica della cinematografia ad alta velocità. Il banco è costituito da una camera d'iniezione pressurizzata mediante un inerte dall'elevato peso molecolare (SF₆). La scelta del particolare gas inerte permette di replicare le condizioni di densità tipiche del funzionamento motore a pressioni notevolmente inferiori, scongiurando inoltre l'innescio di possibili combustioni.

L'analisi è condotta in condizioni non evaporative, ovvero a temperatura ambiente.

La camera è dotata di 4 accessi ottici laterali ed uno frontale attraverso i quali è possibile effettuare le riprese dell'evoluzione del getto mediante una videocamera ad alta velocità.

L'innovazione principale dell'apparato sperimentale realizzato è costituita dal sistema di illuminazione. A differenza di ogni altra soluzione riportata in letteratura, l'illuminazione è collocata internamente alla camera di iniezione garantendo, in questo modo, l'uniformità

della stessa. L'illuminazione è realizzata mediante 8 LED ad alta potenza la cui intensità può essere individualmente controllata in modo da creare pattern di luce diversi. Grazie a questa soluzione è possibile effettuare riprese video in condizioni di illuminazione diverse, al fine di testare diversi algoritmi di analisi impiegabili per l'estrazione dei parametri macroscopici.

La camera di iniezione è stata realizzata in modo da accogliere al suo interno anche il sistema di movimentazione del sensore SMSA. In questo modo sarà possibile applicare le analisi meccaniche ed ottiche sullo stesso spray.

Nomenclatura

Abbreviazioni

CR	Common Rail
CMOS	Complementary Metal Oxide Semi-conductor
DF	Dual Fuel
FPS	Frame per secondo
TTL	Transistor-transistor logic

Simboli

D_o	Diametro del polverizzatore a cui sono posizionati i fori
d_o	Diametro foro polverizzatore
d	Distanza del piano focale
f	Lunghezza focale
M	Rapporto di ingrandimento
S	Penetrazione
T	Tempo
ρ	Densità

Pedici

m	Main
r	Rail
g	Gas

Conclusioni

Nella prima parte dell'attività di tesi è stata sviluppata una tecnica meccanica (SMSA) basata sugli algoritmi propri delle tecniche tomografiche per l'analisi della distribuzione spaziale della QM di spray e getti. La tecnica è stata confrontata con la principale soluzione per il rilevamento della pressione di impatto di getti e spray costituita da un sensore di tipo puntuale. Il contenuto in frequenza del segnale rilevabile dipende per entrambe le soluzioni dalla dimensione fisica dell'elemento sensibile, ma nella tecnica SMSA aumenta al diminuire dell'incremento spaziale di campionamento. Questo implica che esista una dimensione fisica dello spray per la quale risulti più conveniente l'utilizzo del sensore SMSA anziché di uno puntuale.

Il sensore realizzato è stato impiegato per analizzare la distribuzione spaziale della QM, ovvero la PI, di un getto d'aria in condizioni di sotto-espansione. Gli andamenti della PI ottenuti mediante la tecnica proposta rispecchiano in modo soddisfacente quelli riportati da ampia letteratura per getti di aeriformi in condizioni di sotto-espansione.

Infine, la forza di impatto globale, calcolata come integrale della distribuzione della pressione di impatto ricostruita, si presenta in discreto accordo con quella direttamente rilevata dal sensore posizionato, nell'apparato sperimentale, al di sotto dell'intero sensore SMSA.

Questa prima parte dell'attività dovrà essere completata in futuro impiegando il sensore nell'analisi di spray diesel. Attraverso questa analisi si potrebbe dare una definizione di angolo di diffusione associata alla distribuzione assunta dalla QM, superando i limiti delle tecniche ottiche tradizionali.

Nella seconda parte della tesi sono state analizzate le criticità comuni alle principali tecniche di valutazione delle caratteristiche macroscopiche degli spray. Le tecniche considerate si applicano ad immagini ottenute mediante tecniche fotografiche di visualizzazione diretta.

È stata proposta una versione modificata dell'algoritmo KLD di sogliatura proposto in [67]. Tale versione dell'algoritmo è stata testata elaborando le immagini di spray automobilistici relative a 5 condizioni operative. È stato evidenziato come la versione originale dell'algoritmo producesse, da un raffronto visivo, un contorno sottostimato dello spray. È stato introdotto un criterio dinamico per stabilire il numero di direzioni principali da impiegare nell'analisi. In questo modo, l'algoritmo si presenta del tutto automatico ed immune alla soggettività dello sperimentatore. È stato inoltre evidenziato come il numero di immagini soglia non influenzi gli andamenti di penetrazione ed angolo di diffusione.

È stato presentato e testato un nuovo algoritmo, definito KLD sintetico. Questo algoritmo prevede la generazione di un database artificiale con cui condurre l'analisi delle immagini. L'impiego di un database noto rappresenta il principale punto di forza della tecnica rendendo confrontabili dati di setup sperimentali differenti. Questo algoritmo, nella sua versione attuale, non consente tuttavia di gestire spray asimmetrici, il che rappresenta una limitazione da eliminare con il suo sviluppo.

Gli algoritmi proposti sono stati confrontati con i metodi di Otsu e della Massima Entropia che rappresentano due tra le principali soluzioni impiegate per la sogliatura delle immagini. L'analisi visiva del bordo del getto valutato mediante l'algoritmo KLD modificato mostra come il contorno così ottenuto è il più vicino all'effettivo contorno del getto. Tuttavia, non è possibile stabilire in modo oggettivo quale degli algoritmi fornisca la misurazione corretta dell'angolo di diffusione. La soluzione potrebbe essere quella di confrontare il risultato delle tecniche ottiche con quello ottenibile dalla misura meccanica. Attività, questa, attualmente da completare.

Infine, si è evidenziato come tipicamente le tecniche di sogliatura non siano in grado di gestire pattern di illuminazione difformi, ed un'adeguata preelaborazione dell'immagine sia indispensabile. Per valutare le potenzialità degli algoritmi, occorrerebbe effettuare le analisi in condizioni di illuminazione diverse, impiegando sorgenti di diverso tipo e pattern difformi.

Partendo da queste considerazioni si è deciso di realizzare un banco sperimentale per l'analisi ottica di spray diesel mediante la tecnica della cinematografia ad alta velocità descritto nell'ultima parte della tesi. Il banco è costituito da una camera d'iniezione che consente di effettuare un'analisi in condizioni non evaporative di spray diesel di iniettori per sistemi di propulsione navale.

L'innovazione principale dell'apparato sperimentale realizzato è costituita dal sistema di illuminazione. A differenza di ogni altra soluzione riportata in letteratura, l'illuminazione è collocata internamente alla camera di iniezione garantendo, in questo modo, l'uniformità della stessa. L'illuminazione è realizzata mediante 8 LED ad alta potenza la cui intensità può essere individualmente controllata in modo da creare pattern di luce diversi. Grazie a questa soluzione è possibile effettuare riprese video in condizioni di illuminazione diverse, al fine di testare diversi algoritmi di analisi impiegabili per l'estrazione dei parametri macroscopici.

La camera di iniezione è stata realizzata in modo da accogliere al suo interno anche il sistema di movimentazione del sensore SMSA. In questo modo sarà possibile applicare le analisi meccaniche ed ottiche sullo stesso spray.

Indice delle Figure

Figura 1 Massime Emissioni di NOx per motori diesel marini	3
Figura 2 Emission Control Areas	4
Figura 3 Contenuto di zolfo ammesso nei combustibili.....	4
Figura 4 Potenziale riduzione degli NOx per diverse tecniche.....	5
Figura 5 Volume di controllo ed impatto dello spray	15
Figura 6 Confronto portate tra iniezione pilota e a pieno carico.....	16
Figura 7 Sensore proposto da Ryan [31].....	17
Figura 8 Trasduttore impiegato in [32]	17
Figura 9 Sensore puntuale impiegato in [33]	18
Figura 10 Sensore puntuale a spina mobile [34].....	19
Figura 11 Geometria di una proiezione a fascio parallelo	22
Figura 12 Idea del sensore SMSA.....	23
Figura 13 Impatto del getto nelle diverse posizioni di analisi e griglia di misura	23
Figura 14 Parametri di campionamento M e N	26
Figura 15 Ricostruzioni di un andamento noto per diversi parametri di campionamento. ...	27
Figura 16 Tecnica puntuale: effetto della dimensione del sensore per $r / \sigma=1$	28
Figura 17 Tecnica puntuale: effetto della dimensione del sensore	28
Figura 18 Tecnica puntuale reale: Indici errore vs. dimensione del sensore	29
Figura 19 Tecnica SMSA: distribuzione della PI ed effetto del campionamento.....	30
Figura 20 Tecnica SMSA: Indici di errore in funzione dei parametri di campionamento...30	
Figura 21 Tecnica SMSA reale: Indice errore vs dim. elem. sensibile e campionamento ..32	
Figura 22 Lama sensore SMSA. Spessore parte esposta $w=0.5$ mm. Lunghezza 55 mm ...33	
Figura 23 Versione 1.0 sensore SMSA. Superficie di impatto in due metà.....	34
Figura 24 Versione 1.0 sensore SMSA. Vista esplosa.....	34
Figura 25 Versione 1.0 sensore SMSA. Foto del sensore.....	34
Figura 26 Versione 2.0 sensore SMSA.	35
Figura 27 Versione 2.0 sensore SMSA. Foto del sensore.....	35
Figura 28 Regioni principali di un getto sotto-espanso	37
Figura 29 Struttura di un getto moderatamente sotto-espanso.....	37
Figura 30 Struttura di un getto fortemente sotto-espanso	38
Figura 31 Struttura di un getto estremamente sotto-espanso	38
Figura 32 PI a) Diametro ugello $200\mu\text{m}$ e b) 25.4mm . Rapp. di pressione di 5:1 [52]	39
Figura 33 Calco ugello G_3009 e rilievo dimensionale.....	41
Figura 34 Apparato sperimentale a) Schema del setup realizzato b)	42
Figura 35 Sistema di posizionamento del sensore	43
Figura 36 Andamento temporale FI e proiezione	44
Figura 37 Andamento PI a diverse distanze dall'uscita dell'ugello ($\Delta x = 0.25$ mm)	45
Figura 38 a) Distanza piano di impatto $Z / d_N = 2.78$ ($Z=5$ mm, $d_N=1.8$ mm)	47
Figura 39 b) Distanza piano di impatto $Z / d_N = 4.17$ ($Z=7.5$ mm, $d_N = 1.8$ mm)	47
Figura 40 c) Distanza piano di impatto $Z / d_N = 5.56$ ($Z=10$ mm, $d_N = 1.8$ mm)	47

Figura 41 d) Distanza piano di impatto $Z / d_N = 8.33$ ($Z=15$ mm, $d_N=1.8$ mm).....	48
Figura 42 e) Distanza piano di impatto $Z / d_N = 11.11$ ($Z=20$ mm $d_N=1.8$ mm).....	48
Figura 43 f) Distanza piano di impatto $Z / d_N = 13.89$ ($Z=25$ mm, $d_N=1.8$ mm)	49
Figura 44 g) Distanza piano di impatto $Z / d_N = 16.67$ ($Z=30$ mm, $d_N=1.8$ mm).....	49
Figura 45 PI per $Z=20$ mm e interpolazione Gaussiana	50
Figura 46 PI per $Z=25$ mm e interpolazione Gaussiana	50
Figura 47 PI ricostruite. Curve iso-livello	51
Figura 48 Direzione dell'evoluzione assiale	52
Figura 49 Andamento PI a diverse distanze dall'uscita dell'ugello.	54
Figura 50 Confronto tra le PI a diversi Δx . a) $Z / d_N = 5.56$ b) $Z / d_N = 11.11$	55
Figura 51 Integrali PI al variare del raggio.....	56
Figura 52 Effetto dell'inclinazione del sensore. $Z / d_N = 11.11$	58
Figura 53 Sezione della PI per diverse inclinazioni del sensore	59
Figura 54 FI vs distanze di impatto	59
Figura 55 Parametri macroscopici di uno spray	67
Figura 56 Sincronizzazione degli eventi nel caso di fotografia ad alta velocità	69
Figura 57 Sincronizzazione nella Cinematografia ad alta velocità	70
Figura 58 Immagine a 8-bit e relativo istogramma dell'intensità dei pixel	72
Figura 59 Immagine di figura 56 segmentata	72
Figura 60 Possibile pattern di illuminazione non uniforme. Rampa di intensità	73
Figura 61 Immagine di Figura 57 moltiplicata per il pattern di Figura 59.	73
Figura 62 Esempio di spray e relativi istogrammi.....	74
Figura 63 Effetto della sogliatura su penetrazione e angolo di diffusione	74
Figura 64 Immagini sogliate per diversi valori di soglia T	75
Figura 65 Profili di intensità luminosa - Livello di grigio di uno spray	75
Figura 66 Confronto tra metodo della Massima Entropia e metodo di Otsu.....	77
Figura 67 Immagine originale (a sinistra) e database delle immagini soglia	79
Figura 68 Base costituita dalle prime 6 autoimmagini	82
Figura 69 Originale (sinistra) e ricostruita (destra)	82
Figura 70 Originale (sinistra) e soglia associata mediante l'algoritmo KLD (destra)	82
Figura 71 Esempi di contorno determinato con algoritmo KLD.....	83
Figura 72 a) Originale b) Soglia Associata c) Originale \wedge \neg Associata	84
Figura 73 Contorni determinati. Penetrazione e angolo di diffusione.....	84
Figura 74 Somma cumulata normalizzata autovalori matrice di covarianza B	85
Figura 75 Parametri delle immagini artificiali	87
Figura 76 Database Sintetico (solo alcune immagini sono riportate).....	88
Figura 77 Somma cumulata normalizzata degli autovalori	88
Figura 78 Pre-elaborazione: a) Originale b) Pixel per stima sfondo c) Sfondo stimato.....	90
Figura 79 a) Immagine originale b) Immagine scalata	90
Figura 80 Risultato dell'elaborazione mediante algoritmo KLD Sintetico.....	91
Figura 81 Elaborazione ad istanti temporali diversi.....	91
Figura 82 Schema setup sperimentale analisi ottica	92
Figura 83 Test A: Influenza n e M^* . a) Contorno Interno b) Contorno Esterno	94

Figura 84 Test B: Influenza n e M*. a) Contorno Interno b) Contorno Esterno	95
Figura 85 Test C: Influenza n e M*. a) Contorno Interno b) Contorno Esterno	96
Figura 86 Test D: Influenza n e M*. a) Contorno Interno b) Contorno Esterno	97
Figura 87 Test E: Influenza n e M*. a) Contorno Interno b) Contorno Esterno	98
Figura 88 Tempi di elaborazione al variare di n e M*	99
Figura 89 Confronto Contorno Interno ed Esterno	100
Figura 90 Test A. Confronto KLD – Otsu	101
Figura 91 Test B. Confronto KLD – Otsu.....	101
Figura 92 Test C. Confronto KLD – Otsu.....	102
Figura 93 Test D. Confronto KLD – Otsu – Entropia.....	102
Figura 94 Test E. Confronto KLD – Otsu – Entropia	103
Figura 95 Metodo Massima Entropia. $t=70 \mu s$, Test D.....	104
Figura 96 Confronto degli algoritmi nei primi istanti di iniezione	105
Figura 97 Test A. Confronto KLD e KLD Sintetico.....	105
Figura 98 Test B. Confronto KLD e KLD Sintetico	105
Figura 99 Test C. Confronto KLD e KLD Sintetico	106
Figura 100 Test D. Confronto KLD e KLD Sintetico.....	106
Figura 101 Test E. Confronto KLD e KLD Sintetico	107
Figura 102 Stima della penetrazione (Equazione 31)	115
Figura 103 Velocità stimata del fronte dello spray	116
Figura 104 Sfocatura vs. tempo di esposizione.....	116
Figura 105 Modello 3D Camera di iniezione.....	117
Figura 106 Contenuto spettrale sorgenti luminose e curva di trasmissione BK7	118
Figura 107 Sistema di alimentazione	118
Figura 108 Modello 3D della camera e del sistema di illuminamento	119
Figura 109 Anello LED realizzato	120
Figura 110 LED Controller	121
Figura 111 Schema impianto di ricircolo.....	122
Figura 112 Modello 3D Stima area visualizzata.....	124
Figura 113 Banco ottico realizzato	125
Figura 114 Camera di iniezione	126
Figura 115 Sistema di ricircolo e stoccaggio	126
Figura 116 Immagini di spray	127

Bibliografia

- [1] Lloyds Register, “Revised MARPOL Annex VI,” *Marpol*, no. June. pp. 1–25, 1997.
- [2] D. Woodyard, *Pounder ’ s Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. 2009.
- [3] D. Giacosa, *Motori endotermici*. Hoepli, 2000.
- [4] G. Ferrari, *Motori a combustione interna*, vol. 1. Società Editrice Esculapio, 2005.
- [5] F. Zeldovitch, Y.B.; Sadovnikov, D.A.; Kamenetskii, “Oxidation of nitrogen in combustion,” 1947.
- [6] A. Azzara, D. Rutherford, and H. W. Clean, “Feasibility of IMO annex VI tier III implementation using selective catalytic reduction,” *theicct.org*, 2014.
- [7] J. J. Corbett and J. J. Winebrake, “Emissions Tradeoffs among Alternative Marine Fuels: Total Fuel Cycle Analysis of Residual Oil, Marine Gas Oil, and Marine Diesel Oil,” *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 58, no. 4, pp. 538–542, Apr. 2008.
- [8] M. M. Elgohary, I. S. Seddiek, and A. M. Salem, “Overview of alternative fuels with emphasis on the potential of liquefied natural gas as future marine fuel,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 229, no. 4, pp. 365–375, Nov. 2015.
- [9] F. Burel, R. Taccani, and N. Zuliani, “Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion,” *Energy*, vol. 57, pp. 412–420, Aug. 2013.
- [10] C. Kiesling *et al.*, “Detailed Assessment of an Advanced Wide Range Diesel Injector for Dual Fuel Operation of Large Engines,” 2016.
- [11] R. . Papagiannakis and D. . Hountalas, “Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 18–19, pp. 2971–2987, Nov. 2004.
- [12] J. Liu, F. Yang, H. Wang, M. Ouyang, and S. Hao, “Effects of pilot fuel quantity on the emissions characteristics of a CNG/diesel dual fuel engine with optimized pilot injection timing,” *Appl. Energy*, vol. 110, pp. 201–206, Oct. 2013.
- [13] K. Ryu, “Effects of pilot injection timing on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel–CNG dual fuel,” *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 721–730, Nov. 2013.
- [14] A. Lefebvre and V. McDonnell, “Atomization and Sprays, Second Edition.,” *Boca Rat. CRC Press*, p. 300, 2017.
- [15] S. N. Soid and Z. A. Zainal, “Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical measuring techniques – A review,” *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 724–741, Feb. 2011.
- [16] N. Rajaratnam, “Turbulent Jets,” *Elsevier Sci.*, vol. 5, 1976.

- [17] D. A. Pierpont and R. D. Reitz, "Effects of Injection Pressure and Nozzle Geometry on D.I. Diesel Emissions and Performance," *SAE Transactions*, vol. 104. SAE International, pp. 1041–1050, 1995.
- [18] C. Soteriou, R. Andrews, and M. Smith, "Direct injection diesel sprays and the effect of cavitation and hydraulic flip on atomization," *SAE*, 1995.
- [19] S. Sazhin, *Droplets and sprays*, vol. 9781447163. London: Springer London, 2014.
- [20] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno, and O. Venegas, "A Technique to Match the Refractive Index of Different Diesel Fuels with the Refractive Index of Transparent Materials to Improve the Experimental Visualization," *Exp. Tech.*, vol. 40, no. 1, pp. 261–269, Feb. 2016.
- [21] J. Obriot, J. Ge, T. K. Bose, and J. M. St-Arnaud, "Determination of the density from simultaneous measurements of the refractive index and the dielectric constant of gaseous CH₄, SF₆, and CO₂," *Fluid Phase Equilib.*, 1993.
- [22] P. E. Ciddor, "Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 9, p. 1566, Mar. 1996.
- [23] G. E. Cossali, G. Brunello, and A. Coghe, "LDV Characterization of Air Entrainment in Transient Diesel Sprays," *SAE Transactions*, vol. 100. SAE International, pp. 162–174, 1991.
- [24] E. Spiller and Society of Photo-optical Instrumentation Engineers., *Soft X-ray optics*. SPIE, 1994.
- [25] J. M. Desantes, R. Payri, F. J. Salvador, and J. Gimeno, "Measurements of Spray Momentum for the Study of Cavitation in Diesel Injection Nozzles," 2003.
- [26] A. Mariani, A. Cavicchi, L. Postrioti, and C. Ungaro, "A Methodology for the Estimation of Hole-to-Hole Injected Mass Based on Spray Momentum Flux Measurement," in *SAE Technical Paper Series*, 2017, vol. 1.
- [27] R. Payri, F. Salvador, J. Gimeno, and L. Zapata, "Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions," *Elsevier*, 2007.
- [28] R. Payri, J. M. García, F. J. Salvador, and J. Gimeno, "Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics," *Fuel*, vol. 84, no. 5, pp. 551–561, Mar. 2005.
- [29] L. Postrioti and M. Battistoni, "Evaluation of Diesel Spray Momentum Flux in Transient Flow Conditions," *SAE Tech. Pap. Ser.*, vol. 1, 2010.
- [30] L. Postrioti, F. Mariani, and M. Battistoni, "Experimental and numerical momentum flux evaluation of high pressure Diesel spray," *Fuel*, vol. 98, pp. 149–163, Aug. 2012.
- [31] T. W. Ryan, "Measurement of the Instantaneous Distribution of Momentum in Diesel Injection Nozzle Fuel Jets," in *SAE Technical Paper Series*, 2010, vol. 1.
- [32] S. Kampmann, B. Dittus, P. Mattes, and M. Kirner, "The Influence of Hydro Grinding

- at VCO Nozzles on the Mixture Preparation in a DI Diesel Engine,” in *SAE Technical Paper Series*, 1996, vol. 1.
- [33] C. Dongiovanni and S. Quirico, “Sulla misura della forza di impatto,” in *Atti della Giornata Nazionale di Studio – MIS-MAC IX – Metodi di Sperimentazione nelle Turbomacchine*, 2006, pp. 232–242.
- [34] A. Mariani, L. Postrioti, and C. Ungaro, “Instrument for the test of the injectors based on the measuring of spray momentum,” *Fuel Syst. IC Engines*, pp. 313–324, Jan. 2012.
- [35] L. Postrioti, M. Battistoni, C. Ungaro, and A. Mariani, “Analysis of Diesel Spray Momentum Flux Spatial Distribution,” *SAE International Journal of Engines*, vol. 4. SAE International, pp. 720–736, 2011.
- [36] D. Verhoeven, “Tomographic spray momentum mapping system,” Jan. 2000.
- [37] L. Debnath and D. Bhatta, “The Radon Transform and Its Applications,” in *Integral Transforms and Their Applications, Second Edition*, Dover Publications, 2010, pp. 539–562.
- [38] A. C. Kak, M. Slaney, and G. Wang, “Principles of Computerized Tomographic Imaging,” *Med. Phys.*, vol. 29, no. 1, pp. 107–107, Jan. 2002.
- [39] T. G. Feeman, *The Mathematics of Medical Imaging*. Cham: Springer International Publishing, 2010.
- [40] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital image processing*, 3rd ed. Pearson prentice hall, 2008.
- [41] A. I. Ramírez *et al.*, “Quantitative X-ray measurements of high-pressure fuel sprays from a production heavy duty diesel injector,” *Exp. Fluids*, vol. 47, no. 1, pp. 119–134, Jul. 2009.
- [42] V. Vuorinen, M. Larmi, E. Antila, O. Kaario, E. El-Hannouny, and S. Gupta, “Near Nozzle Diesel Spray Modeling and X-Ray Measurements,” in *SAE Technical Paper Series*, 2010, vol. 1.
- [43] R. Bracewell and R. Bracewell, *The Fourier transform and its applications*, 3rd ed. 1986.
- [44] T. Korakianitis, A. M. Namasivayam, and R. J. Crookes, “Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, no. 1, pp. 89–112, 2011.
- [45] J. Yu, V. Vuorinen, O. Kaario, T. Sarjovaara, and M. Larmi, “Visualization and analysis of the characteristics of transitional underexpanded jets,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 44, pp. 140–154, 2013.
- [46] C. duP. Donaldson and R. S. Snedeker, “A study of free jet impingement. Part 1. Mean properties of free and impinging jets,” *J. Fluid Mech.*, vol. 45, no. 02, p. 281, Jan. 1971.

- [47] E. Franquet, V. Perrier, S. Gibout, and P. Bruel, “Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 77, pp. 25–53, Aug. 2015.
- [48] M. ABBETT, “Mach disk in underexpanded exhaust plumes,” *AIAA J.*, vol. 9, no. 3, pp. 512–514, 1971.
- [49] S. CRIST, D. R. GLASS, and P. M. SHERMAN, “Study of the highly underexpanded sonic jet,” *AIAA J.*, vol. 4, no. 1, pp. 68–71, 1966.
- [50] J. Wilkes Inman, P. Danehy, R. Nowak, and D. Alderfer, “Fluorescence Imaging Study of Impinging Underexpanded Jets,” 2013.
- [51] F. Alvi and K. Iyer, “Mean and unsteady flowfield properties of supersonic impinging jets with lift plates,” in *5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit*, 2013.
- [52] K. A. Phalnikar, R. Kumar, and F. S. Alvi, “Experiments on free and impinging supersonic microjets,” *Exp. Fluids*, vol. 44, no. 5, pp. 819–830, May 2008.
- [53] G. T. Kalghatgi and B. L. Hunt, “The Occurrence of Stagnation Bubbles in Supersonic Jet Impingement Flows,” *Aeronaut. Q.*, vol. 27, no. 03, pp. 169–185, Aug. 1976.
- [54] J. Wilkes, C. Glass, P. Danehy, and R. Nowak, “Fluorescence Imaging of Underexpanded Jets and Comparison with CFD,” *44th AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib.*, 2012.
- [55] K. Phalnikar, F. Alvi, and C. Shih, “Behavior of free and impinging supersonic microjets,” in *15th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, 2013.
- [56] S. Quirico, “Sviluppo di una tecnica di misura intrusiva di spray ad alte pressioni,” Politecnico di Torino, 2006.
- [57] F. Zigunov, P. Sellappan, and F. Alvi, “Video: The dancing jet: Axial instability mode of an impinging supersonic microjet,” in *71th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics - Gallery of Fluid Motion*, 2019.
- [58] M. I. A. Lourakis., “A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar, Technical Report, Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology,” *researchgate.net*, pp. 4–9, 2005.
- [59] P. J. Lamont and B. L. Hunt, “The impingement of underexpanded, axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates,” *J. Fluid Mech.*, vol. 100, no. 3, pp. 471–511, 1980.
- [60] Y. Yue, C. F. Powell, R. Poola, J. Wang, and J. K. Schaller, “Quantitative Measurements of Diesel Fuel Spray Characteristics in the Near-Nozzle Region Using X-Ray Absorption,” *At. Sprays*, vol. 11, no. 4, pp. 471–490, 2014.
- [61] J. C. Dent, “A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration,” *SAE Technical Paper Series*, vol. 1. SAE International, pp. 1881–1884, 2010.
- [62] H. Hiroyasu and M. Arai, “Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,” *SAE*

Technical Paper Series, vol. 1. SAE International, pp. 1050–1061, 2010.

- [63] J. Naber and D. L. Siebers, “Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays,” in *SAE Technical Paper Series*, 1996, vol. 1.
- [64] Z. Feng, C. Zhan, C. Tang, K. Yang, and Z. Huang, “Experimental investigation on spray and atomization characteristics of diesel/gasoline/ethanol blends in high pressure common rail injection system,” *Energy*, vol. 112, pp. 549–561, Oct. 2016.
- [65] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno, and J. de la Morena, “Macroscopic Behavior of Diesel Sprays in the Near-Nozzle Field,” *SAE International Journal of Engines*, vol. 1, no. 1. SAE International, pp. 528–536, 2008.
- [66] X. Wang, Z. Huang, O. A. Kuti, W. Zhang, and K. Nishida, “Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 31, pp. 659–666, 2010.
- [67] C. Dongiovanni, C. Negri, and D. Pisoni, “Macroscopic Spray Parameters in Automotive Diesel Injector Nozzles With Different Hole Shape,” in *ASME 2003 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference (pp. 77-85). American Society of Mechanical Engineers.*, 2003, pp. 77–85.
- [68] F. Payri, J. M. Desantes, and J. Arrègle, “Characterization of D.I. Diesel Sprays in High Density Conditions,” *SAE Technical Paper Series*, vol. 1. SAE International, pp. 1085–1094, 2010.
- [69] J. Arrègle, J. V. Pastor, and S. Ruiz, “The Influence of Injection Parameters on Diesel Spray Characteristics,” in *SAE Technical Paper Series*, 1999, vol. 1.
- [70] C. Bae, J. Yu, J. Kang, J. Kong, and K. O. Lee, “Effect of Nozzle Geometry on the Common-Rail Diesel Spray,” in *SAE Technical Paper Series*, 2010, vol. 1.
- [71] E. Delacourt, B. Desmet, and B. Besson, “Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques,” *Fuel*, vol. 84, no. 7–8, pp. 859–867, May 2005.
- [72] Jiaqing Shao and Yong Yan, “Digital Imaging Based Measurement of Diesel Spray Characteristics,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 9, pp. 2067–2073, Sep. 2008.
- [73] J. Shao, Y. Yan, G. Greeves, and S. Smith, “Quantitative characterization of diesel sprays using digital imaging techniques,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 7, pp. 1110–1116, Jul. 2003.
- [74] R. Morgan, J. Wray, D. A. Kennaird, C. Crua, and M. R. Heikal, “The Influence of Injector Parameters on the Formation and Break-Up of a Diesel Spray,” *SAE Transactions*, vol. 110. SAE International, pp. 389–399, 2001.
- [75] A. Ghurri, K. Jae-duk, S. Kyu-Keun, J. Jae-Youn, and K. H. Gon, “Qualitative and quantitative analysis of spray characteristics of diesel and biodiesel blend on common-rail injection system,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 885–893, Apr. 2011.

- [76] A. Cronhjort and F. Wåhlin, "Segmentation algorithm for diesel spray image analysis," *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 32, p. 5971, Nov. 2004.
- [77] J. V. Pastor, J. Arrègle, and A. Palomares, "Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test," *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 17, p. 2876, Jun. 2001.
- [78] F. Payri, J. V. Pastor, A. Palomares, and J. E. Juliá, "Optimal feature extraction for segmentation of Diesel spray images," *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 10, p. 2102, Apr. 2004.
- [79] J. V. Pastor, J. Arrègle, J. M. García, and L. D. Zapata, "Segmentation of diesel spray images with log-likelihood ratio test algorithm for non-Gaussian distributions," *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 6, p. 888, Feb. 2007.
- [80] J. Seneschal, B. Maurin, J. C. Champoussin, and C. Ducottet, "A Fully Automatic System for the Morphology Characterization of High Pressure Diesel Sprays," in *SAE Technical Paper Series*, 2010, vol. 1.
- [81] V. Macian, R. Payri, A. Garcia, and M. Bardi, "Experimental Evaluation of the Best Approach for Diesel Spray Images Segmentation," *Exp. Tech.*, vol. 36, no. 6, pp. 26–34, Nov. 2012.
- [82] C. Petit, W. Reckers, J.-M. Becker, and M. Jourlin, "Characterization of Diesel Spray Images Using a Shape Processing Methodology," *Image Anal. Stereol.*, vol. 24, no. 2, p. 95, 2011.
- [83] J. De la Morena, J. Gimeno, R. Payri, and F. J. Salvador, "Analysis of Diesel Spray Atomization By Means of a Near-Nozzle Field Visualization Technique," *At. Sprays*, vol. 21, no. January 2011, pp. 753–774, 2011.
- [84] J. M. Desantes, R. Payri, F. J. Salvador, and J. De La Morena, "Influence of cavitation phenomenon on primary break-up and spray behavior at stationary conditions," *Fuel*, vol. 89, pp. 3033–3041, 2010.
- [85] B. Mohan, W. Yang, K. L. Tay, and W. Yu, "Macroscopic spray characterization under high ambient density conditions," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 59, pp. 109–117, Nov. 2014.
- [86] J. N. Kapur, P. K. Sahoo, and A. K. C. Wong, "A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram.," *Comput. Vision, Graph. Image Process.*, vol. 29, no. 3, pp. 273–285, Mar. 1985.
- [87] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 2008.
- [88] J. E. Johnson, J. D. Naber, and S.-Y. Lee, "Characterizing Diesel Fuel Spray Cone Angle From Back-Scattered Imaging by Fitting Gaussian Profiles to Radial Spray Intensity Distributions," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 134, no. 6, p. 062802, Jun. 2012.
- [89] M. Turk and A. Pentland, "Eigenfaces for Recognition," *J. Cogn. Neurosci.*, vol. 3, no. 1, pp. 71–86, Jan. 1991.

- [90] M. Kirby and L. Sirovich, "Application of the Karhunen-Loeve procedure for the characterization of human faces," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 12, no. 1, pp. 103–108, 1990.
- [91] C. Solomon and T. Breckon, *Fundamentals of Digital Image Processing A Practical Approach with Examples in Matlab*. John Wiley & Sons, 2011.
- [92] J. M. Desantes, R. Payri, F. J. Salvador, and V. Soare, "Study of the Influence of Geometrical and Injection Parameters on Diesel Sprays Characteristics in Isothermal Conditions," in *SAE Technical Paper Series*, 2010, vol. 1.