

## Misure PDA in flussi bifase: discriminazione fase liquida/fase gassosa mediante tecniche di post-elaborazione

**Mario Caruggi, Edward Canepa, Piergiorgio Formosa,  
Alessandro Nilberto, Marina Ubaldi, Pietro Zunino**  
Dipartimento di Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti (DIMSET)  
Università di Genova

**Pasquale Di Martino**  
Avio S.p.A. – Pomigliano d'Arco

### Sommario

Oggetto delle indagini sperimentali qui presentate è il flusso bifase all'uscita di un premiscelatore LPP (Lean Premixed Prevaporised) per camera di combustione di turbina a gas per propulsione aerea. In particolare sono oggetto della ricerca gli effetti del campo di moto dell'aria sulla prevaporizzazione e premiscelazione del combustibile liquido e l'influenza dell'iniezione di combustibile liquido sul campo di moto dell'aria.

Lo studio di quest'ultimo aspetto ha posto interessanti problemi inerenti alla tecnica di misura da adottare al fine di misurare la velocità dell'aria in presenza di gocce di combustibile.

Lo strumento di misura utilizzato è l'Anemometro Phase Doppler (PDA), il quale consente di rilevare sia la velocità sia il diametro delle particelle che attraversano il volume di misura. Si propone di adottare il diametro delle gocce come parametro per discriminare la fase gassosa, inseminata con gocce d'olio di silicone, dalla fase liquida. La velocità dell'aria viene determinata in fase di post-elaborazione dei dati raccolti, impostando un filtro passa-basso sui diametri delle gocce in modo da considerare solamente le particelle traccianti avente diametro inferiore ad una soglia opportunamente scelta.

Nel presente lavoro viene descritta la tecnica di discriminazione delle due fasi liquida e gassosa e sono discussi alcuni risultati ottenuti durante la messa a punto della tecnica.

### 1. Introduzione

In campo aeronautico, il progressivo inasprimento delle normative inerenti alle emissioni inquinanti ha determinato un forte impulso allo sviluppo d'innovativi sistemi di combustione. In particolare, la tecnologia maggiormente promettente è la combustione prevaporizzata e premiscelata di miscela povera. I combustori così concepiti presentano, a monte della camera di combustione, condotti entro i quali si realizzano una precoce vaporizzazione del combustibile liquido ed il suo uniforme miscelamento con l'aria comburente. Questi due aspetti assumono importanza fondamentale affinché la miscela, pur mediamente povera, non presenti, a causa di non uniformità spaziali e temporali, locali concentrazioni stechiometriche responsabili di picchi di temperatura di fiamma, tipicamente sorgenti d'ossidi d'azoto ( $\text{NO}_x$ ). Per contro, tali combustori presentano non trascurabili problemi legati a fenomeni d'instabilità ed i processi di miscelamento aria/combustibile e prevaporizzazione assumono rilevante importanza anche al fine di eliminare le instabilità di combustione ed evitare fenomeni di ritorno di fiamma ed auto ignizione [1-3].

Attualmente è in corso presso i Laboratori di Aerodinamica e Combustione del DIMSET (Università di Genova) un'indagine sperimentale sul flusso bifase (aria-combustibile liquido) generato da un premiscelatore LPP progettato da Avio S.p.A., nell'ambito del Progetto di ricerca MUSCLES (Modelling of UnSteady Combustion in Low Emission Systems).

Gli obiettivi della ricerca sono i seguenti:

1. individuare e studiare sperimentalmente le caratteristiche tempovarianti e spaziali delle strutture fluidodinamiche organizzate che hanno origine nei premiscelatori e che possono innescare fenomeni di instabilità di combustione;
2. studiare l'effetto dell' iniezione del combustibile liquido sulle caratteristiche instazionarie del flusso;
3. studiare l'effetto delle strutture organizzate instazionarie sul campo di moto delle gocce di combustibile e sul processo di evaporazione e miscelamento.

Per raggiungere tali obiettivi si è reso necessario sviluppare opportune tecniche di misura e di interpretazione dei dati acquisiti, tali da permettere una rapida ed affidabile discriminazione tra le fasi liquida e gassosa del flusso oggetto dell'indagine. La presente memoria descrive in dettaglio tali tecniche.

## 2. Attrezzatura sperimentale e campagna di prove

### Il banco prova

Le prove sono state effettuate su un banco appositamente progettato per misure aerodinamiche in stazionarie in premiscelatori LPP in presenza di iniezione ed evaporazione del combustibile liquido.



*Fig. 1. Banco prova: visioni d'insieme.*

Il banco prova è costituito da un ventilatore centrifugo, in grado di assicurare la necessaria portata d'aria, un sistema di preriscaldamento dell'aria ed una camera di calma. A valle della camera di calma è installato il premiscelatore LPP seguito da un condotto a sezione rettangolare simulante un settore di camera di combustione con accessi ottici laterali e terminali per l'effettuazione di misure non intrusive.

Per la produzione dello spray di combustibile, è stato realizzato un sistema d'iniezione in grado di raggiungere la pressione di 60 bar ed assicurare una portata di 1.5 l/min.

Le principali caratteristiche del banco prova sono di seguito riportate:

- ventilatore centrifugo a velocità variabile da 15 kW;
- sistema di preriscaldamento elettrico regolabile da 100 kW;
- portata d'aria massima = 0.7 kg/s;
- pressione in camera di calma = 115000 Pa;
- temperatura aria massima = 700 K.

### Il condotto di premiscelazione LPP

Oggetto della ricerca è un condotto di premiscelazione progettato da Avio S.p.A. (figure 2e 3). Tale condotto è dotato di due palettature centripete, conferenti al flusso velocità tangenziali concordi ma di diverso modulo, al fine di creare una zona caratterizzata da elevati sforzi tangenziali turbolenti, capace di contribuire efficacemente all'atomizzazione e all'evaporazione delle gocce di combustibile. La notevole intensità di turbolenza presente nel flusso promuove inoltre il miscelamento aria-combustibile.

Tra le due schiere centripete e la camera di combustione è posto un condotto il cui profilo convergente è legato alla necessità di accelerare il flusso, al fine di prevenire possibili fenomeni di ritorno di fiamma.

L'iniezione del combustibile è realizzata per mezzo di un ugello DELAVAN WM556 a cono d'iniezione cavo, alimentato a 50 bar, in grado di produrre gocce con diametro medio di Sauter (SMD) di 40  $\mu\text{m}$ ; l'angolo d'apertura del cono è di 60°. L'ugello è localizzato sull'asse del condotto di premiscelazione.

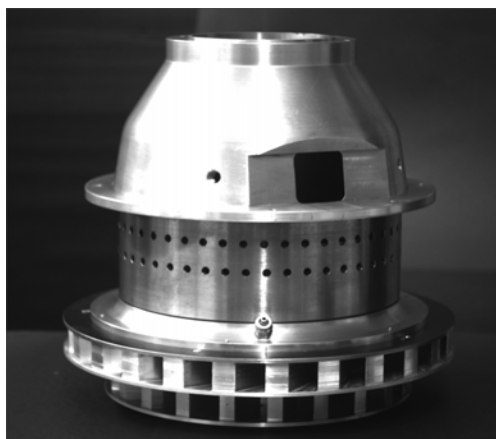


Fig. 2 Modello del premiscelatore LPP

Le prove sono state effettuate su un modello in larga scala (5:1) del premiscelatore in modo da permettere un'analisi dettagliata ed accurata del flusso. Il diametro di uscita del modello è di 104 mm.

### **Condizioni di prova**

Sono state effettuate prove a freddo (senza iniezione di combustibile) per caratterizzare l'aerodinamica instazionaria del premiscelatore e prove a caldo, con aria preriscaldata e iniezione di combustibile, ma senza combustione.

Come combustibile liquido è stata utilizzata una miscela di etanolo (90%) e acqua (10%), adatta allo studio della formazione degli spray e della loro evaporazione, avendo punto di ebollizione relativamente basso e temperatura di autoignizione elevata.

Le condizioni di prova sono state determinate imponendo le seguenti condizioni:

- conservazione del numero di Reynolds tra prototipo e modello;
- conservazione del rapporto aria/combustibile;
- conservazione del rapporto tra tempo d'evaporazione delle gocce di combustibile ed il loro tempo di residenza nel condotto di premiscelazione.

Le condizioni di prova sono risultate le seguenti:

- portata d'aria	0.204 kg/s
- rapporto di massa aria/combustibile	24
- temperatura di preriscaldamento dell'aria	450 K
- diametro delle gocce generate dagli iniettori	40 $\mu\text{m}$
- numero di Reynolds basato sul diametro di uscita del premiscelatore	$10^5$ .

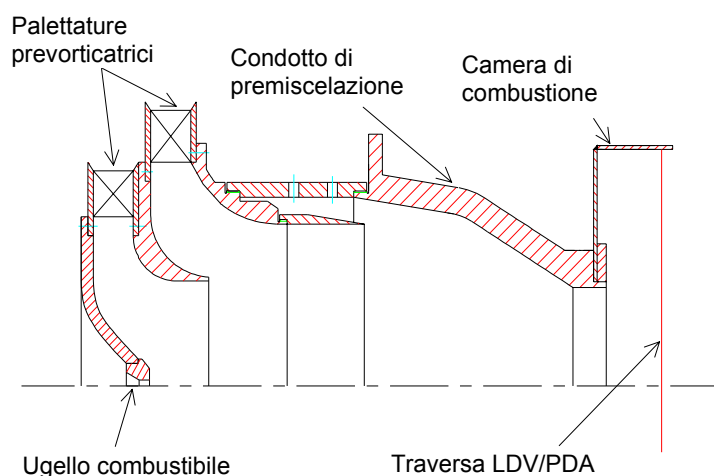


Fig. 3 Sezione meridiana del premiscelatore e posizione della traversa di misura

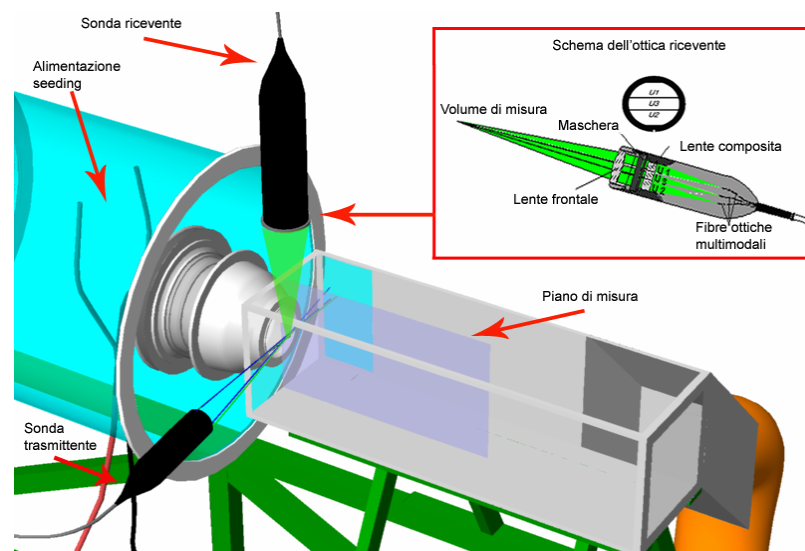
## Strumentazione

Le misure tempo-varianti di due componenti di velocità nel flusso all'uscita del bruciatore LPP, sono state realizzate mediante un sistema LDV/PDA a quattro raggi e due colori, in configurazione forward scatter. Uno schema della sezione di prova e della strumentazione di misura è mostrato in figura 4.

La sorgente luminosa è un laser da 300 mW a ioni di argon. Il fascio di luce generato viene opportunamente filtrato e diviso in modo da ottenere due coppie di raggi con lunghezza d'onda di 514.5 nm (verde) e di 488 nm (blu). L'ottica trasmittente è dotata di una lente frontale con lunghezza focale di 300 mm e separazione dei raggi di 38 mm, che dà luogo ad un volume di misura di diametro 90  $\mu\text{m}$  e lunghezza 1.9 mm. Viene utilizzata una cella di Bragg che applica uno shift della frequenza (40 MHz) ad uno dei raggi di ciascuna coppia, al fine di eliminare ambiguità direzionale e distorsione angolare.

Il sistema PDA (Phase Doppler Anemometer) è basato su una estensione del principio di funzionamento del sistema LDV (Laser Doppler Velocimeter) e permette di misurare oltre alla velocità anche il diametro delle gocce, grazie ad un'ottica ricevente al cui interno sono alloggiati quattro rilevatori di cui tre sono utilizzati per la misura del diametro delle gocce.

La sonda ricevente (DANTEC 57X90), mostrata schematicamente nell'inserto di figura 4, è costituita da una lente frontale per la collimazione, una maschera intercambiabile con aperture facenti funzione di obiettivo, un sistema di lenti composite per la focalizzazione dei segnali luminosi sulle fibre, un filtro spaziale ed un mirino d'allineamento. La lente frontale ha lunghezza focale di 300 mm, la maschera impiegata è quella con aperture maggiori ed il filtro spaziale è mantenuto alla massima apertura di 200  $\mu\text{m}$ .



*Fig. 4 Sezione di prova e sonde ottiche del sistema PDA*

Le dimensioni delle gocce sono state misurate utilizzando il modo di rifrazione del primo ordine. La luce è stata polarizzata in direzione parallela al piano di diffusione e per minimizzare gli effetti di riflessione è stato adottato un angolo di diffusione di 70°.

I segnali Doppler in uscita dalla sonda ricevente sono trasmessi mediante fibre ottiche all'unità d'acquisizione (Dantec Dual PDA 58N81 detector unit) dove sono filtrati per minimizzare il rumore di fondo. A valle di tale unità i fotomoltiplicatori convertono i segnali luminosi in segnali elettrici che vengono acquisiti dall'analizzatore di spettro (processore Dantec BSA P70). L'analizzatore di spettro è in grado di analizzare frequenze comprese tra 122 Hz e 120 MHz, con un'accuratezza maggiore dello 0.1 % dell'ampiezza di banda.

Le due sonde trasmittente e ricevente sono state rigidamente montate su un meccanismo di movimentazione a controllo numerico dotato di tre slitte lineari azionate da motori passo-passo, con traslazione minima di 8  $\mu\text{m}$ .

Al fine di caratterizzare il campo di moto, il flusso di aria è stato inseminato con uno spray di olio di silicone atomizzato (0.5÷3  $\mu\text{m}$ ) iniettato nella camera di calma, mentre per quanto riguarda la fase liquida, le stesse gocce di combustibile operano come particelle diffondenti.

Il data rate ha tipicamente assunto, durante le misure, valori compresi tra 1000 e 2000 Hz, benché nelle zone di ricircolo tali valori siano scesi a livello di poche centinaia di Hz.

Una completa analisi dell'incertezza sperimentale associata a misure di velocità con sistemi LDV è stata fornita da Boutier [4] e una specifica valutazione degli errori dei processori basati sull'analisi spettrale dei segnali è stata data da Modarress et al. [5]. Sulla base delle pubblicazioni sopra citate e dell'esperienza maturata dagli autori, l'errore sistematico nella misura di una componente di velocità è stato stimato inferiore al 2 %.

L'incertezza nella misura delle dimensioni delle gocce è stata diffusamente analizzata in letteratura [6-8]. Le principali sorgenti d'errore sono: la dipendenza non lineare del rapporto fra slittamento di fase e diametro, causata dalla presenza di particelle del medesimo ordine di grandezza della lunghezza d'onda incidente [9]; la non linearità dovuta a disuniformità dell'intensità della luce incidente, nel caso di presenza di gocce non piccole a confronto con il diametro del volume di misura [10]; la non sfericità delle gocce dovuta ad accelerazione o a fenomeni di agglomerazione [11]. Sulla base delle pubblicazioni citate, si è stimata, nel corso della presente esperienza, in cui la maggior parte delle gocce è risultata compresa tra 5 e 30  $\mu\text{m}$  di diametro, un'incertezza del 3% sulla loro dimensione.

### **Campagna di prova ed elaborazione dei dati**

Le misure sono state effettuate su una traversa posta 30 mm a valle del condotto premiscelatore (fig. 4), costituita da 28 punti di misura, distanziati di 4 mm, per una lunghezza complessiva di 102 mm a partire dall'asse del condotto.

Uno degli obiettivi del progetto di ricerca è lo studio delle strutture fluidodinamiche organizzate che caratterizzano il flusso d'aria all'uscita del premiscelatore ed dei relativi effetti sulla distribuzione di combustibile. Precedenti indagini [12] effettuate con anemometro a filo caldo e anemometria laser Doppler, a freddo senza iniezione di combustibile hanno evidenziato un campo di moto caratterizzato da forti perturbazioni periodiche.

Per potere studiare questi fenomeni tempo-varianti, l'acquisizione dei dati è stata sincronizzata con un segnale di riferimento opportunamente filtrato, proveniente da un trasduttore di pressione miniaturizzato affacciato al flusso. Ciò ha permesso di utilizzare la tecnica della media in fase durante l'elaborazione dei dati. Al fine di poter ottenere una media in fase statisticamente significativa ed accurata, per ogni punto di misura sono stati acquisiti 100000 campioni validati. I valori di velocità istantanea sono stati suddivisi in un appropriato numero di finestre temporali, ciascuna delle quali rappresenta una particolare fase del periodo dell'oscillazione portante del flusso.

## **3. Tecnica di discriminazione delle fasi liquida e gassosa**

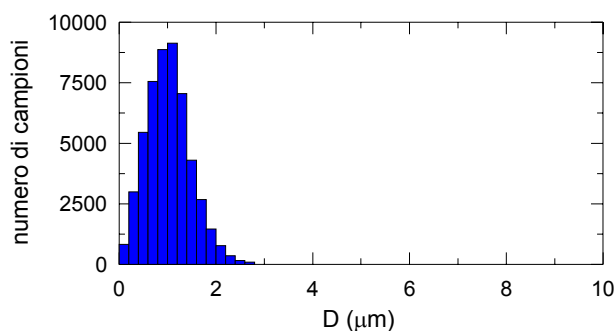
Uno dei maggiori problemi dello studio di un flusso bifase è rappresentato dalla necessità di discriminare efficacemente il segnale relativo alle fasi gassosa e liquida, al fine di poter dare rappresentazione ed interpretazione distinta del comportamento del campo di moto dell'aria e di quello delle gocce, oltre che delle loro mutue interazioni.

Nessuna particolare difficoltà ha comportato lo studio degli effetti delle strutture del flusso d'aria sul rilascio di combustibile in camera di combustione, tanto in termini di distribuzione spaziale che temporale, dato che le gocce stesse di combustibile si comportano come particelle diffondenti: la loro velocità e il loro diametro possono quindi essere misurati direttamente con un sistema PDA

Più complesso è risultato invece determinare l'influenza dell'iniezione di combustibile sul campo di moto dell'aria, a causa della necessità di introdurre particelle traccianti che seguano il flusso d'aria e siano individuabili dal sistema PDA. Un possibile approccio, preso in considerazione in un primo momento, è stato quello di condizionare le particelle traccianti dell'aria in modo da ottenere uno slittamento tra la lunghezza d'onda d'emissione delle particelle insemi nanti l'aria e quella delle gocce di combustibile. In tal modo il rilevatore potrebbe discriminare i due segnali mediante l'interposizione di opportuni filtri ottici. L'adozione di tale metodologia ha, tuttavia, presentato problemi d'attuazione che hanno indotto ad adottare una soluzione differente. In particolare, le sostanze condizionanti adatte allo scopo sono, generalmente, molto costose e richiedono un'estremamente accurata preparazione al fine di ottimizzare il loro effetto dopante, causando un significativo dispendio di risorse e tempo.

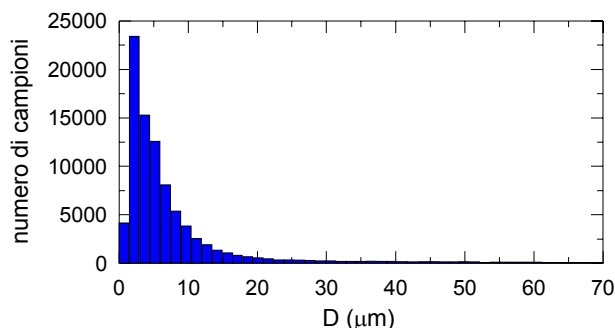
Per tali ragioni si è deciso di seguire una filosofia differente, basata su un'opportuna metodologia di post-elaborazione dei dati. Dal punto di vista operativo si è proceduto ad inseminare il flusso d'aria con gocce di olio di silicone direttamente in camera di calma. In tale modo i dati acquisiti dal sistema PDA contengono informazioni riguardo sia le gocce di combustibile che quelle di inseminante. La distinzione tra i due flussi viene effettuata successivamente in fase di post-elaborazione.

Una caratterizzazione preliminare dell'inseminante effettuata mediante PDA ha mostrato la distribuzione delle dimensioni delle gocce riportata in figura 5. E' possibile notare che tutte le gocce di inseminante hanno diametri inferiori a  $3.0\ \mu\text{m}$  e la maggiore parte delle gocce è caratterizzata da diametri inferiori ai  $2.0\ \mu\text{m}$ , dimensione appropriata per un buon tracciamento dell'aria.



*Fig. 5 Distribuzione dei diametri delle gocce d'inseminante*

Sono state inoltre effettuate misure PDA del diametro delle gocce dello spray di combustibile in un punto del campo di moto all'uscita del premiscelatore, in assenza di inseminazione dell'aria. La distribuzione ottenuta, riportata in figura 6, differisce significativamente dalla precedente. E' possibile osservare come, in questo caso, i diametri rilevati varino in un campo sensibilmente più ampio, compreso tra  $0.0$  e  $60\ \mu\text{m}$ , con presenza non trascurabile di gocce aventi diametro superiore ai  $3\ \mu\text{m}$ .



*Fig. 6 Distribuzione dei diametri delle gocce di combustibile*

Il confronto diretto tra le due distribuzioni, relative a inseminante e combustibile, ottenute indipendentemente (ciascuna delle quali mediante l'acquisizione di 50000 dati) ed elaborate utilizzando la stessa larghezza degli intervalli, è riportato in figura 7 per diametri compresi fra  $0$  e  $20\ \mu\text{m}$ .

Dall'osservazione di tale confronto è nato lo spunto per lo sviluppo di una metodologia di discriminazione dei due segnali quando acquisiti simultaneamente, basata sull'imposizione di un filtro passa-basso sul diametro delle gocce ritenute adeguate a caratterizzare il flusso dell'aria.

Nel nostro caso, da una analisi del numero di dati acquisiti per ciascun valore di diametro rilevato è risultato che, imponendo un filtro passa-basso impostato su  $2\ \mu\text{m}$ , oltre il  $98\ \%$  dei dati relativi al seeding viene conservato, evitando così di perdere le informazioni da esso derivanti. Lo stesso filtro comporta la conservazione di circa il  $30\ \%$  dei dati relativi alle gocce di combustibile, ma questo fatto non può essere ritenuto pregiudizievole della misure di velocità del flusso d'aria, in quanto, per diametri inferiori a  $2\ \mu\text{m}$ , anche le gocce di combustibile seguono il flusso d'aria e sono quindi da ritenersi equiparabili all'inseminante dal punto di vista del tracciamento dell'aria.

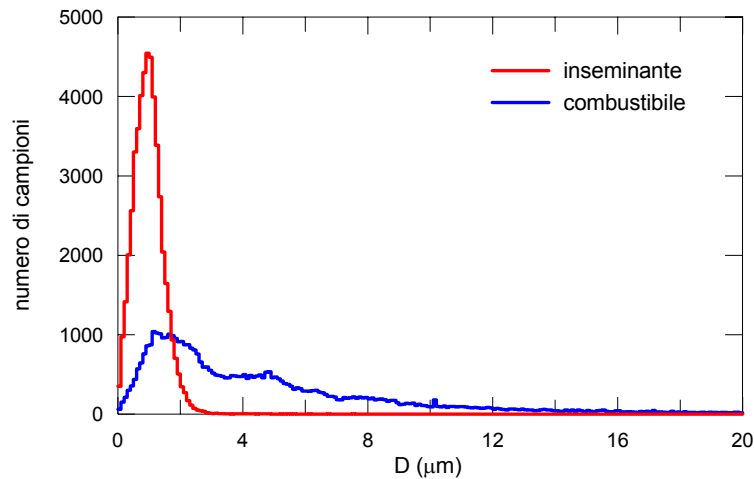


Fig. 7 Confronto delle distribuzioni dei diametri delle gocce di inseminante e di quelle del combustibile

### 3. Risultati e discussione

Il metodo di discriminazione di fase sopra presentato è stato con successo applicato al caso del premiscelatore oggetto di studio.

Nel seguito vengono rappresentate la distribuzione della componente assiale della velocità media, lungo la traversa posta 30 mm a valle della sezione di uscita del premiscelatore, ottenuta imponendo un filtro passa-basso per diametri inferiori a  $2 \mu\text{m}$ , e la distribuzione ottenuta elaborando tutti i dati acquisiti generati indistintamente dalle particelle inseminanti e dalle gocce di combustibile.

E' possibile notare come l'andamento concernente la sola aria presenti componenti assiali di velocità ridotte rispetto alla distribuzione ottenuta senza filtro (figura 8). Il fenomeno è coerente con l'aver tagliato nel caso filtrato il segnale proveniente dalle particelle di diametro e massa maggiori, quindi dotate di maggiore quantità di moto ed inerzia, e pertanto meno influenzate e "guidate" dal campo di moto della sola aria.

Il medesimo criterio che ha permesso di discriminare il campo di moto dell'aria da quello dalle gocce di combustibile è stato applicato imponendo al filtro, in fase di elaborazione dati, limiti superiore ed inferiore via via crescenti, così da porre la schermatura in corrispondenza di valori progressivamente maggiori dei diametri rilevati. In tal modo è stato possibile caratterizzare il comportamento delle gocce di combustibile comprese in differenti intervalli di diametri.

Le finestre di osservazione prese in considerazione sono comprese rispettivamente tra i limiti  $0 \div 2 \mu\text{m}$ ,  $2 \div 10 \mu\text{m}$ ,  $10 \div 20 \mu\text{m}$ , oltre  $20 \mu\text{m}$ . I profili di velocità ottenuti sono quelli riportati in figura 9.

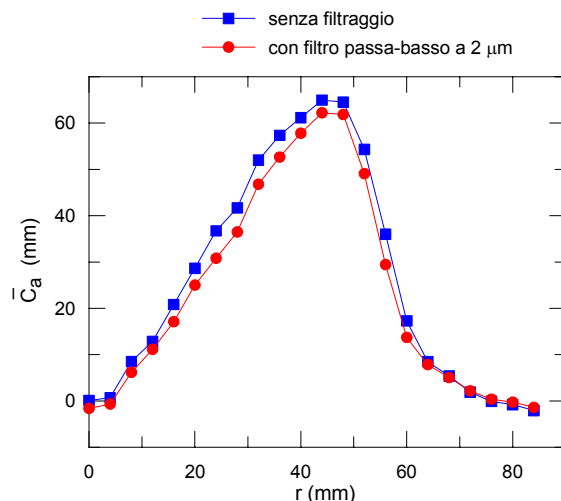


Fig.8 Distribuzioni di velocità assiale ottenute senza filtro e con filtro passa-basso a  $2 \mu\text{m}$

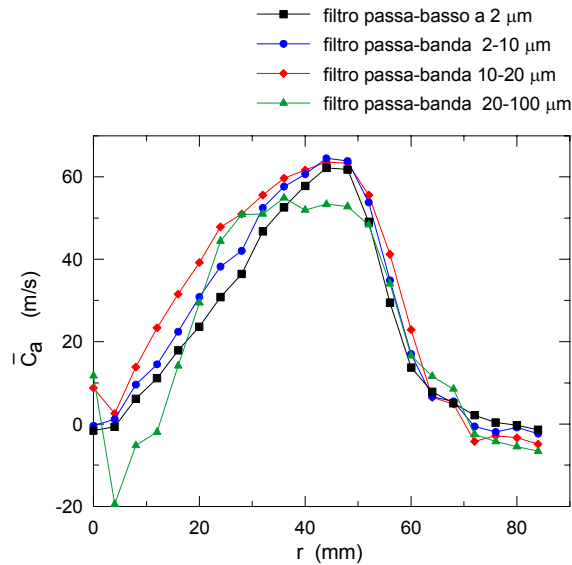


Fig.9 Distribuzioni di velocità assiale per diversi diametri delle gocce.

E' così possibile osservare che la distribuzione di velocità delle gocce di combustibile varia sensibilmente con il diametro ed in particolare le gocce di diametro maggiore, peraltro piuttosto rare, presentano velocità assiali negative in prossimità dell'asse e una distribuzione tendenzialmente più uniforme nella zona di massima velocità.

L'effetto dell'iniezione del combustibile liquido sul flusso della fase gassosa può essere dedotto dal confronto della distribuzione della velocità assiale dell'aria misurata a freddo e senza iniezione di combustibile e di quella misurata a caldo ( $T=450\text{ K}$ ) con iniezione di combustibile liquido (figura 10).

Le prove sono state effettuate a parità di portata massica di aria e quindi il preriscaldamento spiega l'aumento di circa 20 m/s della velocità assiale massima. A parte questo fatto, le distribuzioni di velocità sono simili, ma la zona di ricircolazione osservabile in prossimità dell'asse senza iniezione di combustibile è molto più estesa radialmente (circa 15 mm) e caratterizzata da velocità assiali negative più elevate (circa 10 m/s) rispetto al caso con iniezione di combustibile (zona di ricircolazione di dimensione radiale inferiore a 5 mm con velocità assiali prossime a zero). L'iniezione del combustibile, grazie alla sua quantità di moto positiva ed all'interazione iniziale con il flusso d'aria in prossimità dell'asse, gioca quindi un ruolo importante nella riduzione della ricircolazione, che, come dimostrato da dettagliate indagini sperimentali a freddo [12], ha origine all'interno del premiscelatore e potrebbe causare preoccupanti fenomeni di autoignizione e ritorno di fiamma in presenza di combustione.

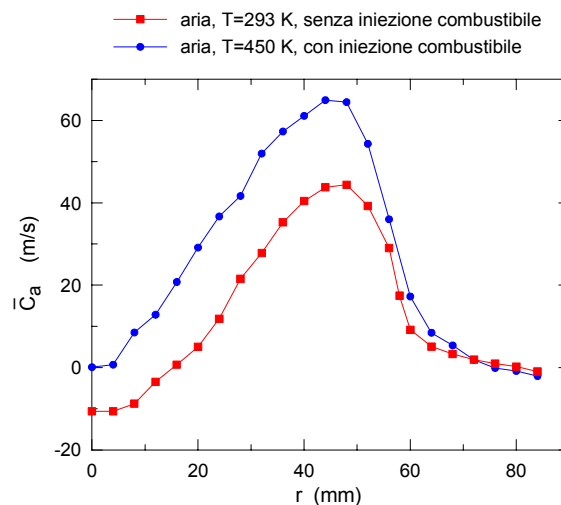


Fig.10. Distribuzioni della velocità assiale mediata temporalmente sulla traversa di misura senza e con iniezione di combustibile

Le indagini sperimentali a freddo sopra citate [12] hanno mostrato inoltre che la regione di ricircolazione si sviluppa spazialmente con una configurazione a spirale che ruota intorno all'asse del premiscelatore con una velocità angolare caratteristica, creando delle perturbazioni periodiche che potrebbero innescare fenomeni instabilità in presenza di combustione. Le misure di velocità dell'aria effettuate nella presente campagna di prove ed elaborate con la tecnica della media di insieme confermano la presenza di tale fenomeno. La figura 11 mostra gli andamenti temporali della velocità assiale in un periodo della perturbazione per i casi senza e con iniezione di combustibile. In entrambi i casi l'ampiezza delle oscillazioni è rilevante e nel caso con iniezione di combustibile si raggiungono valori negativi di -20 m/s, che indicano la presenza di una zona di forte ricircolazione instazionaria, malgrado la riduzione dell'estensione della zona di ricircolazione del flusso mediato nel tempo discussa precedentemente.

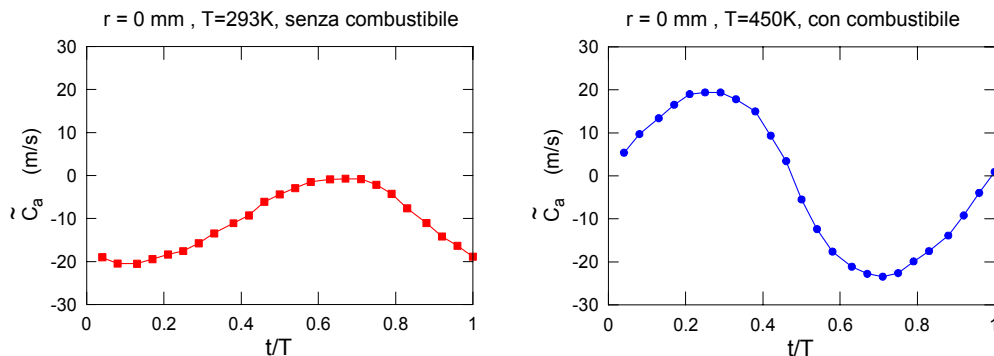


Fig.11 Andamento temporale della velocità assiale mediata in fase senza e con iniezione di combustibile

#### 4. Conclusioni

La necessità di ottenere informazioni sull'influenza esercitata dall'iniezione di combustibile sul campo di moto dell'aria generato da un condotto di premiscelazione ha portato allo sviluppo di un tecnica per la misura della velocità dell'aria in un flusso bifase, basata sulla post-elaborazione dei dati rilevati da un sistema PDA.

La tecnica si è rivelata di facile implementazione ed applicazione; nondimeno è risultata essere uno strumento efficace nel discriminare fasi diverse all'interno del medesimo flusso.

La facilità d'applicazione ha permesso di porre le basi per l'analisi dettagliata delle caratteristiche medie e tempo-varianti del complesso flusso tridimensionale generato dal condotto di premiscelazione e per lo studio dell'interazione tra aria e combustibile atomizzato.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] A.H. LEFEBVRE, The role of Fuel Preparation in Low emission Combustion, *ASME Paper No. 95-GT-465*, 1995.
- [2] O.M. UMURHAN, Exploration of fundamental matters of acoustic instabilities in combustion chambers, *Centre for Turbulence Research, Annual Research Briefs*, pp. 85-98, 1999.
- [3] C.O. PASCHEREIT, P. FLOHR, E. GUTMARK, M. BOCKHOLTS, Numerical and experimental analysis of acoustically excited combustion instabilities in gas turbine, *AIAA Paper No. 2000-2076*, 2000.
- [2] K. SCHILDMACHER, R. KOCH, S. WITTING, A.H. LEFEBVRE, W. KREBS, S. HOFFMAN, Experimental Investigation of the Temporal Air-Fuel Mixing Fluctuations and Cold Flow Instabilities of a Premixing Gas Turbine Burner, *ASME Paper No. GT2003-38799*, 2003.
- [3] J. CARROTTE, C. BATCHELOR-WYLAM, Characterization of the Instantaneous Velocity and Mixture Field Issuing from a Lean-Premixed Module (LPM), *ASME Paper No. GT2003-38663*, 2003.

- [4] A. BOUTIER, Accuracy of Laser Velocimetry, *Lecture Series 1991-05*, VKI, Brussels, 1991.
- [5] D. MODARRESS, H. TAN, A. NAKAYAMA, Evaluation of Signal Processing Techniques in Laser Anemometry, *Proc. Fourth International Symposium on Application of Laser Anemometry to Fluid Dynamics*, Lisbon, 1988.
- [6] B. BRANDT, K.O. GUGEL, C. HASSA, Experimental Investigation of the Liquid Fuel Evaporation in a Premix Duct for Lean Premixed and Prevaporized Combustion, *ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, 119, pp. 815-821, 1997.
- [7] C. TROPEA, T.-H. XU, F. ONOFRI, G. GREHAN, P. HAUGEN, Dual Mode Phase Doppler Anemometry, *Proc. 7th Intl. Symposium on Application s of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, Lisbon, 1994.
- [8] A. NAQWI, R. MENON, An Adaptative Phase/Doppler System for Sizing Nanometer to Millimeter Size Particles in a Variety of Fluid-Particle Combinations, *Laser Anemometry, ASME FED-Vol.229*, pp. 265-272, 1995.
- [9] A. NAQWI, M. ZIEMA, F. DURST, Fine particle sizing using an extended phase Doppler anemometer, *5th European Symp. Particle Characterization*, pp. 267-279, Nuremberg, Germany, 1992.
- [10] W.D. BACHALO, S.V. SANKAR, Analysis of the Light Scattering Interferometry for Spheres Larger Than the Light Wavelength, *Proc. 4th Intl. Symposium on Application s of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, Lisbon, 1988.
- [11] M. BRANDT, M. RACHNER, G. SCHMITZ, An Experimental and Numerical Study of Kerosene Spray Evaporation in a Premix Duct for Gas Turbine Combustors at High Pressure, *Combust. Sci. and Tech.*, 138, pp. 313-348, 1998.
- [12] E. CANEPA, P. DI MARTINO, P. FORMOSA, M. UBALDI, P. ZUNINO, Unsteady aerodynamics of an aero-engine double swirler LPP burner, *ASME paper No. GT2004-54212*, 2004.