

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



**STUDIO DEL MISCELAMENTO
ARIA/COMBUSTIBILE NEL DISPOSITIVO
“LANCIA GAS” DI UN BRUCIATORE PER
TURBOGAS MEDIANTE TECNICA LIF**

Tesi svolta presso il laboratorio di fluidodinamica di Ansaldo Energia

Relatore:
Prof. Alessandro Bottaro
Correlatori:
Cinzia Cirigliano
Enrico Gottardo
Sergio Rizzo

Presentata da:
Andrea Busseti
Marco Levrero

Sessione di Settembre
Anno Accademico 2014-2015

Ringraziamenti

Questa tesi è il frutto di un lavoro durato quasi un anno presso il laboratorio di fluidodinamica di Ansaldo Energia. Desideriamo per prima cosa ringraziare il prof. Alessandro Bottaro per averci dato la possibilità di intraprendere questa esperienza, che si è rivelata decisamente interessante e formativa.

Abbiamo avuto la possibilità di lavorare in un gruppo di persone che ci ha costantemente supportato e guidato nel nostro lavoro, un sentito ringraziamento va quindi a tutto il gruppo di ricerca del laboratorio di fluidodinamica ed in particolare a Enrico, Edoardo, Francesco, Cinzia e Sergio, con cui abbiamo lavorato quasi tutti i giorni e che ci hanno permesso di svolgere al meglio quest'attività.

Vogliamo anche ringraziare le nostre famiglie che ci hanno fortemente incoraggiato e sostenuto durante tutto il periodo di studi, ed il gruppo di amici che si è formato in questi tre anni passati insieme all'università. Assieme a loro abbiamo passato e condiviso molti momenti importanti, e speriamo che i legami che si sono creati possano durare a lungo anche al di fuori dell'università.

Indice

Elenco delle figure	iii
Elenco delle tabelle	vi
Abstract	1
1 Quadro generale tecnica e obiettivi	2
1.1 Descrizione oggetto in prova	2
1.2 Tecnica LIF	5
1.3 Scalatura dalle condizioni di macchina	9
2 Setup sperimentale e tecniche utilizzate	11
2.1 Descrizione laboratorio e linee aria	11
2.2 Progetto montaggio hardware	14
2.3 Configurazione del sistema di acquisizione immagini	15
2.4 Taratura MFC	19
2.5 Bilanciamento lama laser	21
2.6 Calcolo della concentrazione di tracciante	23
2.7 Calibrazione LIF	27
2.8 Calcolo del rapporto combustibile-aria ϕ	31
3 Misure ed elaborazione dati	33
3.1 Procedura di elaborazione immagini	35
3.2 Misure	36
3.2.1 Portate di riferimento	38
3.2.2 Lancia	40
3.2.3 VeLoNOx TM	43
3.2.4 Lancia + VeLoNOx TM	45
3.2.5 Profili ISO- Φ	48
4 Conclusioni	51
A Disegni CAD	54
B Dati tecnici hardware	57
Bibliografia	59

Elenco delle figure

1.1	Differenze fra fiamma diffusiva e pre-miscelata	3
1.2	Spaccato del bruciatore VeLoNOx TM , in rosso si notano i condotti di adduzione del gas, mentre in azzurro quelli dell'aria.	3
1.3	Sezione del bruciatore, anche in questo caso si nota il condotto di adduzione del combustibile VeLoNOx TM (in rosso) e quello della Lancia (in verde).	4
1.4	Dettaglio del componente <i>Lancia gas</i>	4
1.5	Fluorescenza della molecola di acetone.	6
1.6	Lunghezze d'onda dei fenomeni in gioco	8
1.7	Esempio di calibrazione per diversi valori di intensità, è possibile notare l'andamento non lineare per valori di concentrazione elevati.	8
2.1	Vista generale del laboratorio, si possono vedere il sistema di aspirazione (in giallo) e la linea secondaria (sulla parete in fondo.)	13
2.2	Posizionamento della telecamera rispetto all'oggetto in prova	15
2.3	Laser Dantec Dynamics montato su un supporto in grado di regolarne la posizione con precisione.	16
2.4	In questa immagine è possibile notare il tendaggio nero utilizzato per minimizzare i riflessi presenti, e la verniciatura nera del componente.	17
2.5	Particolare del diagramma dei tempi, in rosso si nota l'impulso del laser che coincide con l'istante zero. In verde si vede il tempo in cui il diaframma della fotocamera rimane aperto, mentre in azzurro è indicato il tempo di decadimento dei fosfori dell'intensificatore.	18

2.6	Rette di taratura relative ai tre misuratori massici utilizzati.	20
2.7	Confronto fra lama laser ideale e reale.	21
2.8	Esempio di bilanciamento di un'immagine grezza.	21
2.9	Immagine di bilanciamento in cui sono evidenti le disuniformità legate alla forma della lama e i confini oltre cui la stessa è molto debole o completamente assente.	22
2.10	La regione di interesse viene suddivisa in volumetti elementari, ciascuno dei quali è associato a 1 pixel della fotocamera.	23
2.11	Target millimetrato utilizzato per passare da una misura in pixel ad una in millimetri.	23
2.12	Procedura di visualizzazione del valore massimo dei pixel nella zona in cui la concentrazione è il 100% tramite il sistema Image Histogram. Nell'esempio mostrato il massimo rilevato è 105.	28
2.13	Immagini a concentrazione crescente usate per la calibrazione.	29
2.14	Rette di taratura derivanti dai punti acquisiti, riportano l'intensità luminosa di ogni pixel in funzione del numero di molecole di acetone in esso presenti. Quella utilizzata per l'esperienza è segnata in rosso e se ne presenta l'equazione.	30
3.1	Differenti condotti di immissione del combustibile, dall'alto verso il basso: VeLoNOx TM , Pilota (non utilizzato) e Lancia.	33
3.2	Particolare dell'inseminatore, in rosso si nota la valvola utilizzata per regolare la ripartizione del flusso fra le due linee.	34
3.3	Immagine grezza bilanciata e con fondo sottratto.	35
3.4	Immagine relativa al numero di molecole di tracciante.	36
3.5	Immagine finale rappresentativa di ϕ . La macchia blu che si nota all'interno del flusso è dovuta a fenomeni di condensazione locale dell'acetone. Non essendo presente aria principale, in quella zona è presente solo <i>gas equivalente</i> puro.	36
3.6	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.1.	40
3.7	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.3.	41

3.8	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.5.	41
3.9	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.12.	42
3.10	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.13.	42
3.11	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.14.	42
3.12	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione V.1.	43
3.13	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione V.3.	44
3.14	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione V.5.	44
3.15	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione LV.1.	45
3.16	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione LV.2.	46
3.17	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione LV.3.	46
3.18	Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione LV.4.	46
3.19	Le due immagini in alto sono relative alle condizioni L.3 e V.3, quella in basso è stata ottenuta sommando il valore dei singoli pixel delle due immagini.	47
3.20	Iimmagine acquisita (SX) ed immagine artificiale (DX) a parità di condizioni.	48
3.21	Profili ISO- Φ in diverse condizioni, dall'alto verso il basso: L.1, L.3.	49
3.22	Profili ISO- Φ in diverse condizioni, dall'alto verso il basso: LV.1, LV.3.	50
A.1	Vista di assieme, in azzurro si nota il tubo premix	54
A.2	Vista interna della flangia di accoppiamento	55
A.3	Vista laterale ed esterna della flangia di accoppiamento	55
A.4	Vista del cilindro utilizzato per simulare la presenza del corpo diagonale.	56
A.5	Vista della pentola ideata per isolare l'apparato sperimentale	56
A.6	Vista dei supporti.	56

Elenco delle tabelle

2.1	Costanti utilizzate nel calcolo della densità	26
2.2	Valori numerici utilizzati durante la taratura, non è riportato il valore relativo alla concentrazione nulla.	30
3.1	Condizioni di prova relative alla portata di aria comburente.	38
3.2	Condizioni di prova relative alla portata di combustibile alla Lancia.	38
3.3	Condizioni di prova relative alla portata di gas al VeLoNOx TM	38
3.4	Condizioni di prova relative alla portata di gas a Lancia + VeLoNOx TM	39
3.5	Valori relativi alle prove effettuate sulla sola Lancia nelle due modalità di prova.	40
3.6	Valori relativi alle prove effettuate sul solo VeLoNOx TM nelle due modalità di prova.	43
3.7	Valori relativi alle prove effettuate su lancia + VeLoNOx TM nelle due modalità di prova.	45

Abstract

Il presente documento riporta i risultati dell'attività di stage svolta presso il laboratorio di fluidodinamica di Ansaldo Energia.

Il lavoro consiste nello studio di un componente del bruciatore VeloNOxTM, la *Lancia gas*, con tecniche ottiche non ancora utilizzate nello specifico e con l'obiettivo di ottenere informazioni utili all'ottimizzazione delle prestazioni e favorire possibili sviluppi futuri.

E' stato quindi pensato e realizzato un sistema di misura che, utilizzando la tecnica *Laser Induced Fluorescence* (LIF), permetta di visualizzare in modo quantitativo la concentrazione di una sostanza tracciante (acetone) miscelata in un flusso d'aria. Tale sistema permette di simulare il miscelamento tra il combustibile e l'aria in un bruciatore nelle normali condizioni di funzionamento.

La parte preponderante dell'attività è stata dedicata alla messa a punto del setup sperimentale, che ha riguardato la progettazione ed il montaggio di una parte dell'hardware utilizzato e la calibrazione del sistema di acquisizione ed elaborazione immagini.

A seguito delle prove effettuate si è appurato come l'utilizzo del condotto della Lancia gas abbia fornito risultati, relativamente alla modalità di distribuzione del combustibile, tali da suggerirne l'applicazione per garantire una migliore stabilità di fiamma. Ciò è dovuto principalmente al fatto che in tali condizioni operative il combustibile si dispone in modo da creare una zona ad alta concentrazione allo sbocco del bruciatore, ossia dove la fiamma dovrebbe ancorarsi per un funzionamento più stabile.

L'attività è parte di un progetto dell'Azienda che si propone di applicare tale mezzo di analisi, in fase di studio preliminare, a flussi di miscela gas – aria di vari componenti, per poi valutare la possibilità di condurre prove più approfondite su ciascuno di essi.

Capitolo 1

Quadro generale tecnica e obiettivi

1.1 Descrizione oggetto in prova

L'esperienza di tesi si è focalizzata sullo studio di un bruciatore VeLoNOxTM per turbine a gas, prodotto da Ansaldo Energia. Il bruciatore è un componente fondamentale presente nella camera di combustione di un impianto turbogas per produzione di energia, attraverso il quale vengono opportunamente miscelati combustibile e comburente. Generalmente in una camera di combustione di un impianto Ansaldo sono presenti 24 bruciatori disposti circolarmente.

Il bruciatore è formato essenzialmente da due parti: uno swirler diagonale ed uno swirler assiale, composto da otto pale. Il diagonale produce circa il 90% della potenza termica e ha il compito di creare una fiamma pre-miscelata, mentre l'assiale produce il resto della potenza e genera una fiamma di tipo parzialmente pre-miscelato o diffusivo.

Dalla figura seguente è possibile notare le differenze fra una fiamma diffusiva e una pre-miscelata in camera di combustione. Si può notare come la fiamma a diffusione (in alto) sia notevolmente più calda e quindi abbia una maggiore produzione di NOx, per contro la fiamma premiscelata è più fredda e quindi avrà maggiori problemi di stabilità, cioè di spegnimento.

L'esigenza di realizzare la fiamma diffusiva è legata alla necessità di rendere più stabile il nucleo della fiamma principale generata dal diagonale. Inoltre, la presenza delle palette di swirl crea una zona di depressione responsabile del ricircolo dei gas verso la zona centrale, garantendo una migliore combustione e minori livelli di emissioni inquinanti.

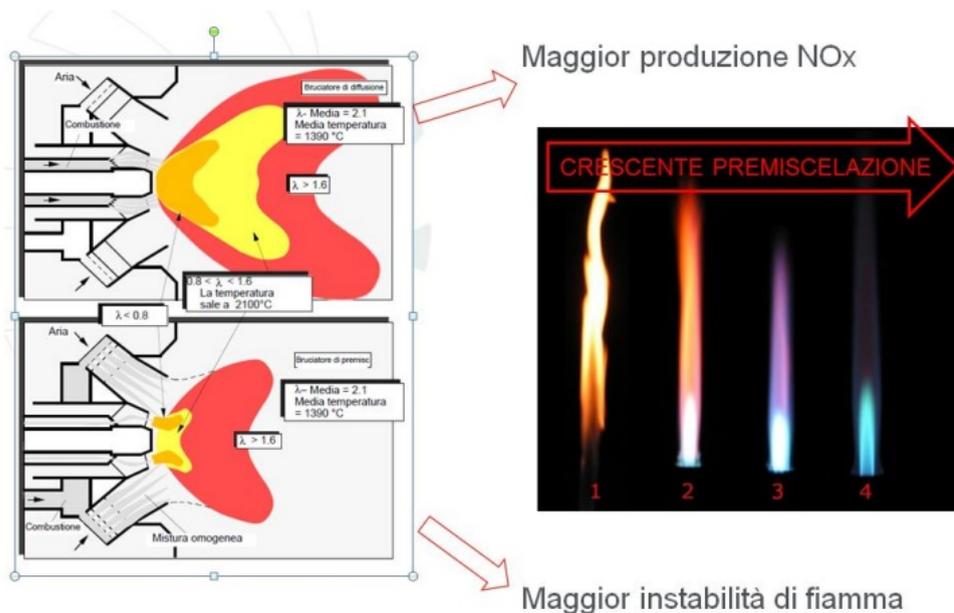


FIGURA 1.1: Differenze fra fiamma diffusiva e pre-miscelata

L'attenzione è stata rivolta prevalentemente verso il corpo assiale, mentre la presenza del diagonale è stata opportunamente simulata (come descritto nel seguito). La particolarità di un bruciatore di tipo VeLoNOxTM (*Very Low NOx*) rispetto ad un modello tradizionale è l'impiego di una fiamma pilota all'assiale parzialmente premiscelata, in questo modo si riducono consistentemente i livelli di emissioni di NOx e CO e si ottiene una fiamma più stabile. Il dispositivo adibito alla produzione della fiamma diffusiva è denominato *Lancia gas* ed è posto al centro del vorticolatore assiale, in questo modo i fori di alimentazione del gas sono molto vicini all'asse del bruciatore.

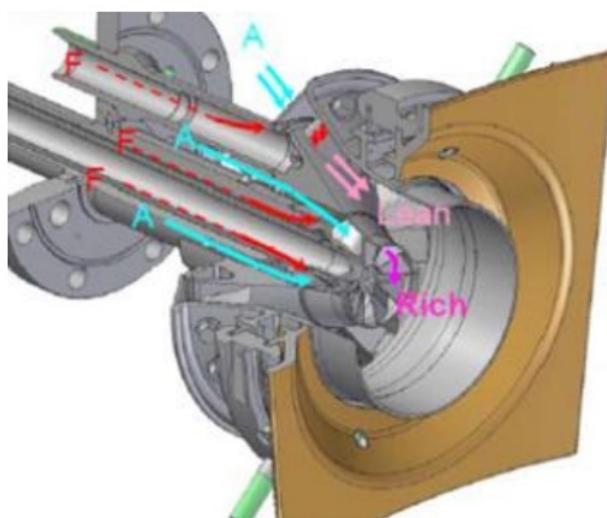


FIGURA 1.2: Spaccato del bruciatore VeLoNOxTM, in rosso si notano i condotti di adduzione del gas, mentre in azzurro quelli dell'aria.

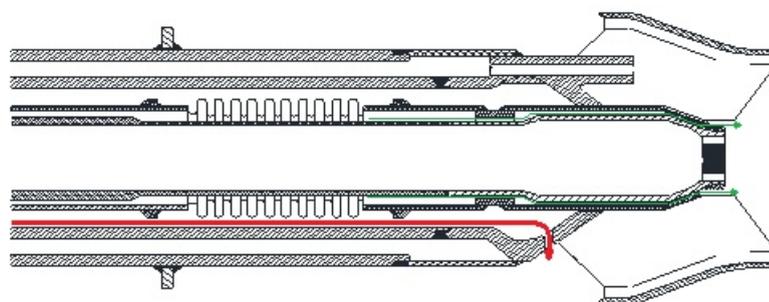


FIGURA 1.3: Sezione del bruciatore, anche in questo caso si nota il condotto di adduzione del combustibile VeLoNOxTM (in rosso) e quello della Lancia (in verde).

La lancia a gas è stata in origine ideata poiché si è rilevata, attraverso prove sperimentali, l'esistenza di un piccolo trafilemento di combustibile della linea pilota tra la Lancia e la testa del bruciatore. Questo trafilemento non controllato crea una piccola zona diffusiva immediatamente successiva all'uscita del corpo assiale, che rende la fiamma più stabile. Si è rilevato che con la fessura completamente tappata la stabilità della fiamma peggiora notevolmente, mentre viceversa l'incremento dell'area di passaggio del trafilemento comporta una maggiore stabilità di fiamma, a discapito di una maggiore produzione di inquinanti. Il problema è che il suddetto trafilemento non può essere controllato manualmente nel VeLoNOxTM convenzionale, si è quindi studiato l'inserimento di una nuova linea per poterne gestire le portate in modo vantaggioso per il processo combustivo.

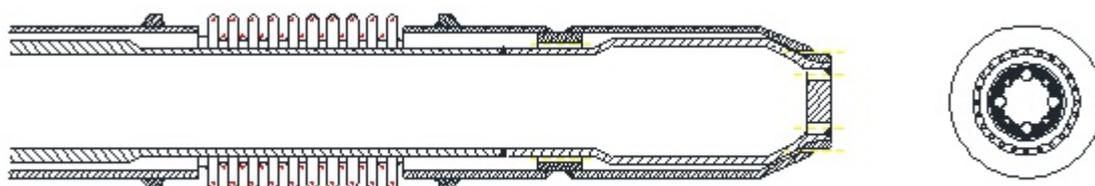


FIGURA 1.4: Dettaglio del componente *Lancia gas*.

L'immissione del combustibile in camera avviene attraverso una corona di 24 fori di diametro 1,4 mm posti sulla testa della lancia, tale linea mantiene la fiamma stabile soprattutto ai carichi parziali, emettendo però più emissioni inquinanti.

N.B. La nomenclatura VeLoNOxTM identificherebbe in realtà il bruciatore completo, in pratica il nome viene utilizzato anche per riferirsi al solo condotto di immissione del combustibile presente nel corpo assiale (vedi figura 1.3).

1.2 Tecnica LIF

La tecnica di diagnostica fluidodinamica alla base dell'attività è nota come *Laser Induced Fluorescence* (LIF). Questo metodo consente misure istantanee, quantitative e planari di mixing molecolare, è largamente affermato e vanta numerose possibilità di applicazione. Il fenomeno fisico di interesse per la LIF è la radiazione luminosa emessa da molecole di determinate sostanze (nel nostro caso acetone) che dopo essere state eccitate tramite una luce ultravioletta, decadono nello stato fondamentale emettendo luce nello spettro del visibile. Per tale motivo la misura proposta necessita un insieme di strumenti, intorno ai quali è stato pensato e realizzato il set-up sperimentale, descritto nei paragrafi seguenti.

Un comune utilizzo della tecnica LIF è lo studio del mixing di diversi flussi gassosi, con particolare riferimento a modelli di combustione non premiscelata. In questi casi, infatti, la conoscenza delle modalità di mixing fra aria e combustibile permette di indagare il profilo della fiamma e quindi la effettiva distribuzione del calore in camera di combustione. La tecnica LIF si presta quindi in modo particolare allo studio effettuato, poiché essa permette di quantificare istantaneamente le condizioni di miscelamento dei reagenti a livello molecolare, parametro base delle reazioni chimiche.

Dopo aver miscelato una sostanza tracciante al flusso oggetto di studio, questo deve essere intercettato da una luce laser ultravioletta volta a stimolare la luminescenza delle molecole. Tale radiazione ricade nello spettro del visibile, e pertanto può essere acquisita da un dispositivo ad accoppiamento di carica (*charge-coupled device*, CCD). Le camere CCD sono apparati elettronico-ottici estremamente sensibili alla luce, costruite solitamente con chip di silicio, e hanno il compito di trasformare i fotoni in ingresso in segnali elettronici digitali che possono essere trasferiti su PC per ottenere immagini di oggetti normalmente non apprezzabili con la semplice fotografia, e per analizzare quanta luce viene emessa dall'area inquadrata. Il software utilizzato su PC permette quindi di associare ad ogni pixel dell'immagine un valore indice della luminosità media di tale pixel che, nel caso dell'acetone, è con ottima approssimazione proporzionale al numero di molecole di tracciante presenti nel volume elementare. In ultimo, sotto le giuste condizioni di calibrazione del sistema (spiegate nei capitoli successivi), è possibile associare ad ogni valore della luminosità dei singoli pixel la concentrazione locale di tracciante presente nel flusso di aria, fornendo così profili di dispersione sia istantanei che mediati nel tempo.

E' importante specificare che l'unico fenomeno di luminescenza del tracciante che è stato acquisito è quello della fluorescenza, mentre si è fatto in modo di non acquisirne la fosforescenza. La fluorescenza è caratterizzata dal passaggio degli elettroni dell'atomo di acetone all'orbita esterna adiacente, subito dopo gli stessi decadono al livello precedente, emettendo luce visibile.

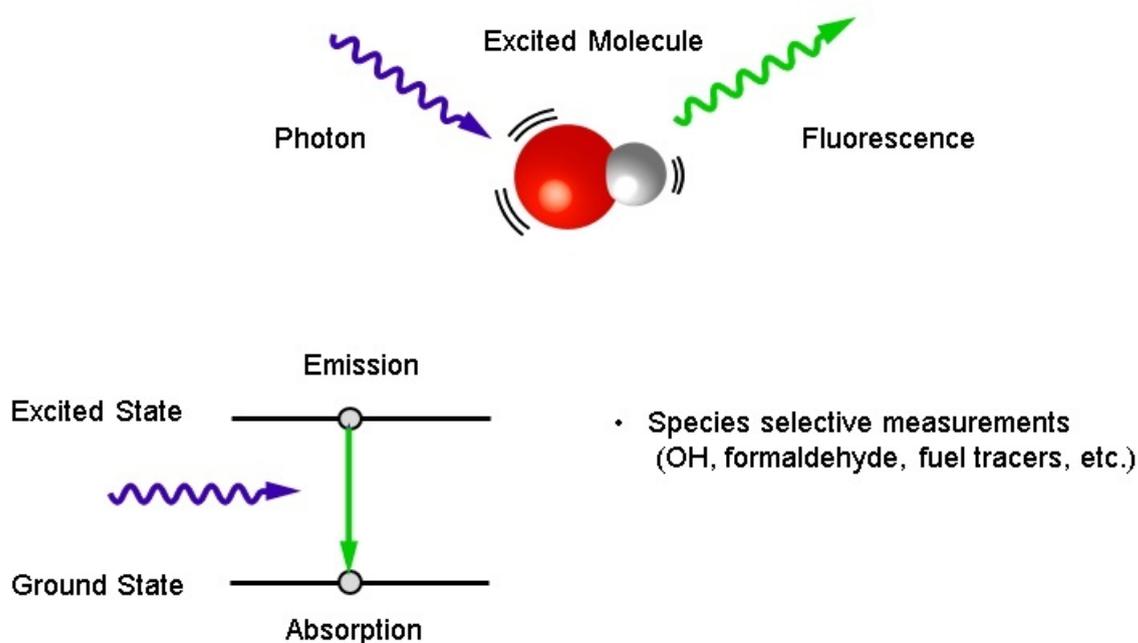


FIGURA 1.5: Fluorescenza della molecola di acetone.

Tale fenomeno ha una brevissima durata, generalmente compresa tra 1 e 100 *ns* (circa 4 *ns* nel caso dell'acetone), pertanto difficilmente risente del cosiddetto *quenching*. Con questo termine si identifica lo smorzamento e l'assorbimento della radiazione luminosa visibile ad opera di determinate molecole, su tutte l'acqua, i metalli e l'ossigeno. Diversamente dalla fluorescenza, il fenomeno della fosforescenza si protrae per tempi più lunghi dopo l'interruzione della sorgente eccitante, anche per alcuni millisecondi. In un lasso di tempo così esteso lo smorzamento da parte dell'ossigeno sarebbe preponderante.

Tali problematiche (intrinseche della LIF) sono spiegate in modo approfondito nella letteratura, ricorrendo alle espressioni analitiche del *lifetime* τ e della *quantum efficiency* ψ (numero di fotoni emessi per fotone assorbito).

$$\tau = \frac{1}{k_r + k_{nr} + k_q[Q]}$$

$$\Psi = \frac{k_r}{k_r + k_{nr} + k_q[Q]}$$

In queste espressioni compaiono le costanti di grado radiativo (K_r) e non-radiativo (K_{rn}), caratteristiche della molecola eccitata, la costante di quenching (K_q) e la concentrazione dell'elemento smorzante *quencher* (Q), che nel nostro studio sarà l'ossigeno.

Dalle equazioni prima riportate deriva la relazione di Stern-Volmer, che lega la durata e l'efficienza in presenza del quencher ai corrispondenti valori in sua assenza, ovvero per $Q = 0$:

$$\frac{\Psi_0}{\Psi} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + \tau_0 k_q [Q]$$

È quindi chiaro che l'ossigeno presente in ambiente porta alla riduzione dell'intensità di luminescenza e della durata dell'emissione. Tuttavia, grazie alla brevissima durata della fluorescenza dell'acetone, è lecito assumere che questa non risenta in modo apprezzabile della presenza dell'ossigeno, rendendo quindi tale sostanza il tracciante ideale nello studio di flussi gassosi.

Studi più approfonditi hanno indagato l'effettivo smorzamento della fosforescenza dell'acetone, inseminando e confrontando immagini relative a flussi di aria e di solo azoto. I risultati mostrano che l'intensità della radiazione emessa in presenza di ossigeno viene smorzata rispetto a quella in solo azoto secondo la legge esponenziale riportata:

$$I_{em} = I_0 e^{-t/\tau}$$

dove τ indica il tempo dopo cui l'intensità cala del 37% (ossia $1/e$).

E' quindi chiara l'esigenza di fissare accuratamente le tempistiche di acquisizione delle immagini, in funzione del fenomeno che si intende osservare e studiare.

Di notevole importanza nella tecnica LIF è infine la conoscenza delle lunghezze d'onda dei fenomeni coinvolti. La luce laser incidente sul flusso inseminato ha lunghezza d'onda pari a 266 nm, la luce emessa per fluorescenza dall'acetone ha lunghezza d'onda centrata tra 400 e 450 nm.

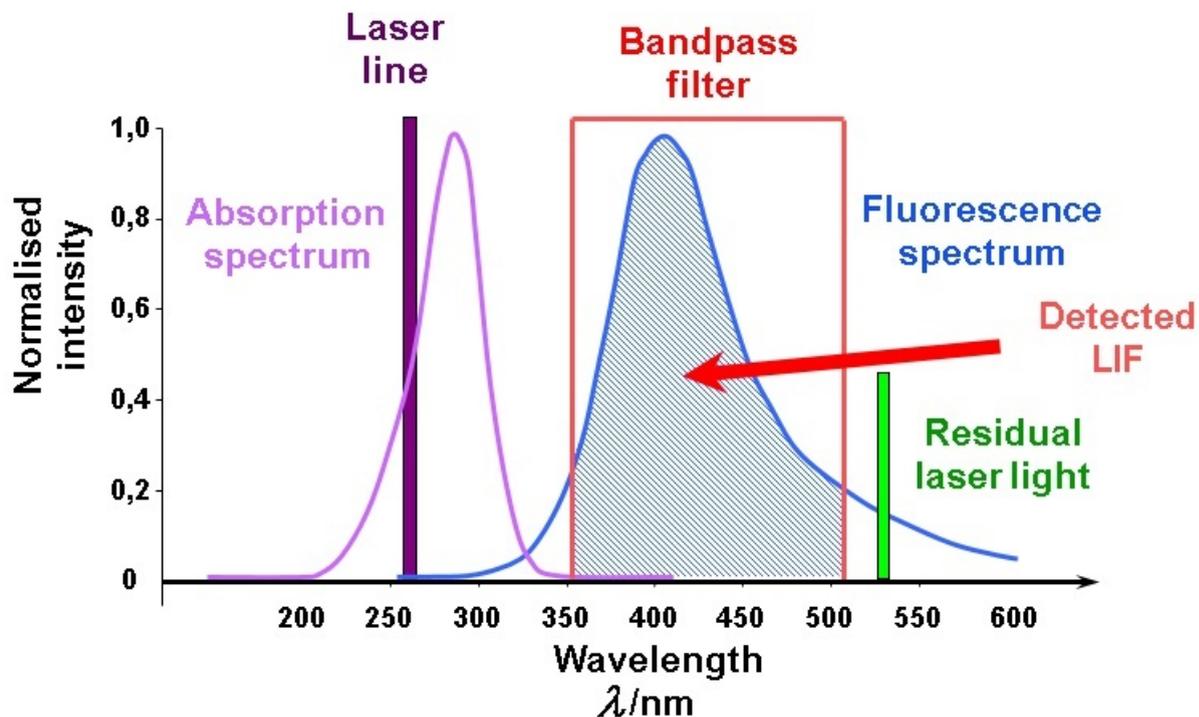


FIGURA 1.6: Lunghezze d'onda dei fenomeni in gioco

L'andamento dell'intensità della fluorescenza in funzione della concentrazione di tracciante è stato considerato con buona approssimazione lineare, almeno in un range di concentrazione non troppo elevato (lo stesso range di valori in cui si è andati a lavorare durante le misure vere e proprie). Oltre ad un certo valore, il riassorbimento di parte dell'intensità della fluorescenza da parte dello stesso acetone fa perdere linearità al fenomeno, ovvero si tende alla saturazione.

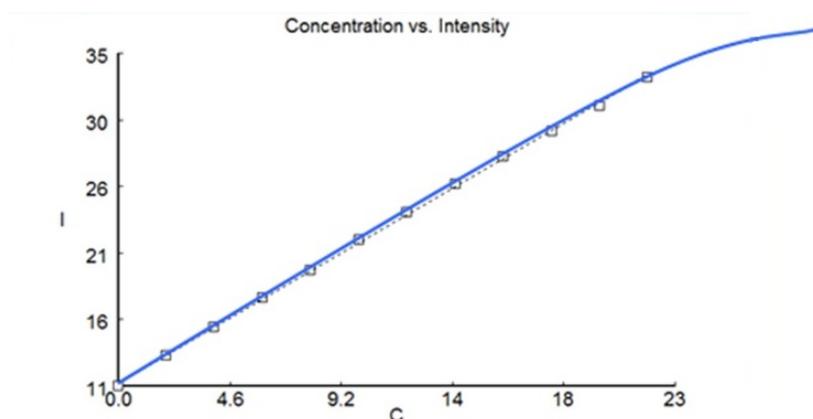


FIGURA 1.7: Esempio di calibrazione per diversi valori di intensità, è possibile notare l'andamento non lineare per valori di concentrazione elevati.

1.3 Scalatura dalle condizioni di macchina

Come precedentemente introdotto, l'attività svolta ha riguardato lo studio del mixing dei flussi di aria e tracciante all'uscita del bruciatore, questo per permettere all'Azienda di gettare le basi per campagne di misura più approfondite sul componente in prova.

Per avere una traccia da seguire durante l'assegnazione delle portate dei flussi da studiare, è stato effettuato un calcolo di scalatura rispetto alle varie condizioni di macchina. Per cercare di ottenere informazioni attendibili sul comportamento del bruciatore in condizioni nominali, si è scelto di procedere rispettando la similitudine della velocità dei flussi all'uscita del dispositivo, poiché essa costituisce un parametro fondamentale nello sviluppo del mixing. In questo modo le portate da assegnare durante le prove vengono ridotte rispetto a quelle di macchina secondo un fattore derivato dalle grandi differenze di densità dei fluidi coinvolti.

Dall'equazione della portata è noto che:

$$v = \frac{M}{\rho A}$$

Poiché le nostre prove sono condotte direttamente sul bruciatore di dimensioni standard, le dimensioni dei condotti e dei fori di sbocco non cambiano, pertanto esse non comportano il calcolo di alcun fattore di scalatura.

Volendo quindi realizzare la similitudine dei campi di velocità, avremo che:

$$M_{scalata} = M_{macchina} \frac{\rho_{scalata}}{\rho_{macchina}}$$

Il flusso di aria comburente (assunta a 20 bar e 400 °C) viene simulato con una portata di aria ambiente (assunta a 1 bar e 18 C). Assumendo il modello di gas perfetto, si calcola il rapporto fra la densità dell'aria in condizioni di prova e di macchina¹.

$$\frac{\rho_{scalata-air}}{\rho_{macchina-air}} = \frac{1}{8.6}$$

La portata di metano (assunto iniettato in macchina a 15 °C e 20 bar, quindi con densità di circa 14,4 kg/m³) verrà simulata con flusso di aria inseminata con acetone.

¹ Si considerano variazioni della densità linearmente proporzionali alla pressione e all'inverso della temperatura assoluta (in accordo con il modello di gas perfetto)

Trascurando la quantità di tracciante trasportata nel flusso, il rapporto tra la densità del flusso usato in prova e quella del combustibile vale:

$$\frac{\rho_{scalata-air}}{\rho_{macchina-CH_4}} = \frac{1}{11}$$

Le portate assegnate in prova verranno quindi ridotte rispetto a quelle di macchina di un fattore 8.6 per l'aria comburente, e di un fattore 11 per il flusso inseminato atto a simulare il combustibile.

Capitolo 2

Setup sperimentale e tecniche utilizzate

2.1 Descrizione laboratorio e linee aria

L'attività è stata svolta presso il laboratorio di fluidodinamica di Ansaldo Energia. I test bench presenti in laboratorio sono:

- *linea 10000*, utilizzata per fornire aria prelevata in atmosfera fino ad una portata massima di $10000 \text{ m}^3/h$
- *linea 6000*, utilizzata per fornire aria prelevata in atmosfera fino ad una portata massima di $6000 \text{ m}^3/h$
- *linea pressurizzata*, utilizzata per fornire aria compressa con portata e pressione massime rispettivamente di $150 \text{ m}^3/h$ e 600 kPa

Tutte le linee sono equipaggiate con misuratori di portata massica e di temperatura e trasduttori di pressione, sono inoltre presenti una serie di valvole regolabili in modo da poter controllare opportunamente i flussi.

Il laboratorio Ansaldo è specializzato in misure ottiche, le tecniche maggiormente utilizzate sono: Particle Image Velocimetry (PIV), Laser Induced Fluorescence (LIF) e Laser Doppler Velocimetry (LDV).¹

¹ A seconda della tecnica utilizzata è possibile misurare rispettivamente il campo di moto istantaneo, il grado di mixing o la velocità di correnti fluide.

Si passa quindi a descrivere nel dettaglio l'impianto sperimentale scelto e realizzato per le misure, composto da:

- Condotta di flusso primario
- Condotta di flusso secondario e sistema di insemminazione aria (con relativa strumentazione)

Si è deciso di utilizzare come linea primaria la linea 6000, mentre quella pressurizzata è stata utilizzata come linea secondaria per l'insemminazione del flusso.

La condotta di flusso primario consiste in una linea in grado di fornire aria ambiente ad una cassa aria (*plenum*) che permette al fluido di non sperimentare eccessiva turbolenza e garantisce una buona assialsimmetria del flusso d'aria che la attraversa, oltre che una uniforme distribuzione di pressione. Tale linea incanala il flusso che in condizioni di funzionamento normale del bruciatore è riservato alla sola aria comburente. La portata di aria è regolabile agendo sulla frequenza di alimentazione di un ventilatore da 20 kW, mentre tramite un misuratore massico-termico di tipo *ST75 Series Flowmeters* vengono monitorate la portata e la temperatura dell'aria fornite dalla linea. L'uscita di tale cassa presenta una apertura atta al montaggio dell'oggetto in prova.

La condotta di flusso secondario consiste in una linea alimentata da compressore in grado di fornire aria pressurizzata, la portata del flusso è regolabile tramite valvole a spillo manuali e monitorabile grazie ad un sensore massico-termico *ST75 Series Flowmeters*.

Tale linea è dedicata all'alimentazione dei condotti del bruciatore che, in condizioni di macchina, sono adibiti al trasporto di metano. Essendo oggetto di studio il mixing del combustibile, il flusso in transito su questa linea deve essere insemminato.

La linea conduce ad un secondo misuratore di portata *Bronkhorst* montato in serie al già menzionato sensore massico-termico, poiché quest'ultimo è dotato di sensibilità piuttosto limitata alle basse portate. Il flusso viene a questo punto convogliato nell'insemminatore, componente responsabile dell'immissione di una quantità variabile di acetone vaporizzato. La miscela così ottenuta viene guidata in modo da distribuirsi in modo controllato fra due diramazioni, ciascuna in grado di alimentare uno dei due circuiti di alimentazione del bruciatore, ossia *VeLoNOxTM* e *Lancia* (descritti nel paragrafo [1.1 a pagina 2](#)).

Le portate di flusso miscelato (opportunamente indirizzate di caso in caso) vengono valutate interponendo su ciascuna delle due linee di immissione un apposito misuratore massico (*Brooks* e *Bronkhorst*), sostanzialmente simili al precedente. Per differenza fra le portate a monte e a valle dell'insemminatore è quindi possibile valutare la quantità istantanea di acetone vaporizzato nel flusso.

Contemporaneamente vengono effettuate delle misure di pressione a valle dei due misuratori di portata, interponendo dei trasduttori di pressione *Siemens* opportunamente tarati (0-150 *mbar* relativi).

In laboratorio è stato infine installato un apposito sistema di aspirazione, necessario per il corretto ricambio dell'aria interna in cui viene disperso l'acetone vaporizzato.



FIGURA 2.1: Vista generale del laboratorio, si possono vedere il sistema di aspirazione (in giallo) e la linea secondaria (sulla parete in fondo.)

2.2 Progetto montaggio hardware

La prima fase dell'attività sperimentale consiste nella verifica della possibilità di realizzare il set-up necessario ad effettuare la misura. Quindi identificare il test bench più adatto e realizzare eventuali attrezzature necessarie per montare o predisporre il componente alla prova specifica. In particolare è stato necessario progettare in Autocad e far realizzare ex-novo una flangia circolare in acciaio. Essa presenta un'apertura centrale per permettere il montaggio del corpo assiale, ed è dotata di opportuni fori asolati per realizzare il corretto allineamento verticale.

Si è inoltre resa necessaria la progettazione di una serie di componenti ausiliari, pensati per rispondere a precise esigenze:

- simulazione delle perdite di carico dovute alla normale presenza del diagonale (non presente nelle nostre prove) a monte dell'assiale. L'obiettivo è stato raggiunto montando sul componente una sottile lamiera circolare attorno al corpo assiale, ancorata ad esso tramite flange a "C"
- possibilità di rotazione del gruppo bruciatore senza la necessità di separarlo dalla struttura portante, da qui la decisione di realizzare fori asolati sulla flangia di supporto
- solidità strutturale e sostegno. Si è fatto quindi affidamento sul tubo premix², un robusto cilindro normalmente presente nella macchina in condizioni operative, che nel nostro caso è stato posizionato nel suo incastro sul corpo assiale e saldato alla flangia di sostegno. Questo solo componente è stato in grado di sorreggere l'intera struttura
- possibilità di agevole manutenzione

Si rimanda all'Appendice A per i disegni in Autocad di tutti i componenti realizzati.

² Il tubo premix è il condotto che normalmente alimenta il diagonale, in questa esperienza è stato utilizzato solamente come elemento strutturale. Si rimanda all'appendice A per i disegni.

2.3 Configurazione del sistema di acquisizione immagini

Il sistema ottico è composto da laser, fotocamera, intensificatore, filtro ottico e software necessario per l'analisi delle immagini. I diversi componenti sono gestiti da un PC, che attraverso una centralina (*timer box*) invia i segnali di trigger secondo i tempi impostati dall'utente nel programma.

Il laser è stato predisposto in modo da rispondere a trigger comandati da computer ed emettere contemporaneamente due radiazioni luminose, che di norma sono separate da un breve intervallo di tempo; ciò permette, una volta posizionato ed allineato il dispositivo rispetto al piano di misura previsto, di emettere fasci di luce di massima intensità e perfettamente verticali, passanti per il centro della lancia. Il piano di misura scelto è infatti quello verticale, di conseguenza la fotocamera è stata posizionata lateralmente rispetto al dispositivo in prova.



FIGURA 2.2: Posizionamento della telecamera rispetto all'oggetto in prova

La fase di posizionamento ha richiesto una notevole quantità di tempo per la difficoltà di allineare in maniera ottimale la lama laser con il piano di misura. A questo si aggiungono le difficoltà incontrate nel posizionamento e nella messa a fuoco della telecamera, in modo da ottenere una zona di misura sufficientemente estesa ma non inutilmente dispersiva.

A causa dell'elevata pericolosità del laser, l'allineamento è stato effettuato in condizioni di energia minima, in modo che ci fosse il minore rischio possibile per gli occhi.

In ogni caso tutti gli operatori presenti in laboratorio durante l'utilizzo del laser sono

stati dotati di opportuni occhiali protettivi, in grado di schermare le lunghezze d'onda nocive.



FIGURA 2.3: Laser DanTec Dynamics montato su un supporto in grado di regolarne la posizione con precisione.

Prima di raggiungere l'obiettivo della fotocamera, l'immagine passa attraverso il filtro ottico e viene elaborata dall'intensificatore. Il filtro ottico passabanda è necessario per permettere il passaggio delle sole lunghezze d'onda della luce emessa per fluorescenza, eliminando la luce laser residua giunta al sistema ottico a causa di possibili riflessi. Questo permette di registrare solamente la luce utile (compresa tra i 300 nm ed i 500 nm), massimizzando l'efficacia dell'acquisizione. Il segnale della fluorescenza filtrato è tuttavia molto debole, e deve quindi essere amplificato per poter essere acquisito correttamente dal CCD. Per fare ciò si utilizza un intensificatore con schermo ai fosfori, installato tra il filtro e la fotocamera. Ciò rende quindi necessaria una duplice messa a fuoco, ossia dell'intensificatore rispetto alla zona da inquadrare e contemporaneamente della fotocamera rispetto allo schermo ai fosfori. Per evitare la saturazione dello schermo dell'intensificatore è necessario intervenire sulla luminosità dell'immagine regolando l'apertura del diaframma dell'obiettivo e variando il guadagno dell'intensificatore stesso tramite PC.

Per proteggere l'ambiente e minimizzare i riflessi della parte visibile della luce prodotta, e di conseguenza migliorare lo sfondo delle immagini acquisite, la zona di prova è stata confinata e, dove possibile, sono stati installati pannelli o tendaggi neri.

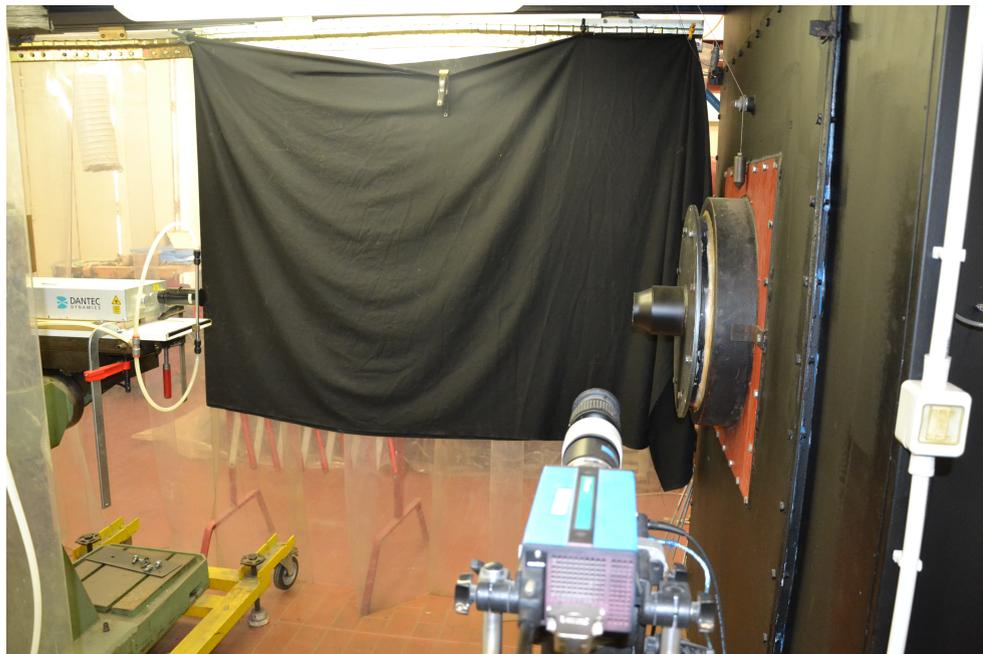


FIGURA 2.4: In questa immagine è possibile notare il tendaggio nero utilizzato per minimizzare i riflessi presenti, e la verniciatura nera del componente.

È stato infine fondamentale stabilire correttamente le tempistiche con cui far operare laser e fotocamera. Infatti, gli intervalli di tempo in cui si sviluppano i fenomeni utili all'acquisizione delle immagini sono dell'ordine dei nanosecondi.

Come già accennato, per coordinare con precisione i componenti si è fatto uso di una timer box, che tramite settaggi da PC ha permesso di impostare gli intervalli fra i vari comandi di trigger. Nello specifico, i tempi di cui si è dovuto tenere conto sono:

- Trigger del laser
- Emissione *Flash lamp* del laser
- Lampeggio del laser (apertura *Q-switch*)
- Trigger alla fotocamera
- Apertura diaframma fotocamera
- Apertura diaframma intensificatore
- Tempo di rilassamento immagine intensificatore

Il software utilizzato permette di regolare il tempo di inizio di tutti questi fenomeni, considerando l'istante t_0 quello in cui viene lanciato l'impulso del laser.

Di fondamentale importanza è regolare l'apertura degli otturatori di fotocamera ed intensificatore, in modo da catturare il maggior segnale di fluorescenza possibile, evitando però la luce generata dal flash del laser, e limitando il più possibile la luminosità dell'ambiente. È possibile in ogni caso anticipare l'apertura del diaframma della fotocamera rispetto all'istante zero, in quanto essa non riceve luce fintanto che non viene aperto anche il diaframma dell'intensificatore. Anticipare l'apertura del primo diaframma è importante in quanto è un'operazione caratterizzata da un tempo abbastanza lungo rispetto agli altri fenomeni in gioco. Per massimizzare l'intensità del segnale di fluorescenza raccolto è importante che l'apertura del diaframma dell'intensificatore coincida con l'emissione della fluorescenza, mentre l'apertura del diaframma della telecamera deve sovrapporsi al tempo di emissione dello schermo ai fosfori.

Inoltre, per evitare di raccogliere la luce emessa dal laser e catturare più fluorescenza possibile, l'apertura del diaframma dell'intensificatore è stata impostata in modo da essere immediatamente successiva all'impulso del laser.

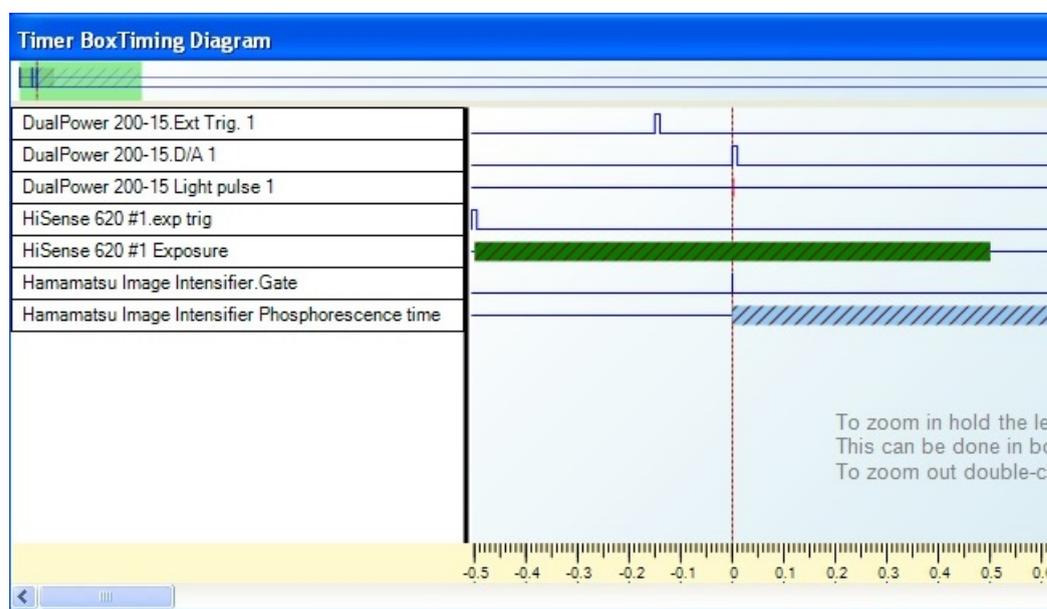


FIGURA 2.5: Particolare del diagramma dei tempi, in rosso si nota l'impulso del laser che coincide con l'istante zero. In verde si vede il tempo in cui il diaframma della fotocamera rimane aperto, mentre in azzurro è indicato il tempo di decadimento dei fosfori dell'intensificatore.

2.4 Taratura MFC

Per registrare i dati forniti da tutti i misuratori di portata e dai trasduttori di pressione si è fatto uso del software *Measurement & Automation Explorer (MAX)*, che ha permesso la creazione di vari database relativi a ciascuna delle configurazioni di misura prossimamente presentate. Ad ogni strumento collegato al software sono assegnati un canale di lettura ed una scala, necessaria per la conversione istantanea del valore restituito dal sensore (Volts o Ampere) in valori di interesse, espressi in kg/h o g/s per le portate e $mbar_{rel}$ per le pressioni.

Per i tre misuratori massici è stato necessario individuare la scala da applicare mediante una procedura dedicata, mentre per gli altri strumenti di misura utilizzati convenzionalmente in laboratorio tale scala era già stata individuata.

Nel paragrafo [2.1 a pagina 11](#) sono già stati introdotti i misuratori di portata massica appena citati, fondamentali per la registrazione di dati su cui basare l'analisi delle immagini. Per acquisire misure corrette è stato quindi necessario effettuarne la taratura. Questa è stata eseguita per confronto con il misuratore massico-termico *ST75 Series Flowmeters* installato sulla linea secondaria a monte dei misuratori oggetto di calibrazione, considerato come riferimento. Regolando la portata d'aria della linea tramite valvola a spillo e attendendo volta per volta una situazione di regime stabile, sono state rilevate con un voltmetro i segnali in tensioni restituiti in uscita dai tre sensori da tarare, ciascuno analizzato singolarmente in serie a quello di riferimento. Così facendo è stato possibile creare (con supporto Excel) tre rette *portata massica - tensione* da associare a ciascun misuratore.

E' importante notare che la taratura è stata effettuata con varie portate di sola aria. Durante le misure, la portata di acetone vaporizzato è stata assunta avente lo stesso calore specifico dell'aria (data la sua minor percentuale).

Una volta definite le scale di lettura, sono state eseguite opportune verifiche sia con sola aria ripartita casualmente fra le due diramazioni della linea secondaria, sia con flusso inseminato.

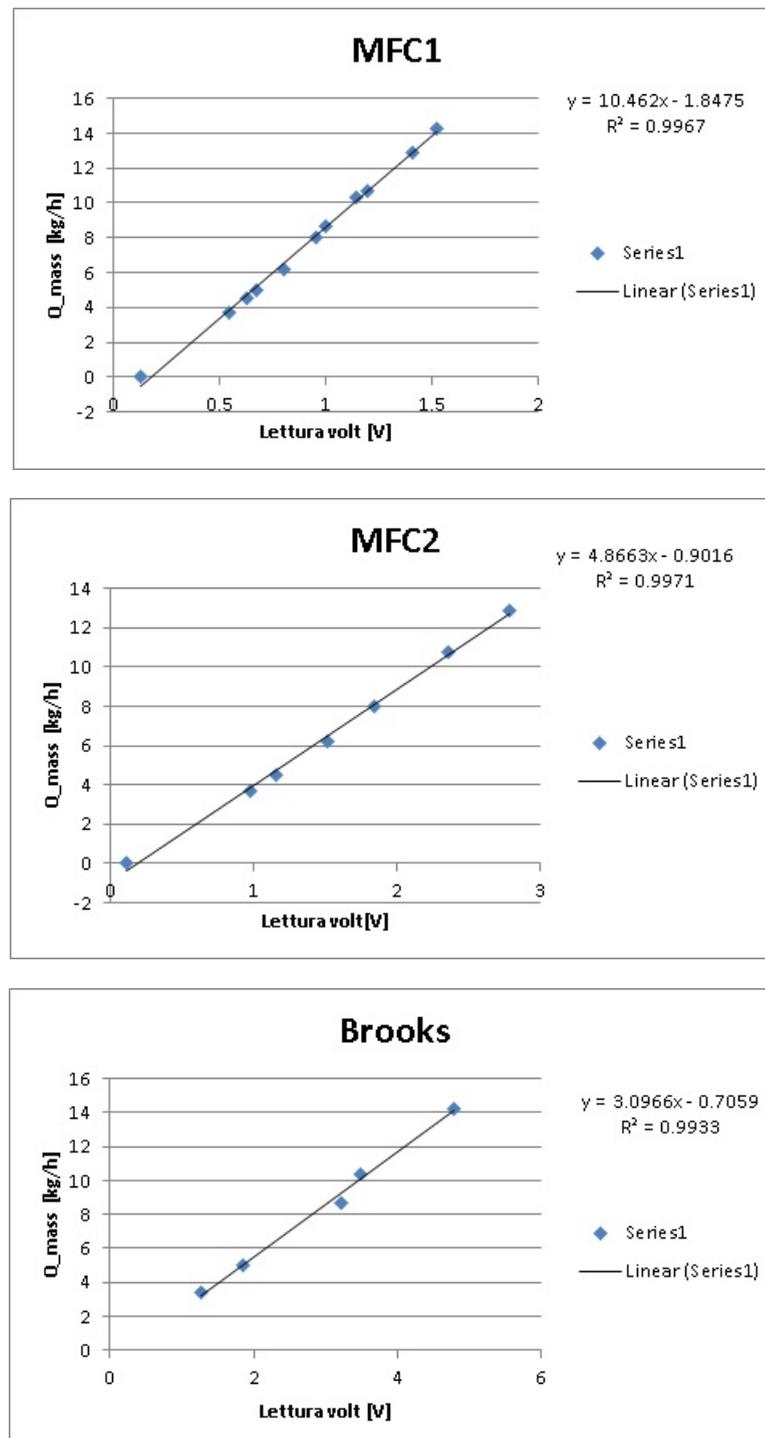


FIGURA 2.6: Rette di taratura relative ai tre misuratori massici utilizzati.

2.5 Bilanciamento lama laser

Il dispositivo laser utilizzato è caratterizzato dal fatto di produrre una lama laser divergente, pertanto la distribuzione di radiazione luminosa nel piano di misura è variabile, nello specifico molto maggiore nella zona centrale. Non è quindi possibile ipotizzare che il fascio di luce emessa sia ad intensità uniforme sul piano di misura.



FIGURA 2.7: Confronto fra lama laser ideale e reale.

Per tenere conto di questo fenomeno è quindi necessario caratterizzare la lama laser tramite una procedura di bilanciamento dell'immagine. Per fare ciò è stato necessario realizzare una distribuzione uniforme di tracciante, in modo tale da acquisire un'immagine indice dell'effettiva divergenza della lama. Sulla base di questa immagine è stata realizzata una maschera di bilanciamento da sovrapporre a tutte le immagini acquisite durante le misure.

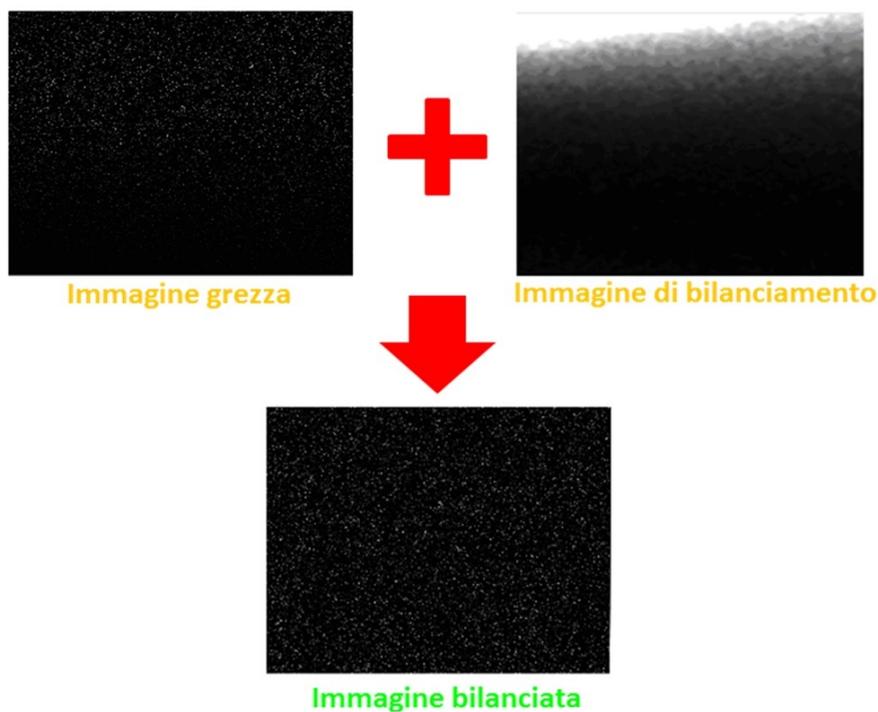


FIGURA 2.8: Esempio di bilanciamento di un'immagine grezza.

Tale maschera è necessaria a correggere la disuniformità presente ai bordi della lama laser ed evitare di ottenere immagini falsate da questa problematica. Chiaramente la procedura di calibrazione è riferita alle particolari condizioni in cui è stata effettuata, per questo motivo le immagini di misura sono state successivamente acquisite nelle stesse identiche condizioni hardware e software con cui è stato precedentemente calibrato il sistema.

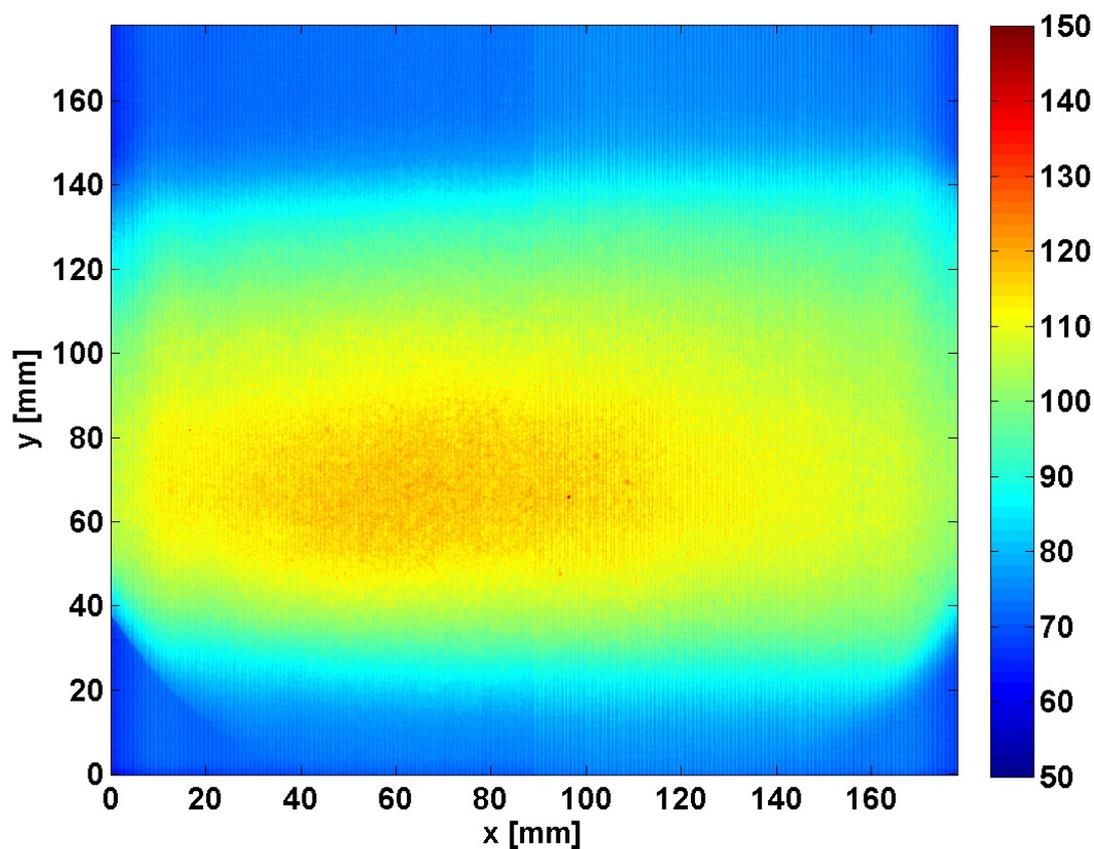


FIGURA 2.9: Immagine di bilanciamento in cui sono evidenti le disuniformità legate alla forma della lama e i confini oltre cui la stessa è molto debole o completamente assente.

Dall'immagine rilevata a concentrazione costante si nota come siano assolutamente evidenti i limiti intrinseci della lama laser utilizzata, e come sia particolarmente importante effettuare la procedura di bilanciamento, in quanto le differenze di intensità luminosa (e quindi di concentrazione associata) sarebbero tali da falsare in modo rilevante le immagini.

2.6 Calcolo della concentrazione di tracciante

Ogni immagine acquisita associa a ciascun pixel un valore numerico, proporzionale alla luminosità emessa dall'acetone. Per determinare in ciascun punto dell'immagine una corrispondenza tra la luminosità e la concentrazione, è necessario conoscere il volume associato a ciascun pixel (d'ora in avanti chiamato *volume elementare*), e la densità dell'acetone, necessaria per calcolarne la massa.

Data la risoluzione della fotocamera ogni immagine è un quadrato il cui lato è composto da 2048 pixel.

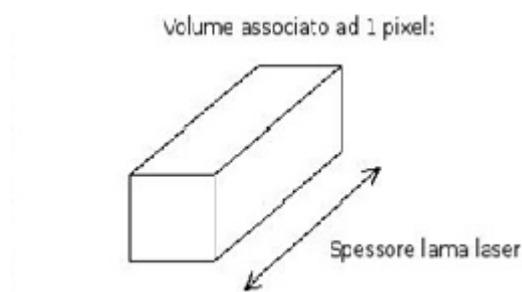


FIGURA 2.10: La regione di interesse viene suddivisa in volumetti elementari, ciascuno dei quali è associato a 1 pixel della fotocamera.

Il passaggio dalla scala in pixel ad una scala in millimetri è stato possibile grazie all'impiego di un target millimetrato, dividendo una lunghezza nota per il numero di pixel corrispondenti a tale lunghezza.

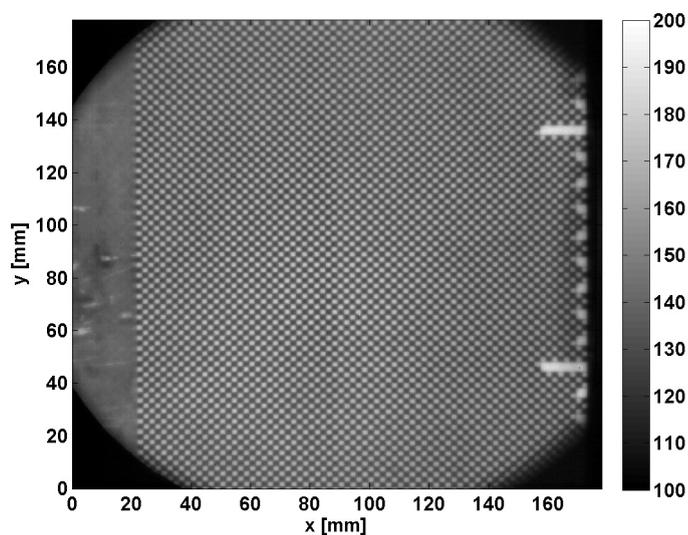


FIGURA 2.11: Target millimetrato utilizzato per passare da una misura in pixel ad una in millimetri.

La sezione del parallelepipedo elementare è stata quindi associata ad un quadrato con lati di lunghezza pari a 0.087 mm , il lato lungo del volumetto è invece pari allo spessore della lama laser, pari a 1.5 mm . In questo modo, il volume elementare considerato vale 0.011 mm^3 .

Tale valore è ovviamente caratteristico della geometria del sistema, ed è indipendente dalla variazione di parametri come le portate dei flussi o la quantità di acetone inseminato.

Il calcolo della densità dell'acetone dipende invece dalla particolare portata del flusso scelta per la misura. Per creare la scala di concentrazione occorrono due o più punti che corrispondono a diverse quantità di acetone presenti nel campo di indagine.

E' importante precisare che durante questa fase sono state fatte tre ipotesi semplificative:

1. Concentrazione del flusso secondario costante ed uniforme lungo tutta la linea
2. Flusso non diluito in un intorno della zona di uscita
3. Modello di gas perfetto

Così facendo, è possibile associare ad un volume elementare nella zona considerata la densità del flusso valutata a monte del foro. Di seguito è riportato il procedimento utilizzato per calcolare la concentrazione dell'acetone.

La densità della miscela aria-acetone vale:

$$\rho_{miscela} = \frac{P_{air}PM_{air} + P_{ac}PM_{ac}}{RT}$$

dove:

- P_{air} =pressione parziale dell'aria
- P_{ac} =pressione parziale dell'acetone
- PM_{air} =peso molecolare dell'aria
- PM_{ac} =peso molecolare dell'acetone

Conoscendo la frazione in massa di acetone è possibile ricavare le pressioni parziali, e da qui, utilizzando la formula riportata sopra, si ottiene la densità del flusso secondario.

$$P_{air} = \frac{N_{air}P}{N}$$

$$P_{ac} = \frac{N_{ac}P}{N}$$

dove:

- P =pressione della miscela
- N =numero di moli totali per unità di volume
- N_{air} =numero di moli di aria per unità di volume
- N_{ac} =numero di moli di acetone per unità di volume

Per calcolare il numero di moli si utilizzano le seguenti relazioni:

$$N_{air} = \frac{\%_{air}}{M_{air}}Qt$$

$$N_{ac} = \frac{\%_{ac}}{M_{ac}}Qt$$

$$N = N_{air} + N_{ac}$$

dove:

- Q =portata massica della miscela
- t =durata del lampeggio del laser³
- $\%_{air}$ = % in peso di aria
- $\%_{ac}$ = % in peso di acetone
- M_{air} =peso molare aria⁴
- M_{ac} =peso molare dell'acetone

La temperatura e la pressione ambiente, necessarie per completare il calcolo in questione, sono note in quanto acquisite in tempo reale nel corso della misura.

³ Questa grandezza viene considerata poichè le quantità in gioco devono essere integrate sulla durata del lampeggio

⁴ Si considera il peso molecolare dell'aria secca(75% N_2 , 23.16% O_2 , 1.30% Ar)

A questo punto la densità dell'acetone all'interno del flusso secondario è nota da:

$$\rho_{ac} = \frac{P_{ac}PM_{ac}}{RT}$$

E' quindi possibile calcolare la massa ed il numero di molecole di acetone presenti nel volume elementare.

$$m_{ac} = \rho_{ac}V$$

$$Molecole_{ac} = \frac{m_{ac}}{PM_{ac}}Na$$

La tabella seguente riporta in forma sintetica i valori delle costanti utilizzate.

Costante	Valore	udm
PM_{air}	29.0918364	<i>g/mol</i>
PM_{ac}	58.0794	<i>g/mol</i>
t	$1.50E - 8$	s
R	8.314472	<i>J/(molK)</i>
Na	$6.0221413E + 23$	<i>mol⁻¹</i>

TABELLA 2.1: Costanti utilizzate nel calcolo della densità

I valori così ottenuti sono fondamentali nel processo di calibrazione LIF, che consente di legare l'intensità dei pixel dell'immagine alla concentrazione di tracciante, come descritto nel paragrafo seguente.

2.7 Calibrazione LIF

Per poter associare a ciascun valore dell'intensità luminosa di ogni pixel il corrispondente valore di concentrazione di gas insemillante, è necessario effettuare una preliminare operazione di calibrazione del software di acquisizione ed elaborazione delle immagini.

L'intensità della fluorescenza che viene emessa in un dato punto è legata sia alla quantità di tracciante presente, sia all'intensità della lama di laser nel punto stesso. Oltre a questo vi è il problema che l'immagine prima di essere acquisita dalla fotocamera deve passare attraverso l'intensificatore, dotato di un certo guadagno, e attraverso un diaframma che regola la quantità di luce che raggiunge il sensore. Per tutti questi motivi le misure ottenute sono legate univocamente alla particolare configurazione hardware adottata.

La procedura utilizzata consiste nell'ottenere una serie di immagini a concentrazione nota, in modo da creare una retta che associ ad ogni valore di intensità luminosa un determinato valore di concentrazione. Per ottenere una distribuzione nota di tracciante nella regione di interesse si è utilizzata una linea ausiliaria che facesse uscire un flusso insemillato da un ugello in corrispondenza dello zona di misura⁵. Il massimo valore di intensità rilevato è stato quindi associato al valore di acetone presente, noto grazie alle misure effettuate tramite i due misuratori massici in serie alla linea utilizzata, rispettivamente a monte e a valle dell'insemillatore, e alla procedura descritta nel paragrafo precedente. Tale procedimento è corretto in quanto si può assumere che esattamente allo sbocco del tubo il flusso insemillato non interagisca con l'aria circostante.

La figura seguente mostra un esempio della procedura utilizzata per rilevare il massimo valore di concentrazione allo sbocco.

⁵ E' stato utilizzato un tubo di diametro opportuno, in modo da avere una perdita di carico il più possibile simile a quella della linea gas, a parità di portata

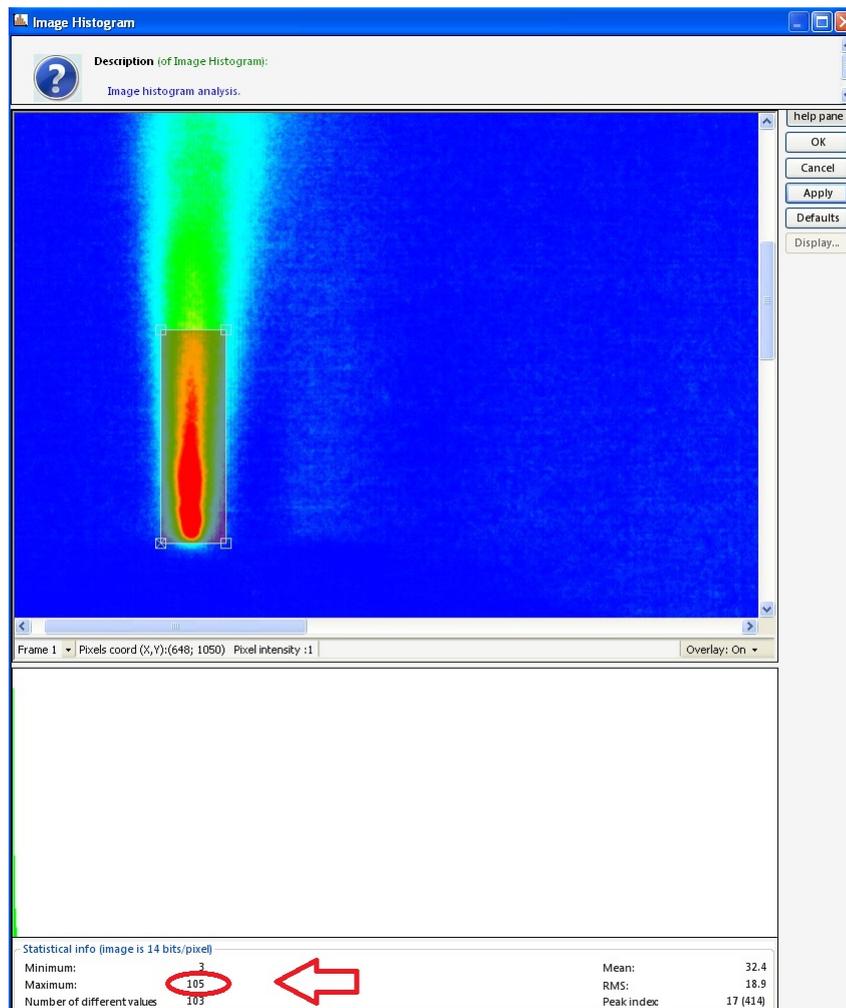


FIGURA 2.12: Procedura di visualizzazione del valore massimo dei pixel nella zona in cui la concentrazione è il 100% tramite il sistema Image Histogram. Nell'esempio mostrato il massimo rilevato è 105.

Inizialmente si è acquisita un'immagine senza flusso, in modo da associarla al valore zero. Il massimo valore di intensità relativo alle successive immagini, acquisite per diversi valori di flusso inseminato, è stato quindi sommato all'immagine a concentrazione nulla precedentemente acquisita, in modo da creare una serie di immagini a concentrazione nota.

E' opportuno eseguire queste operazioni per almeno dieci immagini, in modo da avere una valutazione il più precisa possibile della retta che lega l'intensità dei pixel alla concentrazione in un dato punto.

Nella pagina seguente sono mostrate alcune delle immagini utilizzate per la procedura di calibrazione.

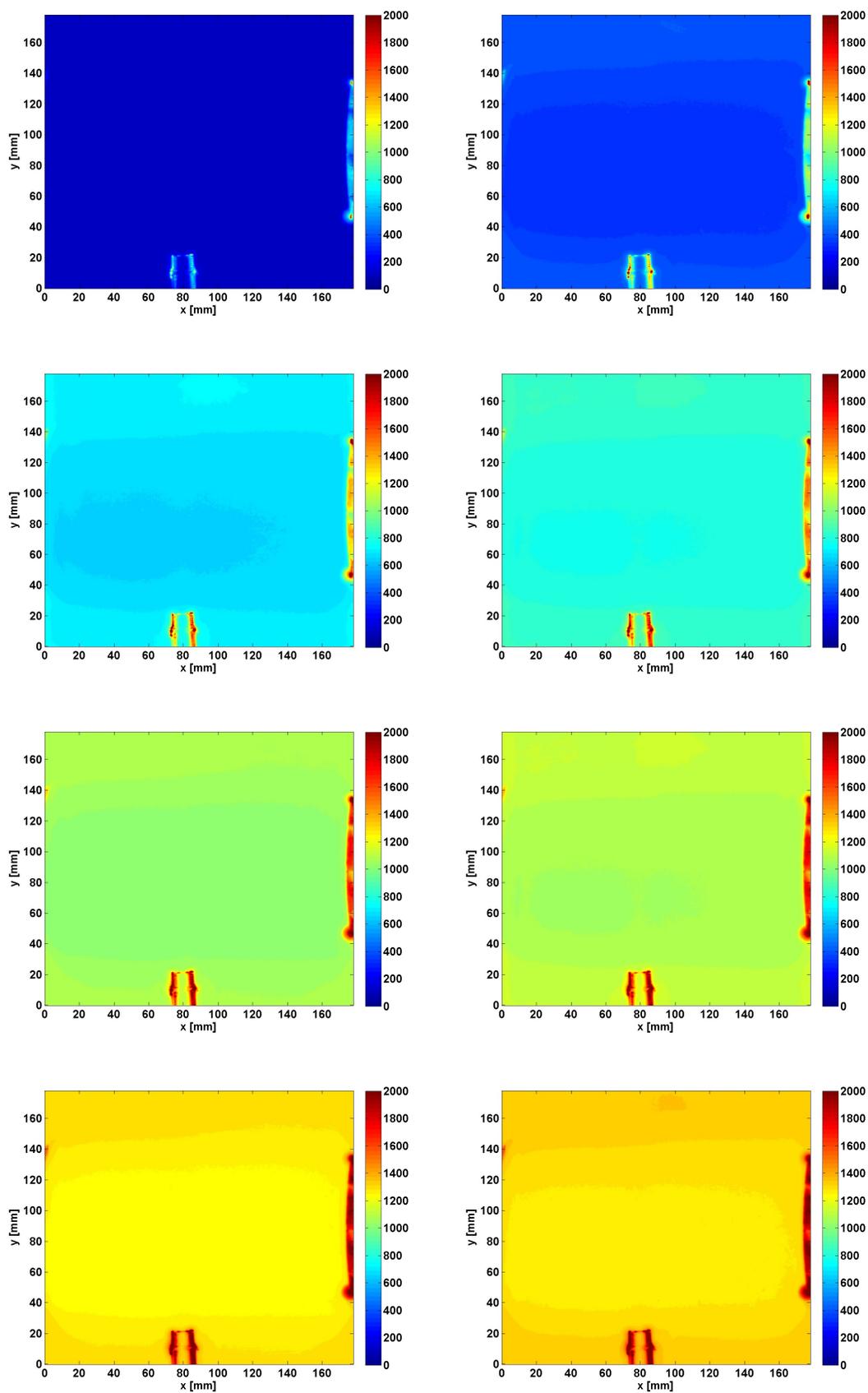


FIGURA 2.13: Immagini a concentrazione crescente usate per la calibrazione.

M_{aria} [kg/h]	M_{ac} [kg/h]	ρ_{ac} [kg/m ³]	m_{ac} [g]	$Num_{molecole}$
3.92	0.43	1.25934	1.41057E-09	1.46256E+13
5.24	0.35	1.23723	8.77766E-10	9.10117E+12
5.28	0.66	1.26985	1.59876E-09	1.65769E+13
5.33	0.27	1.22865	6.71238E-10	6.95977E+12
5.39	0.02	1.20106	5.0312E-11	5.21664E+11
5.44	0.37	1.23869	8.93841E-10	9.26785E+12
5.54	1.13	1.31646	2.52716E-09	2.6203E+13
5.58	0.09	1.20745	2.1717E-10	2.25174E+12
6.10	0.71	1.26754	1.49742E-09	1.55261E+13
7.96	2.04	1.34390	3.10648E-09	3.22097E+13

TABELLA 2.2: Valori numerici utilizzati durante la taratura, non è riportato il valore relativo alla concentrazione nulla.

I dati così raccolti sono stati utilizzati in modo da creare una retta di calibrazione da poter utilizzare per effettuare delle misure quantitative. Si noti che, come precedentemente spiegato, gli ultimi due punti acquisiti tendono alla saturazione per l'effetto di riassorbimento da parte dell'acetone. Le rette che si ottengono considerando o meno questi ultimi punti differiscono di molto, per l'attività si è deciso di utilizzare la retta segnata in rosso.

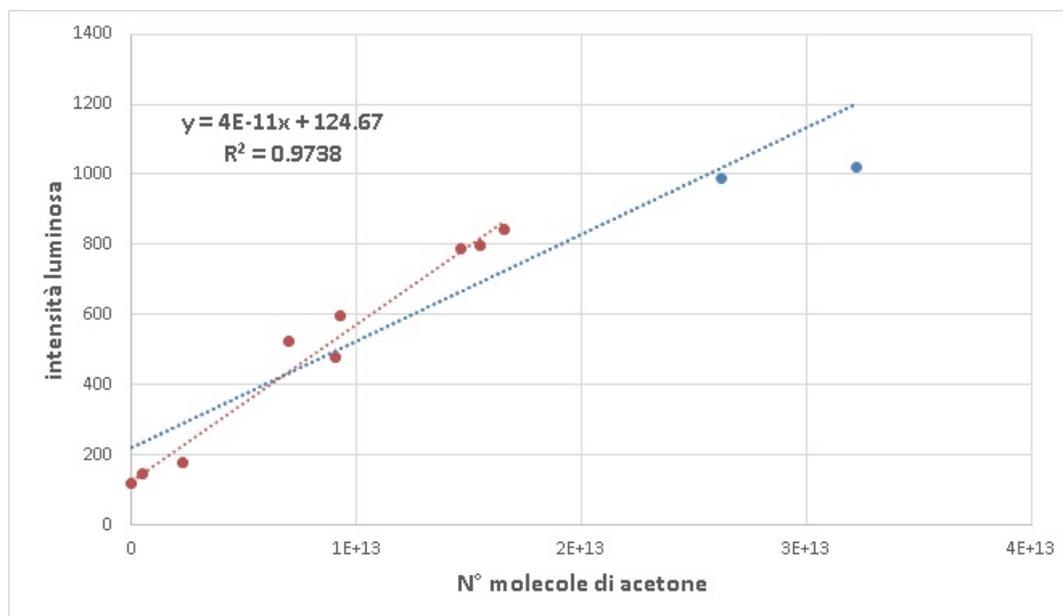


FIGURA 2.14: Rette di taratura derivanti dai punti acquisiti, riportano l'intensità luminosa di ogni pixel in funzione del numero di molecole di acetone in esso presenti. Quella utilizzata per l'esperienza è segnata in rosso e se ne presenta l'equazione.

2.8 Calcolo del rapporto combustibile-aria ϕ

In questa sezione viene presentato lo studio del rapporto fra le moli di combustibile e le moli di aria, definito come ϕ , valutato in ogni punto della regione di interesse.

A partire dai risultati relativi al numero di molecole di tracciante precedentemente descritti (si veda la sezione 2.7 a pagina 27) è stata definita una procedura per ottenere mappe bidimensionali di ϕ nelle varie condizioni di prova.

Da quanto presentato nel cap 2.6 a pagina 23, conoscendo le portate di acetone vaporizzato e di aria necessaria al suo trasporto, tramite i pesi molari, si calcolano le moli di acetone N_{ac} e di aria N_{air} .

Il rapporto fra le moli della miscela (aria + acetone) e le moli di acetone fornisce il *fattore di scala* f .

$$f = \frac{N_{ac} + N_{air}}{N_{ac}}$$

Il fattore di scala permette di definire la quantità *gas equivalente*, come:

$$gas_{eq} = N_{ac}N_a f$$

La definizione di quest'ultima grandezza è fondamentale in quanto per simulare un flusso di combustibile è per forza necessario utilizzare una miscela di aria e tracciante, la cui composizione varia in funzione dell'efficienza istantanea dell'inseminatore (non costante). Si considera quindi che tutta la portata secondaria simuli il combustibile.

Ricordando l'assunzione semplificativa del modello di gas perfetto, ed introducendo l'ulteriore ipotesi di pressione costante nella regione di interesse, è possibile definire ϕ come:

$$\phi = \frac{gas_{eq}}{0.23(Num_{molecole} - gas_{eq})}$$

dove:

- 0.23 è un fattore che tiene conto della percentuale in massa di ossigeno nell'aria
- $Num_{molecole}$ rappresenta il numero di molecole di gas perfetto presenti in un volume elementare in condizioni ambiente⁶

Questo passaggio è fondamentale in quanto consente di passare da un risultato puramente qualitativo, che evidenzerebbe solamente quali sono le regioni di spazio considerato in cui vi è più tracciante, ad uno quantitativo in cui si evidenzia il rapporto combustibile-aria.

⁶ Il valore utilizzato è stato calcolato assumendo che il rapporto fra un volume ed il numero di molecole di gas perfetto contenute in esso sia costante.

Capitolo 3

Misure ed elaborazione dati

Una volta effettuata la procedura di calibrazione e di taratura di tutti i componenti necessari alle misure vere e proprie, si è passati alla configurazione hardware definitiva per le prove. Il design pensato per l'esperimento ha permesso di ottenere risultati in condizioni molto differenti fra loro, inserendo il flusso secondario in modalità e condizioni diverse a seconda della condizione di macchina che si voleva simulare.



FIGURA 3.1: Differenti condotti di immissione del combustibile, dall'alto verso il basso: VeLoNOx™, Pilota (non utilizzato) e Lancia.

Ogni linea è stata dotata di una o più valvole di intercettazione in modo da poter essere isolata dal resto dell'impianto nel momento in cui non si volesse utilizzare.

E' stata inoltre installata una valvola a farfalla a monte dei due misuratori massici

posti in uscita dell'inseminatore. Questo accorgimento è necessario per poter regolare il più finemente possibile il modo in cui il flusso inseminato si ripartisce fra le due linee (VeLoNOxTM e Lancia). Andando ad agire sulla perdita di carico di uno dei due condotti è stato possibile infatti ripartire le portate di acetone in modo tale da coprire tutto il range di possibile funzionamento del dispositivo in macchina.

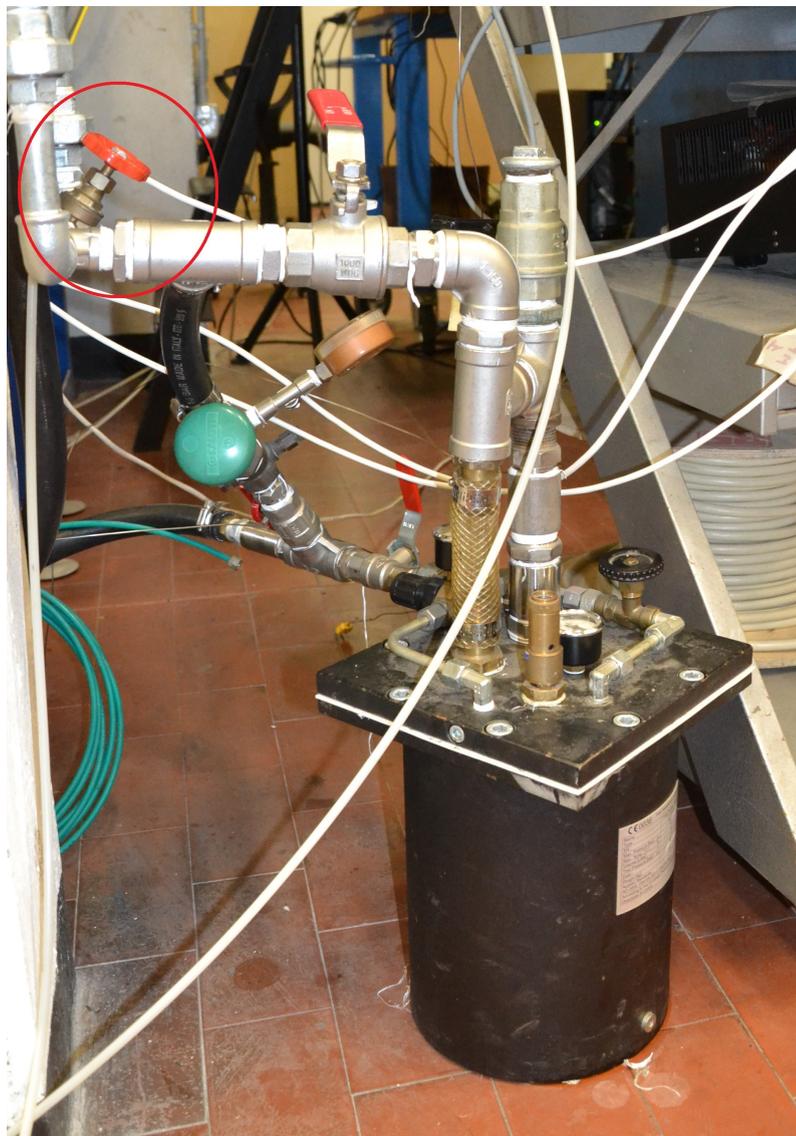


FIGURA 3.2: Particolare dell'inseminatore, in rosso si nota la valvola utilizzata per regolare la ripartizione del flusso fra le due linee.

3.1 Procedura di elaborazione immagini

Come già accennato in precedenza, la sola acquisizione delle immagini tramite il software utilizzato non è sufficiente per ottenere una conoscenza dettagliata del fenomeno in gioco. Le operazioni che sono state effettuate sulle immagini acquisite sono elencate di seguito, nello stesso ordine in cui sono state eseguite.

1. Sottrazione dell'immagine di fondo
2. Bilanciamento dell'immagine per tenere conto della divergenza della lama
3. Passaggio dal valore di intensità luminosa di ogni pixel al corrispondente numero di molecole di tracciante
4. Calcolo del valore di ϕ per ogni pixel dell'immagine

Per i primi due step è stato sufficiente lo stesso software utilizzato per l'acquisizione ed il salvataggio delle immagini, ovvero *DynamicStudio* prodotto da *Dantec Dynamics*, la stessa società produttrice del sistema laser. Il terzo ed il quarto passaggio hanno invece richiesto la scrittura di un breve codice in linguaggio Matlab.

Le figure seguenti mostrano il passaggio dall'immagine grezza (su cui sono già stati effettuati i primi due step) all'immagine rappresentativa di ϕ , passando per la rappresentazione del numero di molecole di tracciante.

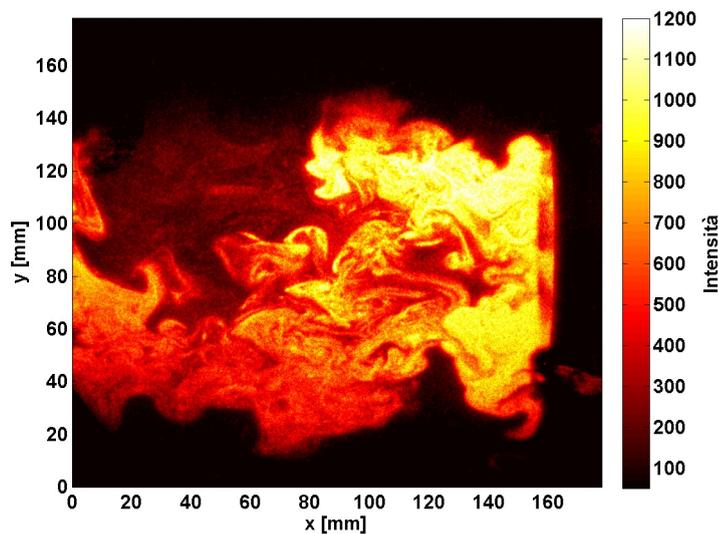


FIGURA 3.3: Immagine grezza bilanciata e con fondo sottratto.

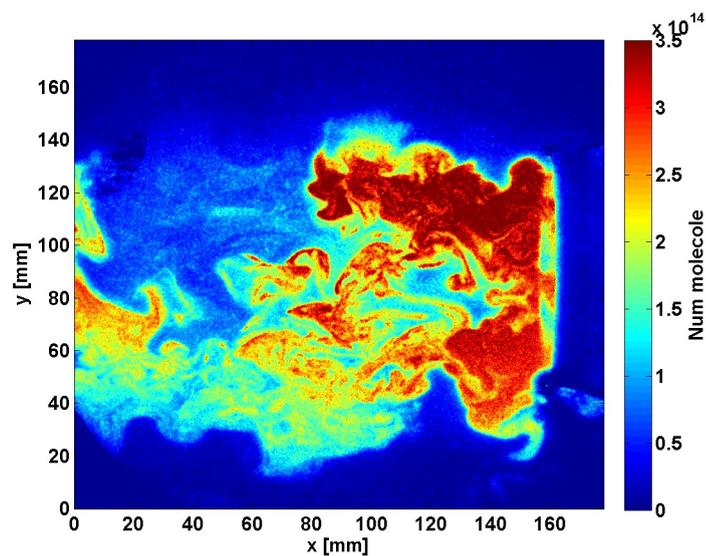


FIGURA 3.4: Immagine relativa al numero di molecole di tracciante.

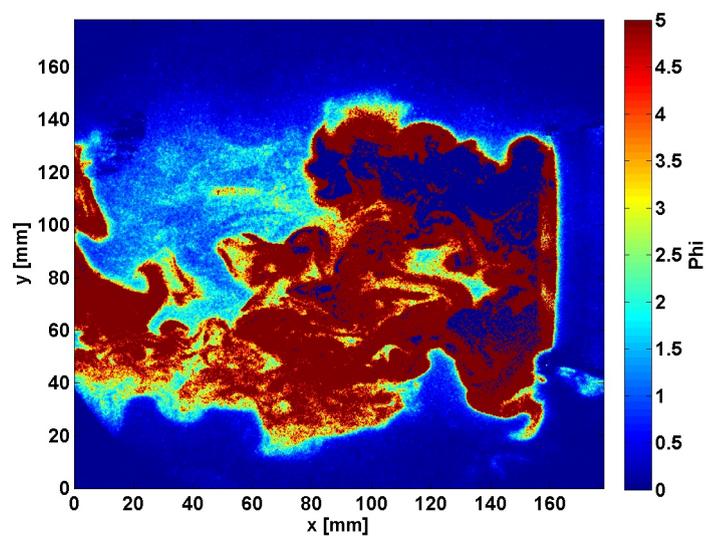


FIGURA 3.5: Immagine finale rappresentativa di ϕ . La macchia blu che si nota all'interno del flusso è dovuta a fenomeni di condensazione locale dell'acetone. Non essendo presente aria principale, in quella zona è presente solo *gas equivalente* puro.

3.2 Misure

Le misure sono state effettuate per tre diverse configurazioni di alimentazione del bruciatore. (Si rimanda all'immagine 1.3 a pagina 4, che mostra i diversi canali utilizzati).

- Lancia
- VeLoNOxTM
- Lancia + VeLoNOxTM

In ogni configurazione sono state realizzate numerose acquisizioni al variare delle due portate.

Ciascuna acquisizione è costituita da una serie di 100 immagini istantanee. Oltre alle immagini istantanee, di ciascuna serie si considera anche l'immagine media. In ogni caso i fenomeni di diffusione locale dell'acetone (come i vortici) sono rilevabili solamente in alcune delle immagini istantanee, in quanto l'operazione di media effettuata tramite il software "elimina" le strutture fluidodinamiche non stazionarie.

Gli esperimenti sono stati condotti seguendo due modalità: nel primo caso si è mantenuta la portata principale costante nelle condizioni di scalatura precedentemente designate, aumentando la portata secondaria, ovvero quella di flusso iniettato, dal valore nullo fino ad un valore massimo. La seconda modalità di prove è stata invece condotta mantenendo un valore costante di flusso iniettato e aumentando gradualmente il flusso d'aria principale, anche in questo caso partendo da zero fino ad arrivare al valore massimo precedentemente utilizzato.

3.2.1 Portate di riferimento

In questa sezione sono riportati i valori derivanti dalla scalatura dalle condizioni di macchina (con riferimento al capitolo 1.3 a pagina 9). Per brevità, indicheremo la portata primaria come Q_1 , e la portata secondaria (ovvero quella totale di flusso inseminato) come Q_2 .

$Q_{1macchina}$ [g/s]	Fattore di scalatura	Q_{1prove} [g/s]
2200	8.6	256

TABELLA 3.1: Condizioni di prova relative alla portata di aria comburente.

$Q_{2macchina}$ [g/s]	Fattore di scalatura	Q_{2prove} [kg/h]
10	11	3.3
20	11	6.5
30	11	9.7
40	11	13.1
45	11	14.7
50	11	16.4

TABELLA 3.2: Condizioni di prova relative alla portata di combustibile alla Lancia.

$Q_{2macchina}$ [g/s]	Fattore di scalatura	Q_{2prove} [kg/h]
20	11	6.5
30	11	9.7
45	11	14.7
60	11	19.6

TABELLA 3.3: Condizioni di prova relative alla portata di gas al VeLoNOxTM.

$Q_{2macchina}$ [g/s]	Fattore di scalatura	Q_{2prove} [kg/h]
65	11	21.3

TABELLA 3.4: Condizioni di prova relative alla portata di gas a Lancia + VeLoNOx™.

A causa dei limiti riguardanti la massima portata elaborabile dalla linea primaria, le condizioni di riferimento per le prove sono state ulteriormente scalate di un fattore 2/3.

N.B. Nelle sezioni successive verranno riportate solamente le immagini relative al rapporto combustibile-aria, in quanto argomento finale della nostra indagine. Per poter apprezzare le differenze fra le varie condizioni di prova, il fondo scala associato ad ogni immagine è stato adattato ai diversi valori di ϕ riscontrati.

3.2.2 Lancia

Valori relativi alle prove effettuate sulla sola lancia

Condizione	Q_1 [g/s]	Q_2 [kg/h]	$M_{acetone}$ [kg/h]
L.1	0	9.3	1.2
L.2	20	9.13	0.97
L.3	41	9.58	1.26
L.4	61	9.53	1.18
L.5	81	9.4	1.1
L.6	100	9.29	1.05
L.7	120	9.1	1.1
L.8	140	9.5	1.1
L.9	160	9.6	1.1
L.10	170	2.18	0.36
L.11	170	4.5	0.54
L.12	170	6.2	1.02
L.13	170	8.63	1.23
L.14	170	9.9	1.1

TABELLA 3.5: Valori relativi alle prove effettuate sulla sola Lancia nelle due modalità di prova.

La prima serie di prove ha riguardato il solo condotto della Lancia gas, isolando invece quello relativo al VeLoNOxTM tramite le valvole inserite sulla linea.

Come già accennato, vengono riportate sia le immagini istantanee che quelle mediate su 100 immagini.

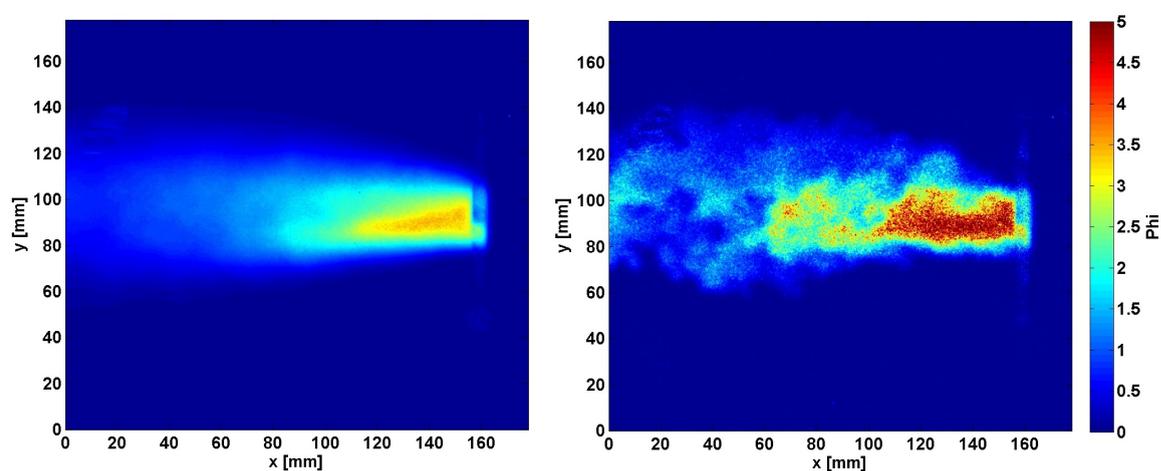


FIGURA 3.6: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.1.

Da questa prima immagine (acquisita in condizione di flusso primario nullo) si nota come l'andamento del flusso nell'immagine media sia quasi perfettamente simmetrico.

Le successive due immagini sono invece relative alle condizioni L.3 e L.5 (si veda la [tabella 3.5 nella pagina precedente](#)), in cui il flusso primario sale inizialmente a 41 g/s, e poi ad 81 g/s. E' possibile notare come la geometria del flusso in uscita cambi radicalmente non appena viene inserita l'aria principale, che tende a trascinare con se il combustibile in uscita dalla Lancia.

All'aumentare del flusso principale, il combustibile tende a disporsi sempre di meno nella zona centrale, la particolare conformazione che si ottiene è dovuta all'angolo di swirl della palettatura del corpo assiale.

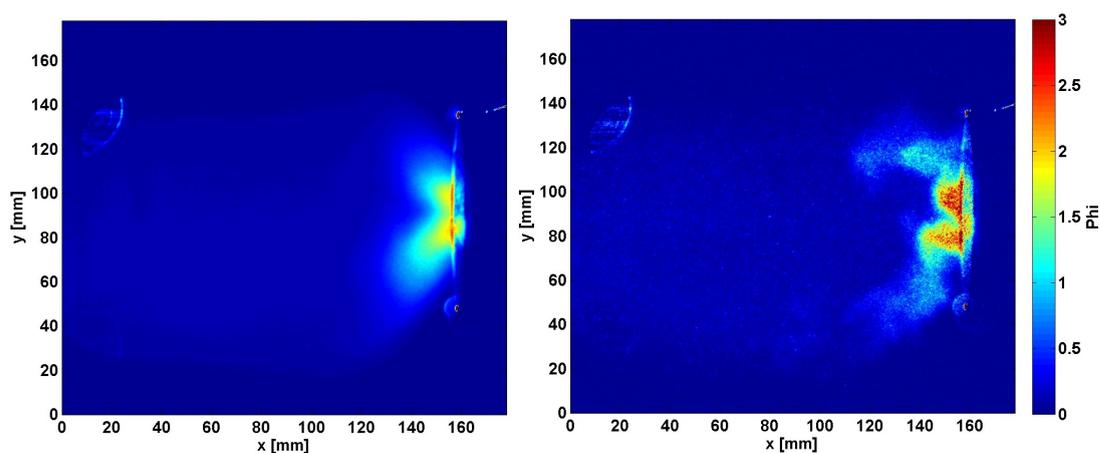


FIGURA 3.7: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.3.

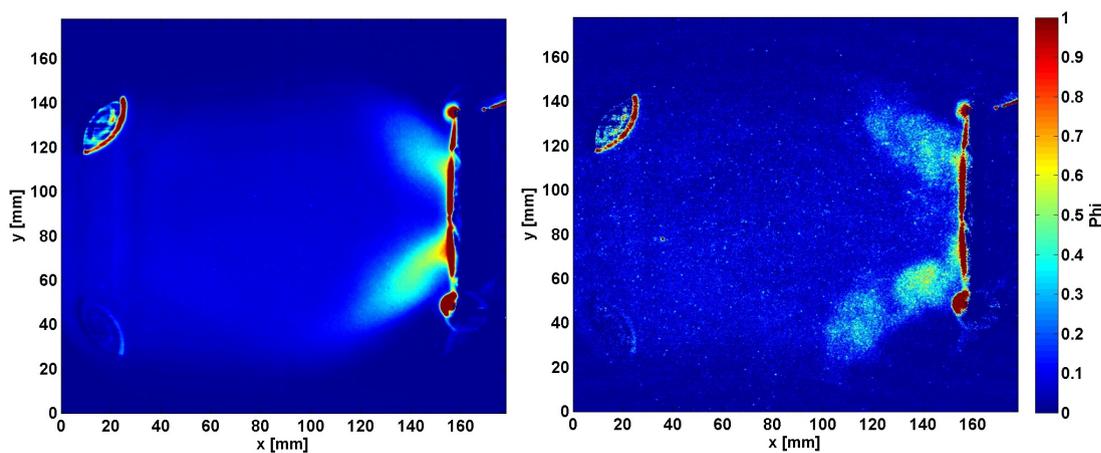


FIGURA 3.8: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.5.

Aumentando la portata di aria primaria fino al valore massimo di 170 g/s , si ottengono le immagini seguenti.

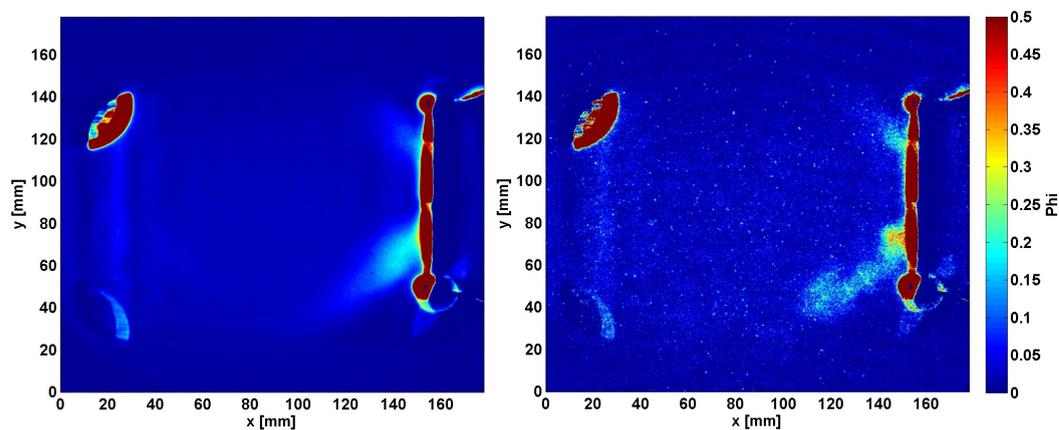


FIGURA 3.9: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.12.

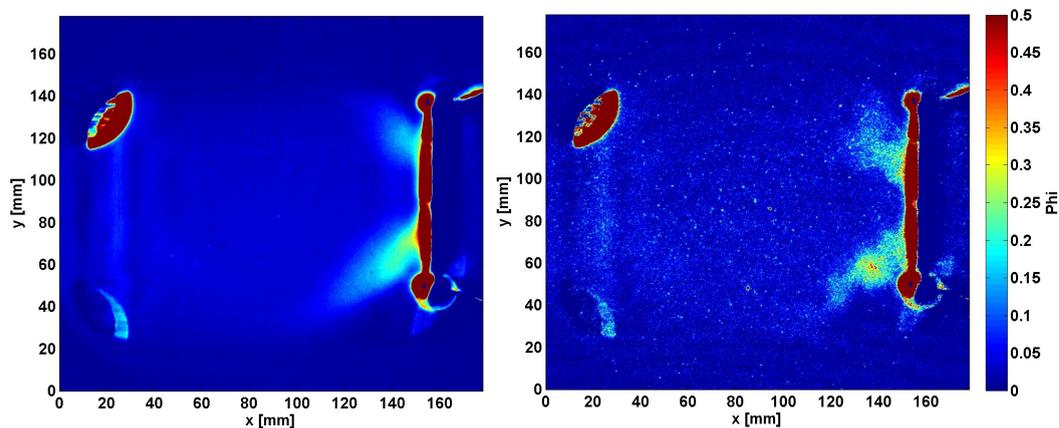


FIGURA 3.10: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.13.

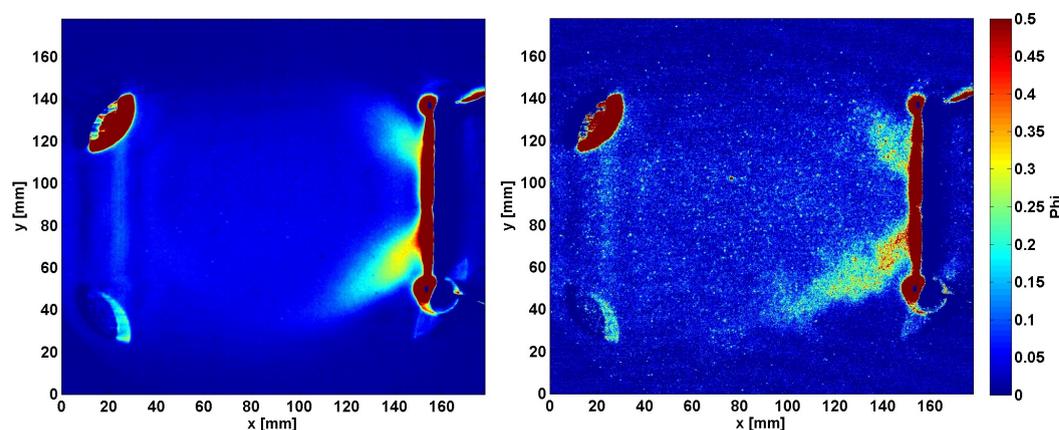


FIGURA 3.11: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione L.14.

In condizioni di flusso primario massimo l'acetone risulta molto diluito, la modalità di disposizione del tracciante rimane comunque pressochè inalterata.

3.2.3 VeLoNOxTM

Valori relativi alle prove effettuate sul solo VeLoNOxTM

Condizione	Q_1 [g/s]	Q_2 [kg/h]	$M_{acetone}$ [kg/h]
V.1	0	9.6	1.09
V.2	22	10.69	1.68
V.3	40	10.44	1.56
V.4	60	10.28	1.48
V.5	80	10.14	1.41
V.6	100	10	1.32
V.7	120	9.88	1.27
V.8	140	9.8	1.23
V.9	160	9.7	1.17
V.10	170	4.06	0.65
V.11	170	6.81	1.13
V.12	170	9.96	1.53
V.13	170	12.88	1.39

TABELLA 3.6: Valori relativi alle prove effettuate sul solo VeLoNOxTM nelle due modalità di prova.

La seconda serie di prove ha invece riguardato il solo condotto VeLoNOxTM.

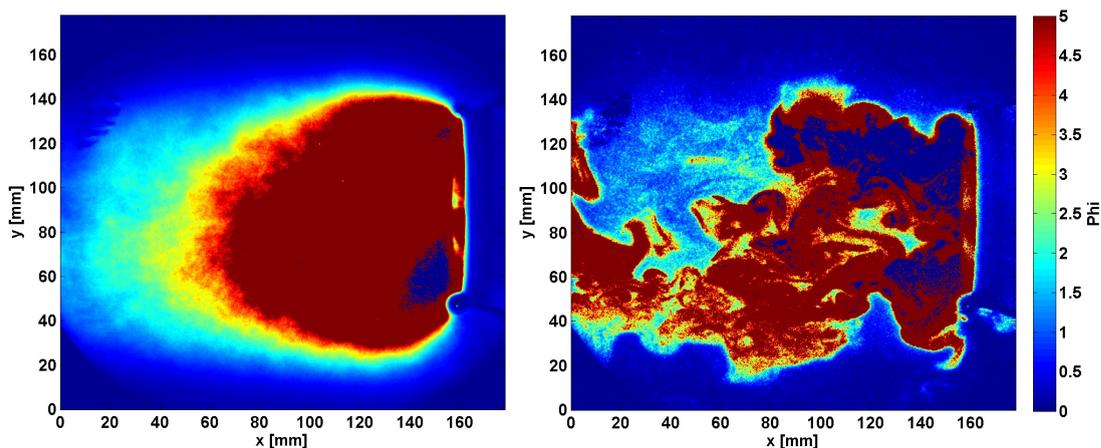


FIGURA 3.12: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione V.1.

L'immagine appena presentata mostra la condizione analoga a quella di figura 3.4. In questo caso tutta la portata di combustibile è iniettata tramite il condotto VeLoNOxTM, mentre la portata di aria principale è stata mantenuta inizialmente nulla. A differenza di quanto visto per la Lancia, si nota come il tracciante si disponga in una zona molto più ampia, andando ad occupare anche porzioni di spazio distanti dall'asse del bruciatore.

Ciò è dovuto principalmente al fatto che il combustibile viene iniettato a monte del vortificatore e tende a seguire il percorso imposto dalla palettatura.

Analogamente a quanto fatto per la Lancia si riportano i risultati ottenuti in condizioni di portata gradualmente crescente, relativi alle prove V.3 e V.5 (si veda la tabella 3.6 nella pagina precedente).

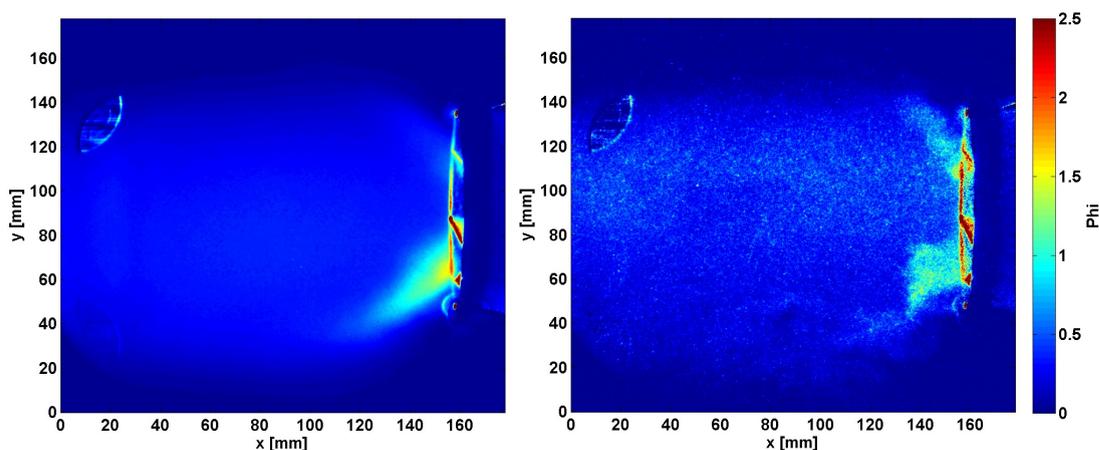


FIGURA 3.13: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione V.3.

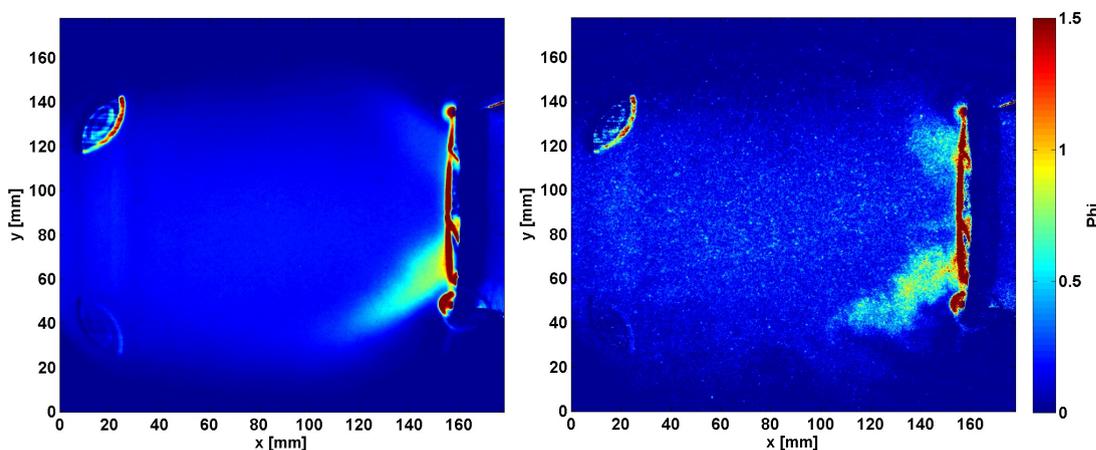


FIGURA 3.14: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione V.5.

A parità di condizioni, si notano dei valori di ϕ inferiori rispetto alle immagini presentate nel paragrafo precedente.

Anche in questo caso non appena si inserisce la portata primaria il tracciante si dispone secondo una geometria dovuta alla presenza della palettatura del corpo assiale.

L'asimmetria che si nota in queste immagini è dovuta alla presenza, nel canale inferiore del piano di misura, di un accenditore. Di conseguenza il flusso di aria principale viene ostacolato, permettendo di cogliere una maggiore quantità di tracciante nelle immagini.

3.2.4 Lancia + VeLoNOxTM

Valori relativi alle prove effettuate su Lancia + VeLoNOxTM

Condizione	Q_1 [g/s]	Q_2 [kg/h]	$M_{acetone}$ [kg/h]
LV.1	0	14.43	1.87
LV.2	20	14.17	1.57
LV.3	40	14.39	1.56
LV.4	61	14.47	1.43

TABELLA 3.7: Valori relativi alle prove effettuate su lancia + VeLoNOxTM nelle due modalità di prova.

Come per le due sezioni precedenti, anche in questo caso sono state effettuate le prove a portata primaria fissa a 170 g/s, non avendo però fornito risultati particolarmente apprezzabili non sono stati riportati in questa tabella.

L'ultima modalità di prova è stata condotta immettendo il combustibile attraverso entrambi i condotti di Lancia e VeLoNOxTM.

La ripartizione della portata secondaria (50% del totale per ciascuna delle linee) è stata scelta per effettuare un'iniziale prova del funzionamento dei due componenti accoppiati.

Di seguito sono riportate le immagini relative alle condizioni LV.1 fino a LV.4 (si veda la tabella 3.7), ovvero a portata primaria crescente da 0 fino a 61 g/s.

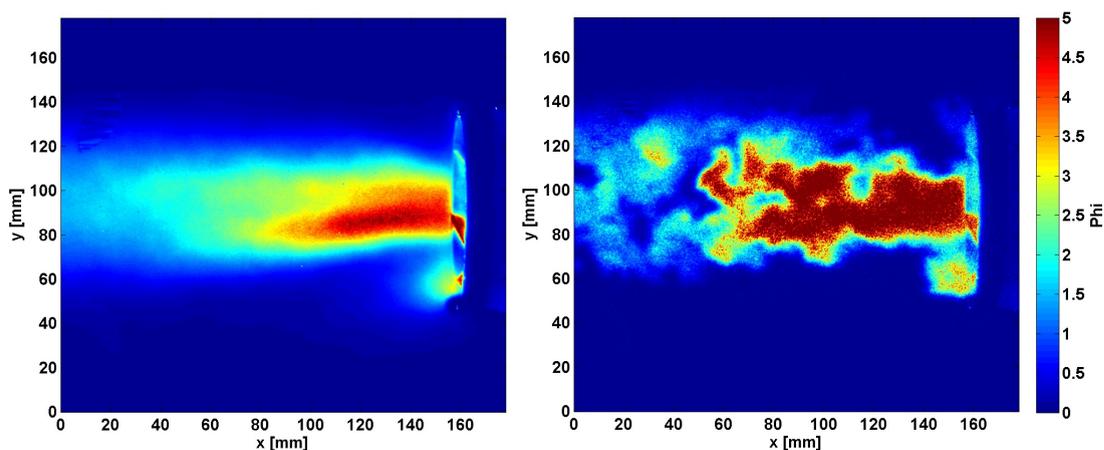


FIGURA 3.15: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione LV.1.

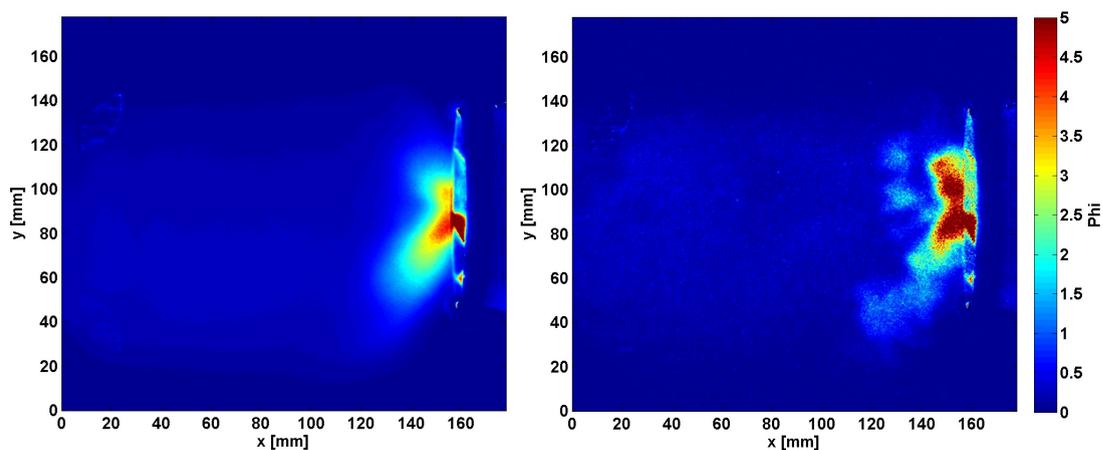


FIGURA 3.16: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione LV.2.

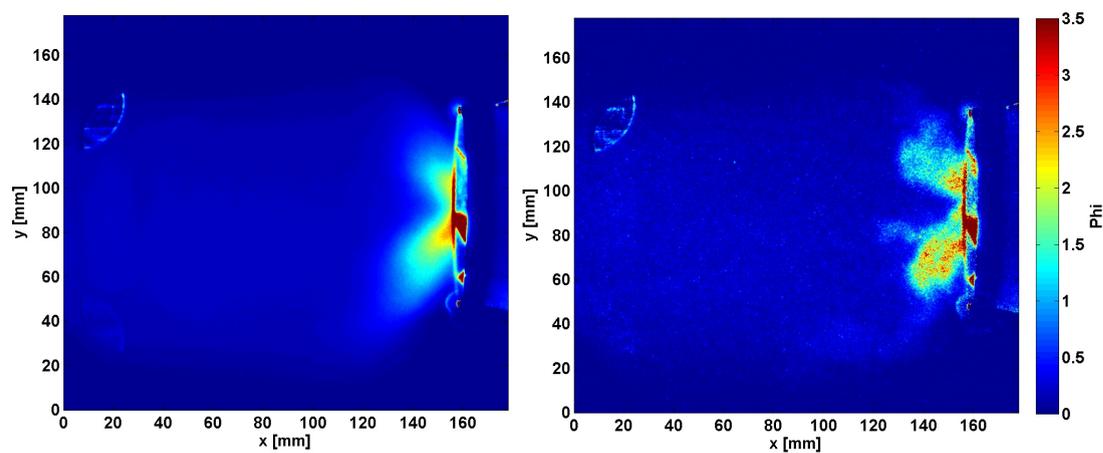


FIGURA 3.17: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione LV.3.

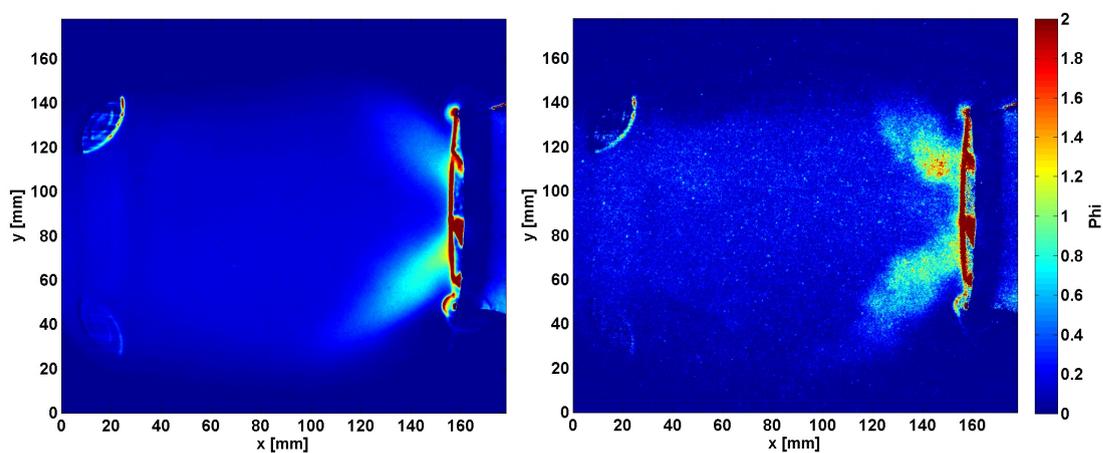


FIGURA 3.18: Istantanea (DX) e media (SX) relative alla condizione LV.4.

Da queste ultime prove si vede come la presenza di un nocciolo a ϕ elevato non sia solamente conseguente all'utilizzo di uno dei due canali, ma dipenda dalle portate utilizzate e dalla loro ripartizione. In ogni caso, all'aumentare della portata di aria comburente, la disposizione del combustibile tende ad assomigliare a quella vista per il solo VeLoNOxTM.

Per verificare che le immagini rilevate fossero coerenti, è stata confrontata l'immagine ottenuta sommando manualmente il contributo della Lancia e del VeLoNOxTM presi singolarmente, con un'immagine ottenuta, a parità di condizioni, utilizzando i due canali contemporaneamente.

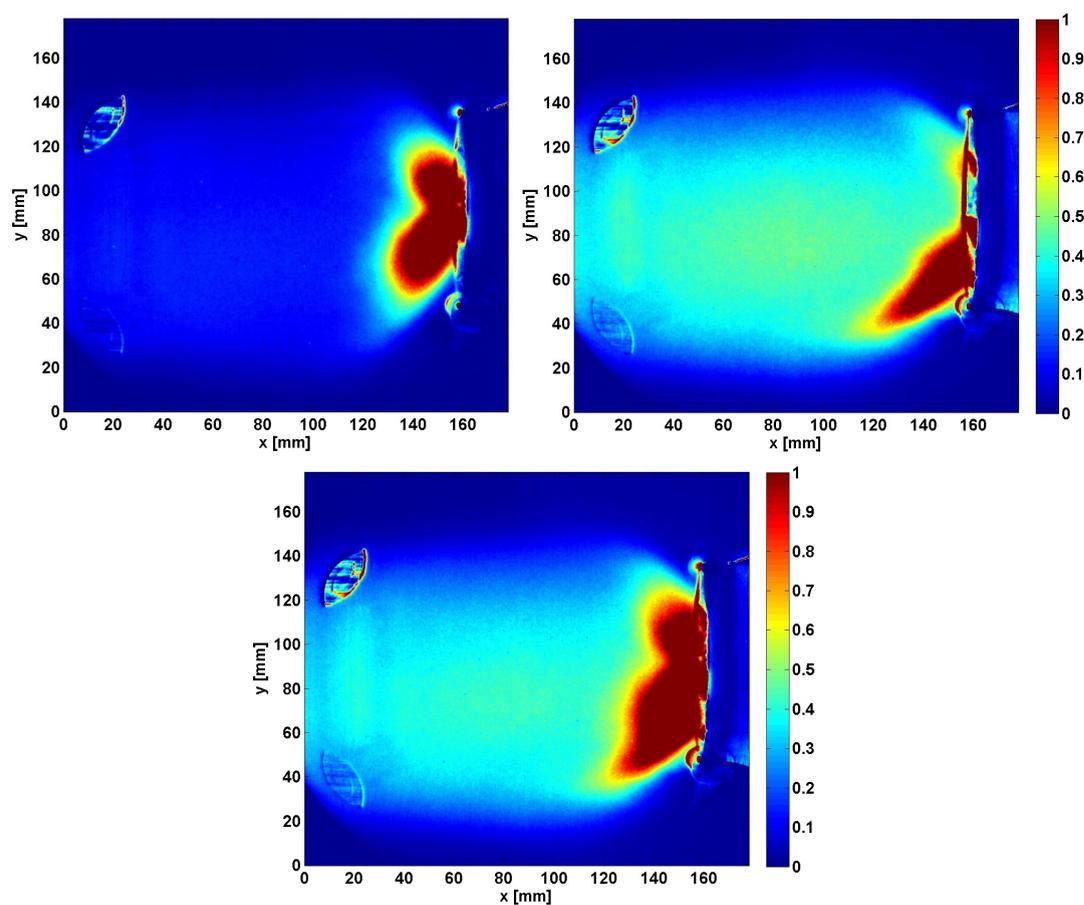


FIGURA 3.19: Le due immagini in alto sono relative alle condizioni L.3 e V.3, quella in basso è stata ottenuta sommando il valore dei singoli pixel delle due immagini.

L'immagine successiva mostra invece l'immagine artificiale e quella acquisita affiancate.

Dal confronto è possibile notare come i due canali di alimentazione del combustibile siano indipendenti l'uno dall'altro, in quanto la somma dell'alimentazione separata dei due produce gli stessi effetti dell'utilizzo contemporaneo dei due canali.

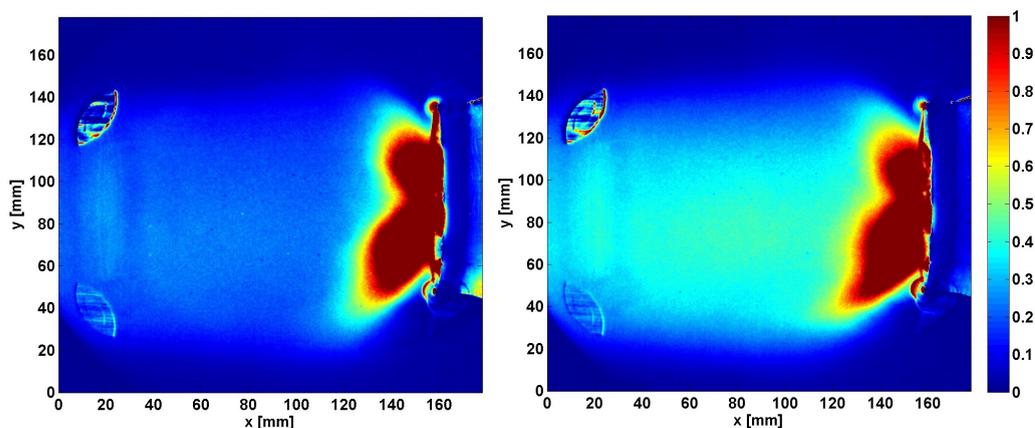
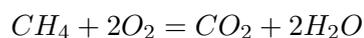


FIGURA 3.20: Immagine acquisita (SX) ed immagine artificiale (DX) a parità di condizioni.

3.2.5 Profili ISO- Φ

In questa sezione si introduce una grandezza generalmente utilizzata in letteratura per quanto riguarda i fenomeni di combustione.

La reazione teorica di combustione del metano è:



Definiamo:

- $\phi_{st} = \frac{1}{2}$ → rapporto stechiometrico fra le moli di CH_4 e di O_2
- ϕ → rapporto effettivo fra le moli di CH_4 e di O_2

A questo punto introduciamo la quantità

$$\Phi = \frac{\phi}{\phi_{st}}$$

La grandezza appena introdotta (Φ), differente da quella fino ad ora utilizzata (ϕ), permette di identificare le zone in cui si svilupperebbe il fronte di fiamma relativo ad una fiamma diffusiva (in cui $\Phi = 1^1$), e distinguere le zone di miscela ricca o magra.

¹ La caratteristica di fiamma diffusiva da parte della Lancia è stata verificata in Ansaldo tramite simulazioni CFD, che hanno confermato quanto precedentemente ipotizzato

Dalle prove effettuate si vede come le zone a Φ elevato si riducono di molto non appena si inserisce il flusso primario. In entrambi i casi il combustibile si concentra nella zona centrale allo sbocco del bruciatore, fungendo da nocciolo di stabilità per la fiamma.

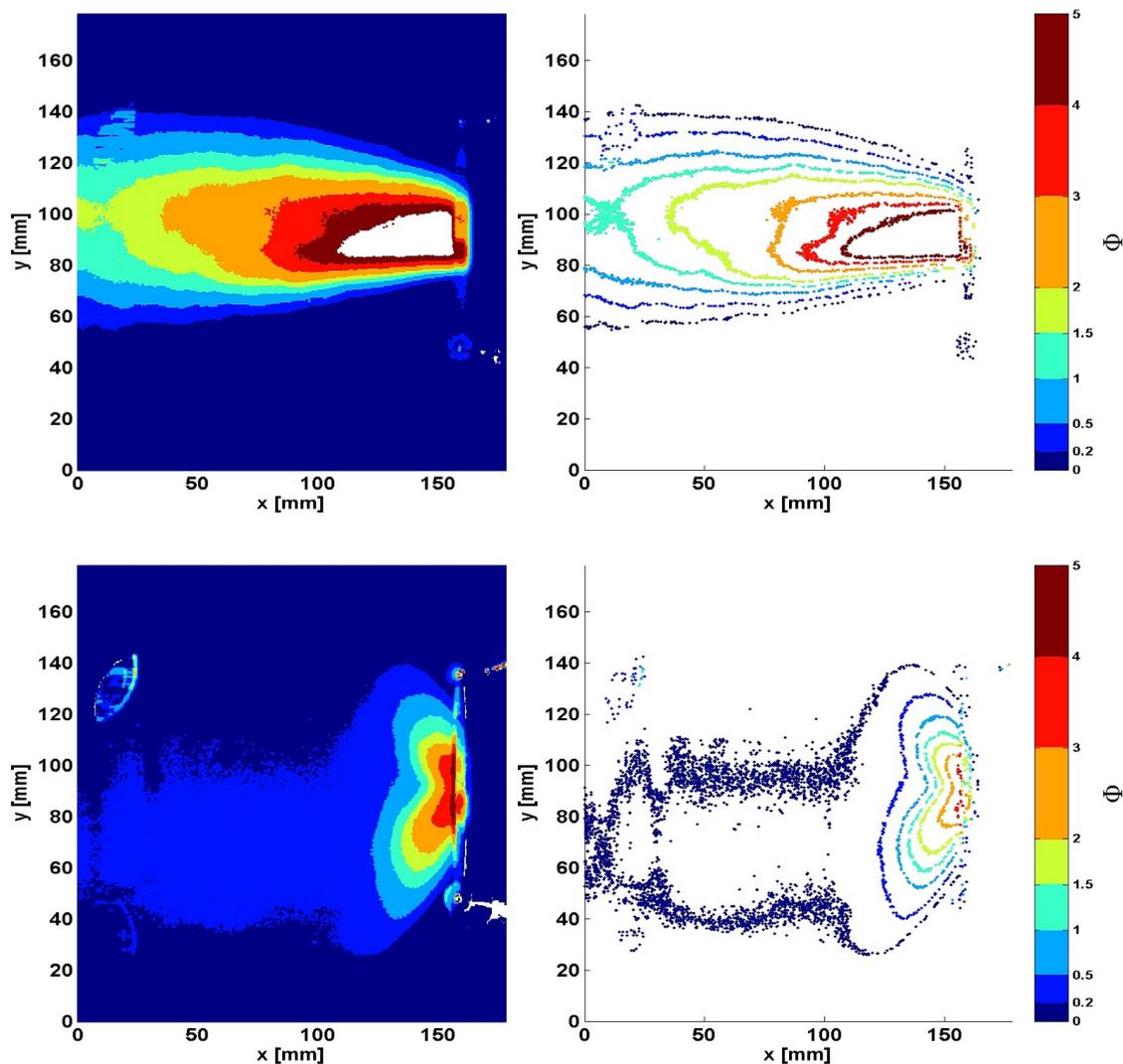


FIGURA 3.21: Profili ISO- Φ in diverse condizioni, dall'alto verso il basso: L.1, L.3.

N.B. Nelle immagini di sinistra, il bianco rappresenta i valori fuori scala, mentre in quelle di destra le linee sono riferite al valore superiore della banda corrispondente al colore utilizzato.

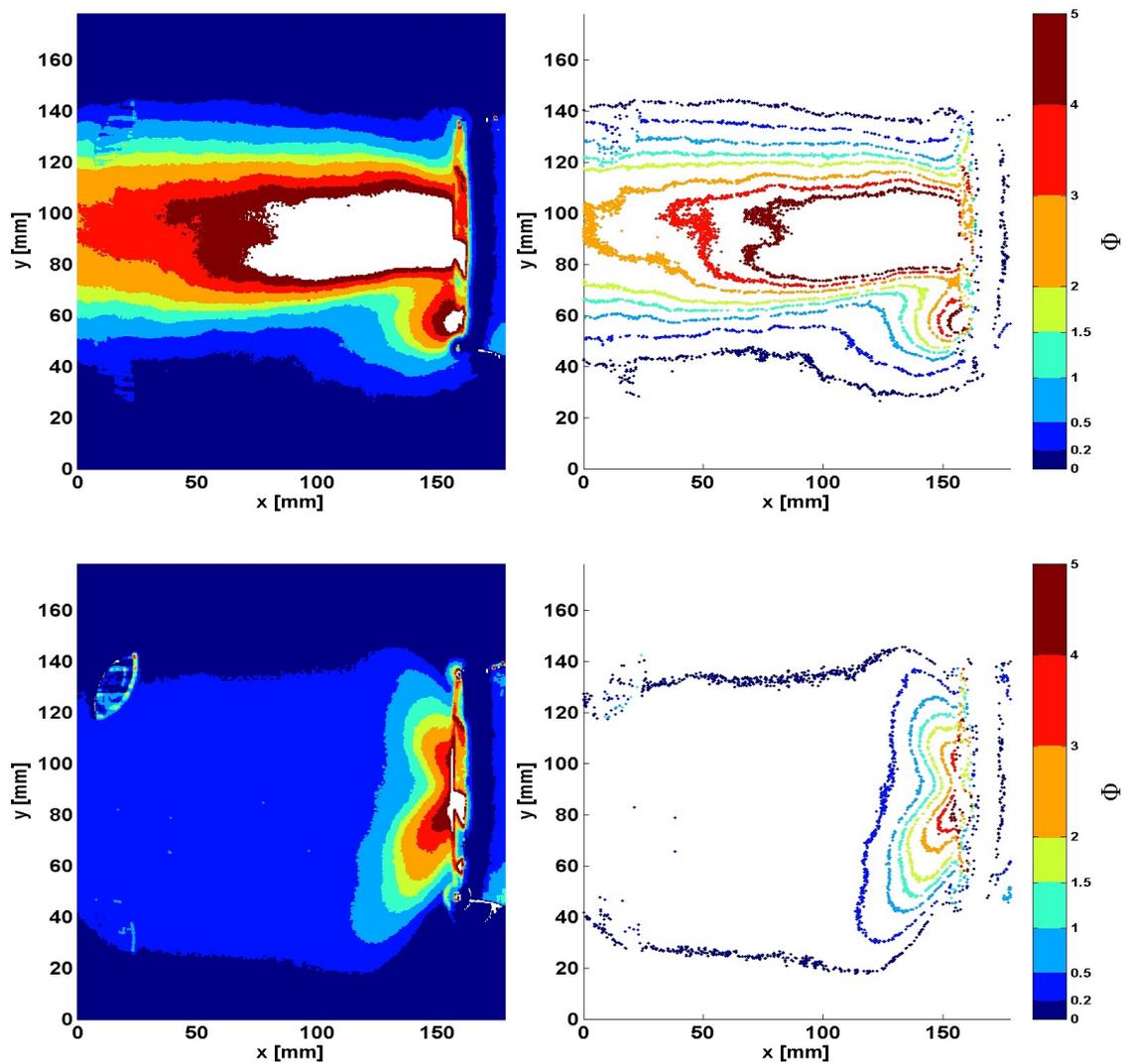


FIGURA 3.22: Profili ISO- Φ in diverse condizioni, dall'alto verso il basso: LV.1, LV.3.

Un'analisi di questo tipo è importante per poter effettuare studi più approfonditi sull'andamento del fronte di fiamma e sulla stabilità della stessa, oltre che sulle emissioni inquinanti, in quanto tutte queste caratteristiche dipendono fortemente dal valore di Φ .

Capitolo 4

Conclusioni

Le prove effettuate con tecnica LIF durante questa esperienza hanno permesso la messa a punto di un test-bench e di un sistema di misura calibrato e pronto per effettuare altre campagne di misura. Infatti, sono stati tarati i misuratori di portata e opportunamente configurato il software di acquisizione *MAX*. E' stato inoltre messo a punto il sistema ottico di acquisizione ed elaborazione immagini, con particolare riferimento alla calibrazione LIF per la determinazione della scala *intensità luminosa – concentrazione di tracciante*.

Si è rilevato come il flusso uscente dalla Lancia gas abbia una distribuzione diretta lungo l'asse del bruciatore quando non combinato con la portata principale, mentre tenda a modificare la propria distribuzione a causa del ricircolo di flusso generato dall'effetto del vorticatori. Nonostante ciò, l'alimentazione di questa linea dà origine ad una zona con Φ elevato in prossimità dell'asse nelle immediate vicinanze della testa del bruciatore, ovvero dove la fiamma dovrebbe ancorarsi per avere un regime stabile. Inoltre si è potuto notare come la geometria della distribuzione di tracciante non risenta dell'aumento della portata principale oltre valori di circa 80 g/s, venendo quindi influenzata dal solo angolo di swirl imposto dalle palettature del corpo assiale.

Nelle prove relative al solo condotto VeLoNOxTM si evince che il tracciante uscente da tale linea segue l'andamento del flusso principale swirlato, determinando valori di Φ mediamente inferiori rispetto a quelli ottenuti con la Lancia gas, e presentando i valori più elevati nelle zone più distanti dall'asse del bruciatore. Ciò dovrebbe garantire minori emissioni inquinanti, poichè si osserva un miglior miscelamento fra combustibile e comburente.

Dall'utilizzo combinato dei due canali si è potuto verificare come la loro interazione

producesse un risultato analogo alla sovrapposizione dei due effetti considerati singolarmente.

Contemporaneamente si è rilevato quali potrebbero essere i miglioramenti del sistema messo a punto nel caso si volessero effettuare delle misure con portate superiori, ossia una maggiore capacità da parte dell'inseminatore di immettere acetone vaporizzato nel flusso, e l'utilizzo di linee in grado di fornire portate più elevate.

Ulteriori studi potranno approfondire i preliminari risultati ottenuti, che comunque dimostrano la convenienza dell'utilizzo combinato delle due linee per il duplice obiettivo di stabilità della fiamma e riduzione delle emissioni inquinanti.

APPENDICI

Appendice A

Disegni CAD

Si riportano di seguito i disegni sviluppati in Autocad relativi al progetto di accoppiamento dell'oggetto in prova con l'hardware già presente in laboratorio, si fa presente che è stato necessario ideare tutti i pezzi in modo tale da contenere il più possibile il peso e permetterne il montaggio senza grosse difficoltà.

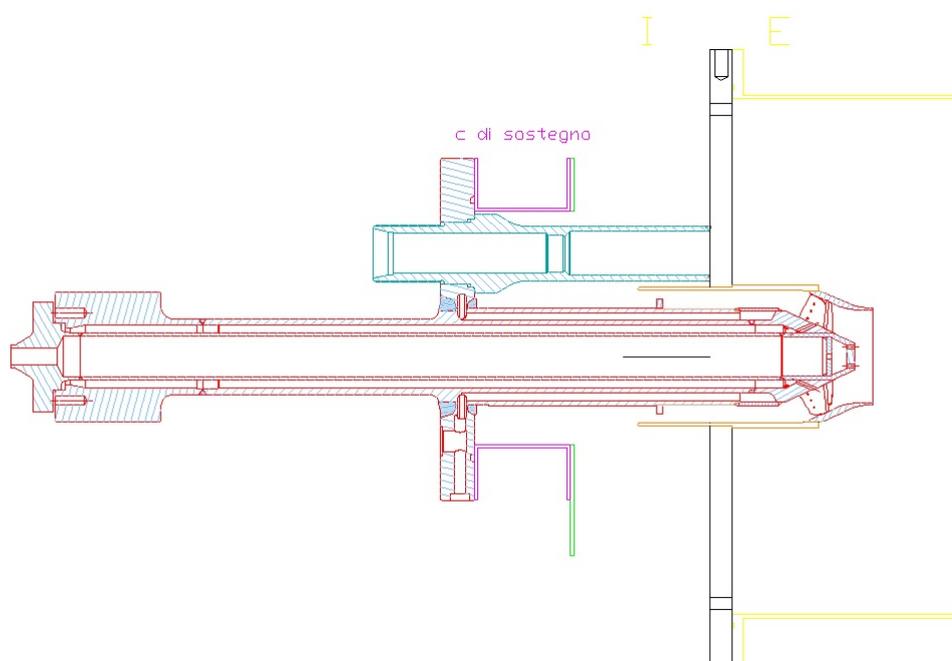


FIGURA A.1: Vista di assieme, in azzurro si nota il tubo premix

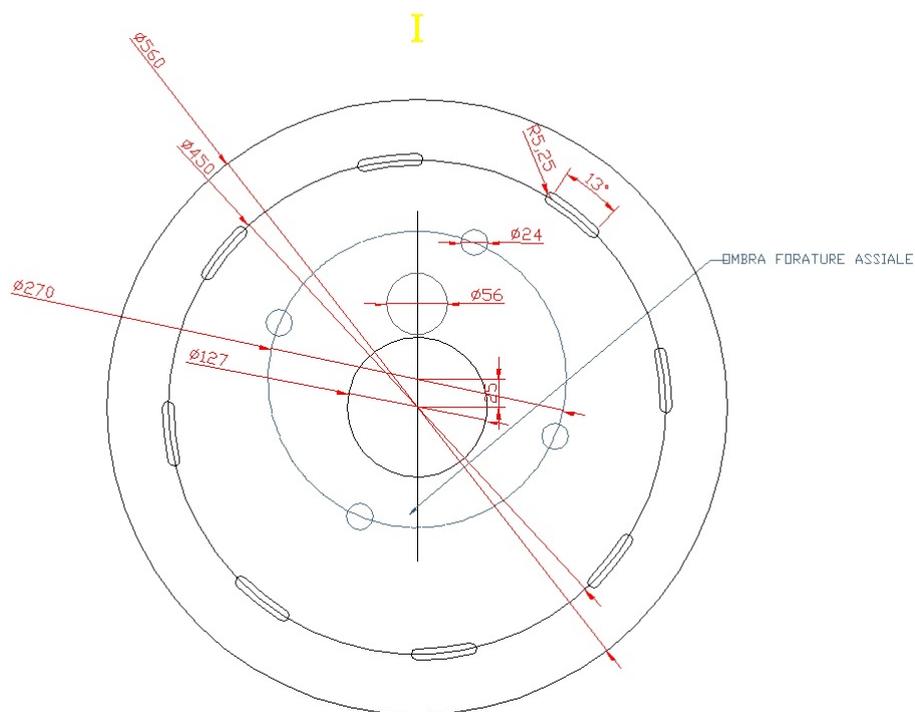


FIGURA A.2: Vista interna della flangia di accoppiamento

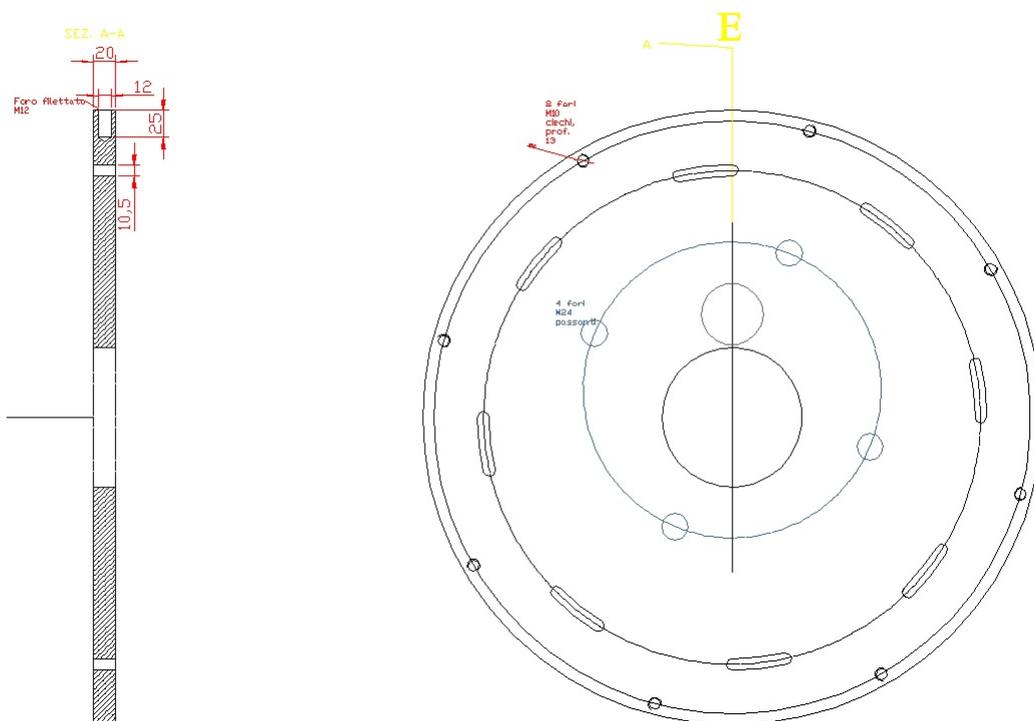


FIGURA A.3: Vista laterale ed esterna della flangia di accoppiamento

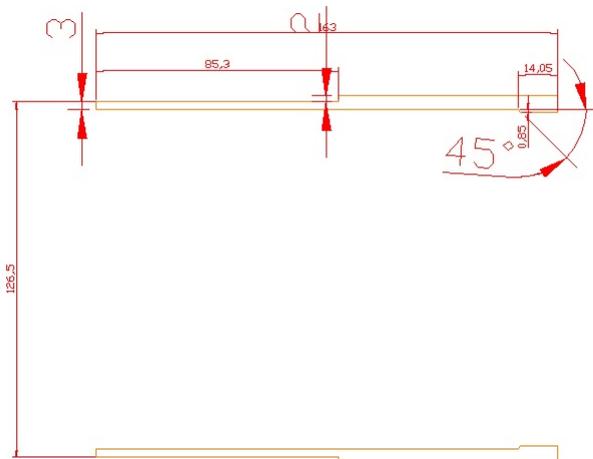


FIGURA A.4: Vista del cilindro utilizzato per simulare la presenza del corpo diagonale.

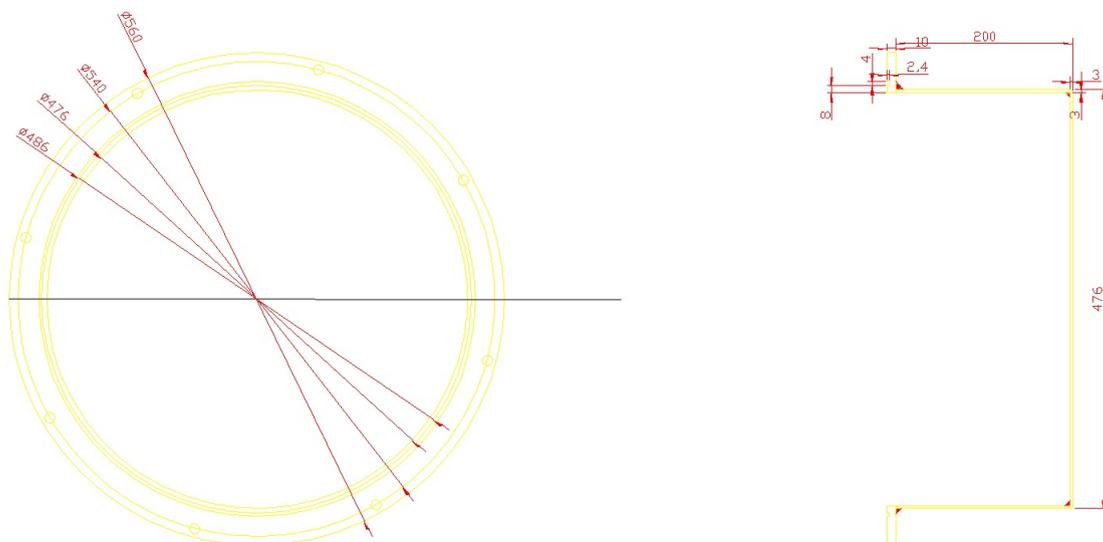


FIGURA A.5: Vista della pentola ideata per isolare l'apparato sperimentale

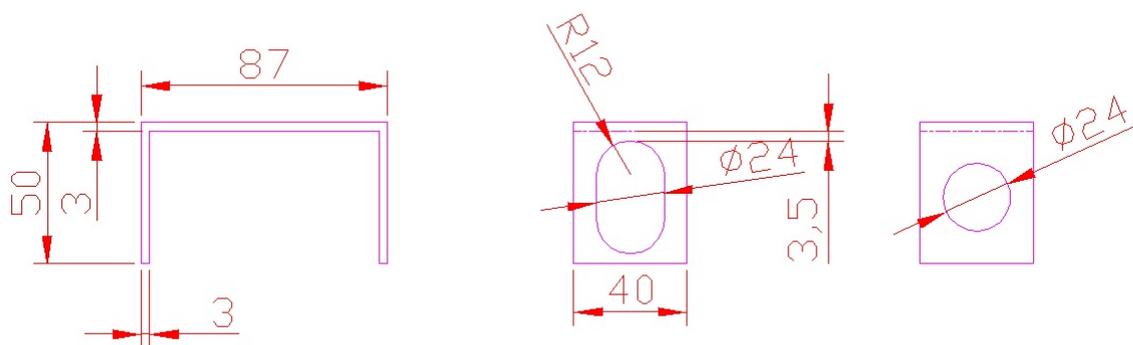


FIGURA A.6: Vista dei supporti.

Appendice B

Dati tecnici hardware

Inseminatore

10F03 High Volume Liquid Droplet Seeding Generator

- Casa produttrice: Dantec Dynamics
- Massima pressione di utilizzo: 3 bar assoluti
- Capacità: 5 litri
- Dimensione media goccia: SMD 2-5 μm

Misuratori di portata massica

FCI ST75 Series Flowmeters

- Casa produttrice: FCI
- Range di funzionamento: 3.6 - 360 kg/h
- Misura di portata massica e di temperatura
- Acquisizione a PC

Bronkhorst EL FLOW MFC F-203C

- Casa produttrice: Bronkhorst
- Portata massima: 12000 o 25000 l_n/h (aria)
- Acquisizione a PC tramite lettura in corrente

Brooks MFC 5853E

- Casa produttrice: Brooks
- Portata massima: 15 kg/h (N_2)
- Acquisizione a PC tramite lettura in tensione

Telecamera*pco.1200 hs*

- Casa produttrice: pco
- Dotata di filtro ottico passabanda
- Acquisizione a PC

Intensificatore*Image intensifier unit - H series*

- Casa produttrice: Dantec Dynamics
- Schermo ai fosfori
- Acquisizione a PC

Laser*Dantec Dynamics DualPower 200-15*

- Casa produttrice: Dantec Dynamics

Bibliografia

- [1] H. Hu and M.M Koochesefahani. A novel method for instantaneous, quantitative measurements of molecular mixing in gaseous flows. *Experiments in Fluids*, 33 (2002) 202-209
- [2] Christof Schulz and Volker Sick. Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31 (2005) 75-121
- [3] Davide Mestri. *Tesi di laurea in Ingegneria Meccanica-Energia e aeronautica*. Progetto, validazione e sperimentazione di un combustore per una turbina a gas anulare, (2014)
- [4] Giorgio Salerno. *Tesi di laurea in Ingegneria Meccanica*. Test Case per la Misura del Grado di Mixing con Tecnica Mie Scattering, (2006)
- [5] Enrico Gottardo. Procedura per misure di miscelamento con tecnica LIF. *Documento interno Ansaldo Energia*