



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sperimentazione in galleria del vento di bruciatori non convenzionali

*Roberto Camussi, Tiziano Pagliaroli
(Università Roma Tre)*

SPERIMENTAZIONE IN GALLERIA DEL VENTO DI BRUCIATORI NON CONVENZIONALI

Roberto Camussi, Tiziano Pagliaroli (Università Roma Tre)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: 2.2 – Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂

Responsabile Progetto: Antonio Calabrò, ENEA

Indice

<u>INTRODUZIONE</u>	4
<u>1. Il modello di bruciatore</u>	4
1.1 <u>Definizione della geometria</u>	4
1.2 <u>Test preliminari tramite CFD</u>	6
1.3 <u>Set up sperimentale</u>	9
1.3.1 <u>Descrizione del modello e del circuito di alimentazione</u>	9
1.3.2 <u>Differenze tra il modello sperimentale e la geometria nominale</u>	12
<u>2. Tecniche di misura e parametri di acquisizione</u>	16
2.1 <u>Tecniche di misura utilizzate</u>	16
2.1.1 <u>Messa a punto della tecnica PIV su un modello semplificato</u>	16
2.1.2 <u>Messa a punto del sistema microfonico</u>	18
2.2 <u>Post-processing dei dati</u>	18
<u>3. Risultati ottenuti</u>	19
3.1 <u>Fluttuazioni di pressione</u>	20
<u>4. Conclusioni</u>	26
<u>5. Bibliografia</u>	27

INTRODUZIONE

Il presente documento contiene la descrizione delle attività svolte, in accordo con quanto riportato nel documento [0]. Il progetto di ricerca si è sviluppato secondo le fasi seguenti:

- E' stato progettato e realizzato un modello di bruciatore di tipo Trapped Vortex (TVC) secondo una geometria concordata con ENEA. La progettazione ha previsto una fase preliminare basata su simulazioni numeriche CFD di tipo RANS. Tali studi preliminari hanno consentito di risolvere alcune problematiche di carattere progettuale in particolare riguardanti l'influenza delle pareti sui campi di velocità. Nella fase realizzativa, la predisposizione del modello definitivo si è basata sulla progettazione CAD dei singoli componenti e la loro realizzazione tramite lavorazioni condotte principalmente in-house. Data la complessità della geometria, particolare attenzione è stata rivolta alla progettazione e realizzazione dell'impianto di alimentazione e di iniezione per l'utilizzo della tecnica di misura della velocità. La descrizione di questa fase delle attività viene riportata nel capitolo 1.
- Sono state messe a punto le tecniche di misura per la caratterizzazione sperimentale del modello di bruciatore. In particolare, si è utilizzata la tecnica Particle Image Velocimetry (PIV) per la misura di campi bidimensionali di velocità e un array di microfoni per la misura delle fluttuazioni di pressione a parete in più punti. Per la messa a punto di entrambe le tecniche sono state condotte delle campagne di misura preliminari. Per quanto riguarda la PIV, sono state effettuate delle prove su di un modello di bruciatore semplificato realizzato ad hoc. Tali prove hanno consentito di ottimizzare sia le caratteristiche del sistema di iniezione che i parametri di post-processing dei dati acquisiti. L'array di microfoni, ed il relativo sistema di acquisizione, è stato testato in un getto d'aria ad alta velocità installato in una camera anecoica. Tale facility è disponibile presso il laboratorio sperimentale del DIMI. Il Cap. 2 contiene la descrizione delle tecniche di misura e delle prove preliminari condotte.
- Sono state effettuate delle campagne di misura in varie condizioni di flusso secondo valori delle portate dei condotti di alimentazione preventivamente concordate con ENEA. I risultati ottenuti sono presentati nel Cap. 3 assieme all'interpretazione fisica degli stessi. La matrice delle prove effettuate viene invece riportata nel Cap. 2.

Occorre sottolineare che, a causa della geometria selezionata, in accordo con ENEA, non si è ritenuto opportuno effettuare delle prove in Galleria del Vento. Contrariamente a quanto previsto dal contratto si è infatti considerato che le prove in galleria del vento avrebbero portato ad un ulteriore aumento del grado di complessità dell'apparato sperimentale senza però fornire valore aggiunto in termini di qualità delle misure e rilevanza dei risultati al fine della comprensione fisica dei fenomeni di interesse.

1. Il modello di bruciatore

La geometria del bruciatore è stata ampiamente discussa con i ricercatori ENEA ed è stata definita in forma conclusiva da parte di ENEA attraverso la comunicazione [2]. Sulla base della geometria assegnata, si è realizzato un modello che ha rispettato per quanto possibile le dimensioni e le portate di flusso assegnate. Nel seguito viene descritto il set-up sperimentale e le prove effettuate preliminarmente alla sua realizzazione.

1.1 Definizione della geometria

Nella Figura 1, viene riportato uno schema della geometria fornita da ENEA. Il bruciatore può essere considerato composto da tre moduli, il singolo modulo è riportato nel dettaglio in Figura 2. Il modello

realizzato per le prove sperimentali a freddo, riproduce, con buona approssimazione, la geometria del singolo modulo.

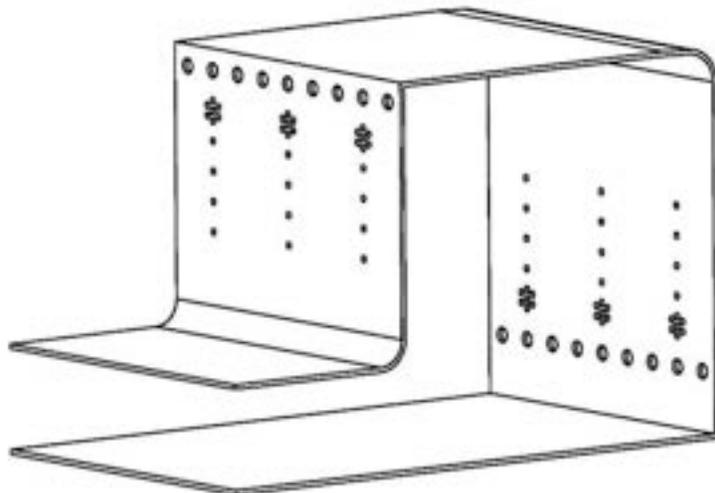


Figura 1: Schema generale del bruciatore

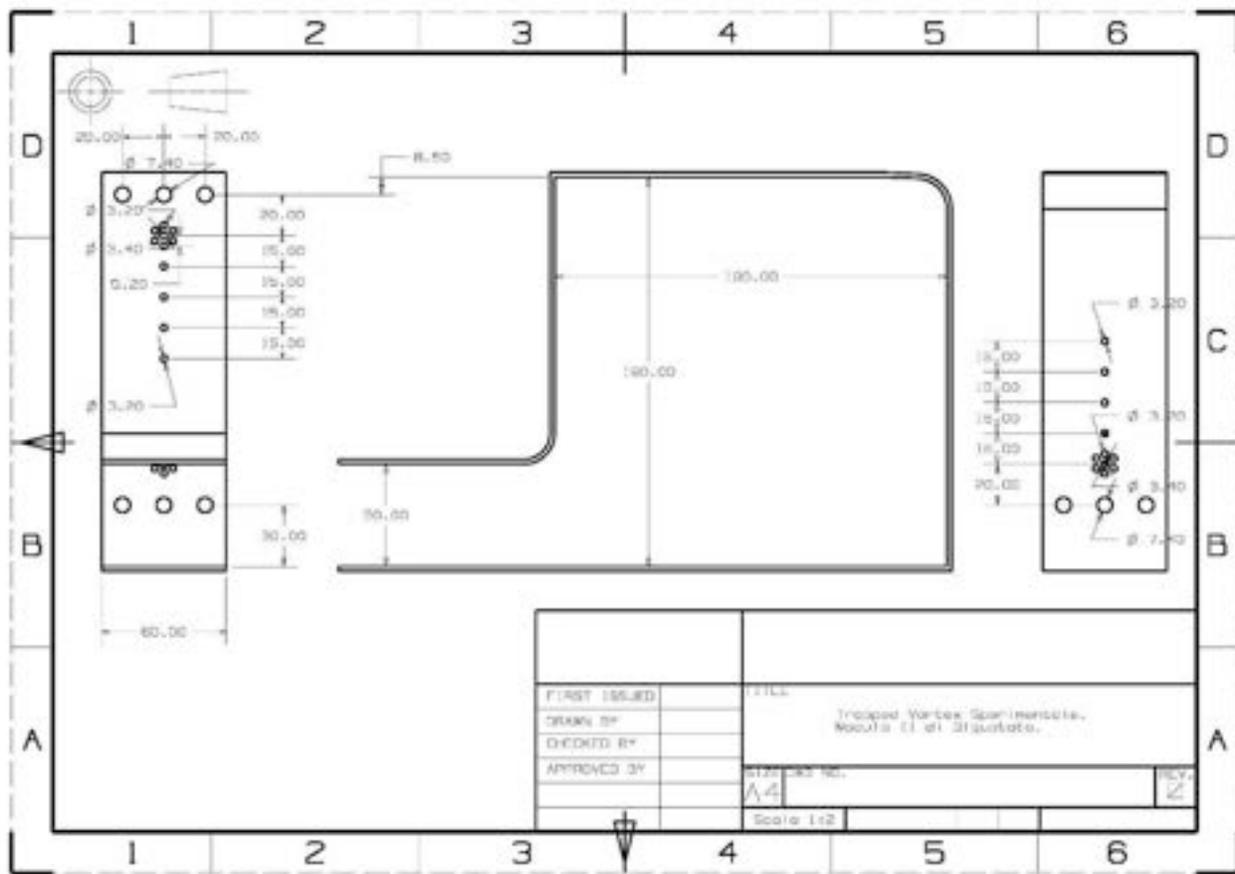


Figura 2: Disegno di dettaglio di un modulo del bruciatore

Come si può osservare, l'aria viene fornita attraverso i fori di dimensione maggiore mentre il combustibile fluisce attraverso i fori di dimensione inferiore. Il bruciatore fornisce una densità di potenza di progetto di circa 15MW/m^3 Bar, mentre le portate di aria e combustibile, nominali, sono le seguenti:

- Aria fori grandi superiori: 0.0055 kg/s distribuita su tre fori (un modulo)
- Aria fori grandi inferiori: 0.0055 kg/s distribuita su tre fori (un modulo)
- Aria fori piccoli verticali: 0.005kg/s distribuita su ciascuna fila verticale (un modulo)
- Combustibile: 0.000157 kg/s per ciascun foro.

Il combustibile entra a temperatura di 300 K mentre l'aria entra a 700 K .

Tenendo conto che nella sperimentazione oggetto della presente relazione, lo studio è stato effettuato a freddo ed utilizzando come gas solo l'aria, si è verificato che le condizioni di riferimento da riprodurre in laboratorio, a parità di geometria, corrispondono alle seguenti velocità del flusso:

- Velocità aria attraverso i fori grandi: $\sim 100\text{m/s}$
- Velocità aria attraverso i fori piccoli: $\sim 70\text{m/s}$

1.2 Test preliminari tramite CFD

Al fine di chiarire alcune problematiche legate alla progettazione del modello, sono state effettuate alcune simulazioni numeriche di tipo RANS mediante un codice di calcolo industriale (Fluent). Lo scopo delle simulazioni è stato soprattutto cercare di chiarire l'effetto delle pareti laterali sui campi di velocità. L'esigenza di analizzare tale effetto nasce dal fatto che, per semplicità di realizzazione, il modello da testare a freddo riproduce solo una parte del combustore reale. Risulta quindi importante chiarire se le caratteristiche di simmetria proprie del flusso nelle condizioni reali vengono rispettate anche nella configurazione adottata negli esperimenti.

Allo scopo di chiarire questi effetti, si è studiata una geometria di combustore semplificata rispetto a quella adottata per l'esperimento e riportata nel paragrafo precedente. Si è infatti considerato un combustore reale di tipo toroidale, riportato nella Figura 3a, di cui si immagina di realizzare un modello del tipo riportato in Figura 3b. La questione da chiarire è se la presenza delle pareti nel modello di Figura 3b influenza la simmetria del flusso che si realizza nel caso reale.

Le simulazioni numeriche sono state condotte mediante un approccio RANS, 3D, stazionario, adottando un modello di turbolenza $k-\epsilon$ standard. Il flusso è stato considerato non reagente, senza quindi considerare il processo di combustione. Il numero di celle è stato fissato intorno a 10^6 e si è sempre verificata la convergenza delle soluzioni mediante l'analisi dei residui.

Sono state testate diverse geometrie ed alcuni esempi sono riportati nella Figura 4. Come soluzione di riferimento è stato testato un modulo da 5 fori con condizioni di simmetria imposte alle pareti laterali. In tutti gli altri casi, al fine di riprodurre le condizioni reali, è stata imposta la condizione al contorno di non scorrimento a tutte le pareti solide.

Alcuni esempi di risultati vengono riportati in Figura 5. Come si può osservare, la configurazione che meglio preserva la simmetria del flusso nelle sezioni centrali del modello è quella con le pareti più vicine tra loro. Un confronto tra questa soluzione e la soluzione di riferimento ottenuta con le condizioni al contorno di simmetria sulle pareti laterali è riportato in Figura 6. L'accordo tra le due soluzioni è molto soddisfacente sia per i piani orizzontali che verticali.

In conseguenza di questa analisi preliminare, nella sperimentazione sulla configurazione definitiva si è optato per un modello modulare con un numero limitato di fori, simile a quello riportato nel dettaglio in Figura 2.

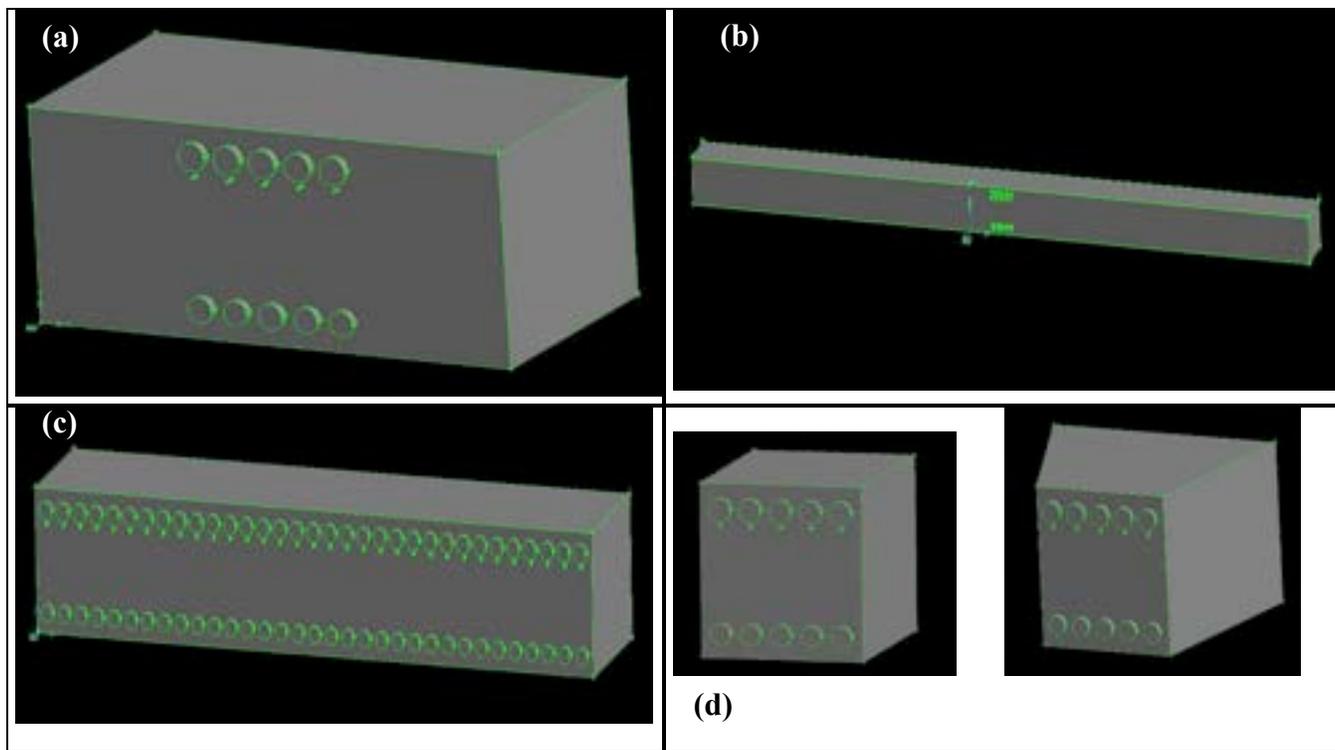
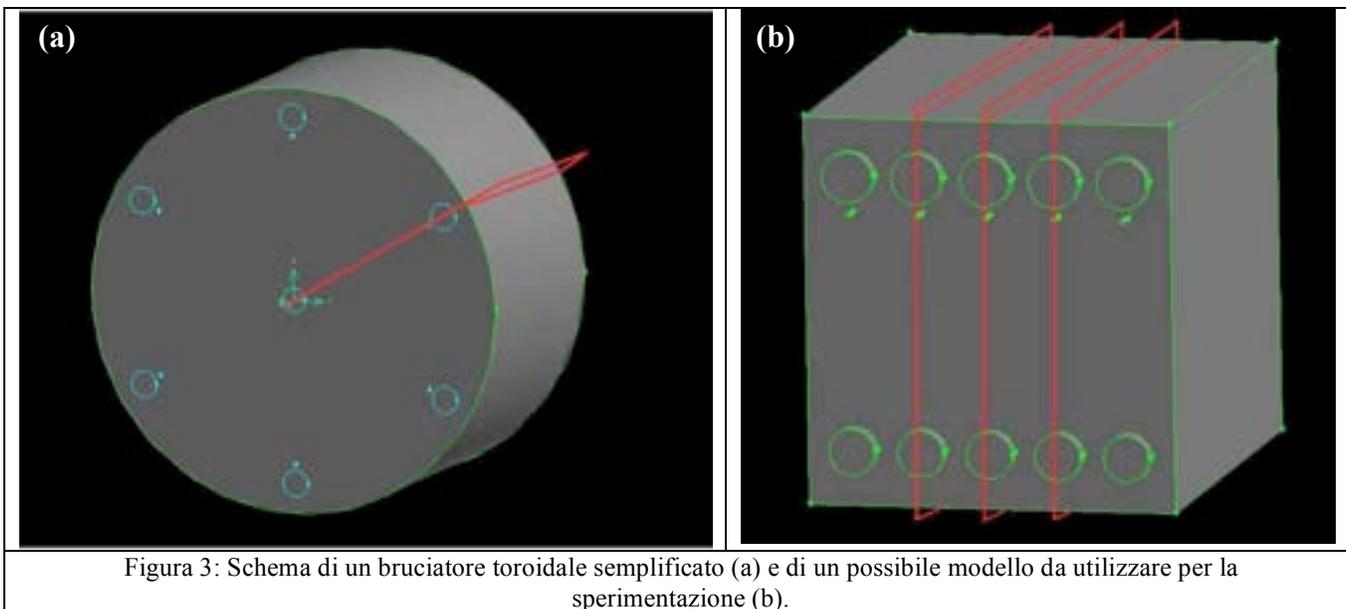


Figura 4: Alcuni esempi di geometrie testate numericamente: Camera lunga 200mm con 5 fori (a), Camera lunga 2000mm con 5 fori (b), Camera lunga 500mm completamente forata (c), Camera lunga 80mm completamente forata (d), studiata sia con pareti parallele che divergenti..

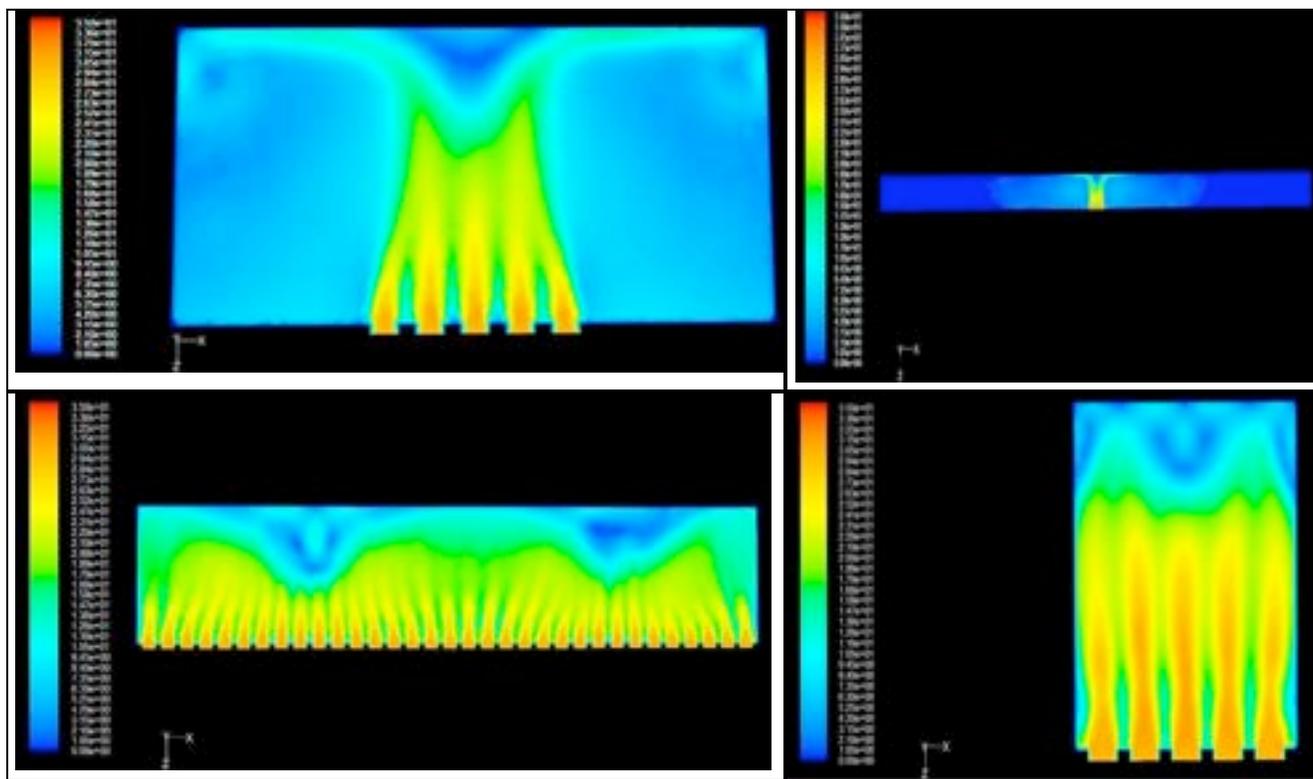


Figura 5: Esempi di risultati delle simulazioni numeriche ottenute utilizzando le condizioni al contorno di non scorrimento su tutte le pareti solide, e per alcune geometrie analizzate. La quantità fisica riportata è il modulo della velocità calcolato sul piano orizzontale di simmetria.

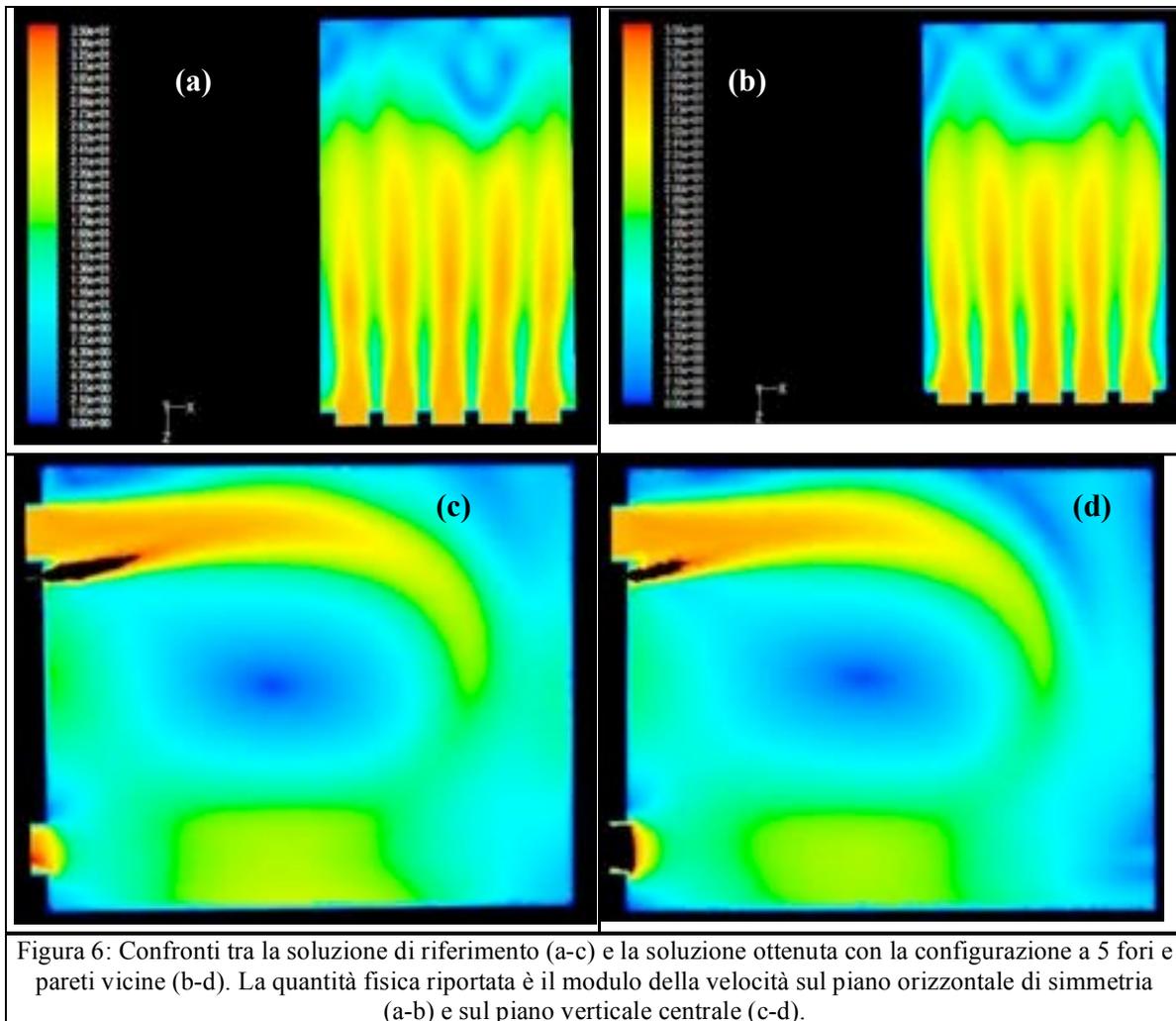


Figura 6: Confronti tra la soluzione di riferimento (a-c) e la soluzione ottenuta con la configurazione a 5 fori e pareti vicine (b-d). La quantità fisica riportata è il modulo della velocità sul piano orizzontale di simmetria (a-b) e sul piano verticale centrale (c-d).

1.3 Set up sperimentale

1.3.1 Descrizione del modello e del circuito di alimentazione

Il modello utilizzato nella sperimentazione è stato realizzato in plexiglass per garantire l'accessibilità ottica e la facilità di lavorazione. Occorre infatti sottolineare che molte delle lavorazioni meccaniche necessarie alla realizzazione dei componenti del modello sono state effettuate da ricercatori del DIMI utilizzando le apparecchiature disponibili presso la Sezione di Termofluidodinamica e Aerodinamica del Laboratorio sperimentale di Ingegneria Meccanica e Industriale (nel seguito chiamata "laboratorio"). Tutte le fasi della sperimentazione, dalla realizzazione del modello alle misure di velocità e pressione, sono state effettuate presso questo laboratorio. Il modello è stato collegato all'aria compressa ivi disponibile e fornita, alla pressione di 8 bar, da un compressore dotato di un serbatoio di 2m^3 .

Nella realizzazione del modello si è cercato di riprodurre per quanto possibile la geometria reale riportata nella Figura 2. Essendo la geometria e le portate di flusso riproducibili direttamente nell'esperienza senza alcuna scalatura, non è stato necessario introdurre parametri adimensionali per il rispetto di criteri di similitudine.

La progettazione del modello è stata effettuata mediante disegni concettuali e CAD. Nella Figura 7 vengono riportate delle foto illustrative di alcuni componenti del modello mentre nella Figura 8 si riporta una vista d'insieme dell'allestimento realizzato sia per le misure di velocità che di pressione. Come si può osservare, al fine di ottimizzare i tempi di esecuzione delle prove, sono stati realizzati 2 modelli, uno dedicato alle prove PIV e l'altro da utilizzare per le misure di fluttuazione di pressione mediante microfoni. Nella Figura 9 viene riportato un dettaglio dell'accorgimento seguito per l'installazione dei microfoni la cui parte sensibile viene posizionata a filo con la superficie interna della parete.



Figura 7: Foto di alcuni componenti del modello di bruciatore utilizzato per le prove PIV.

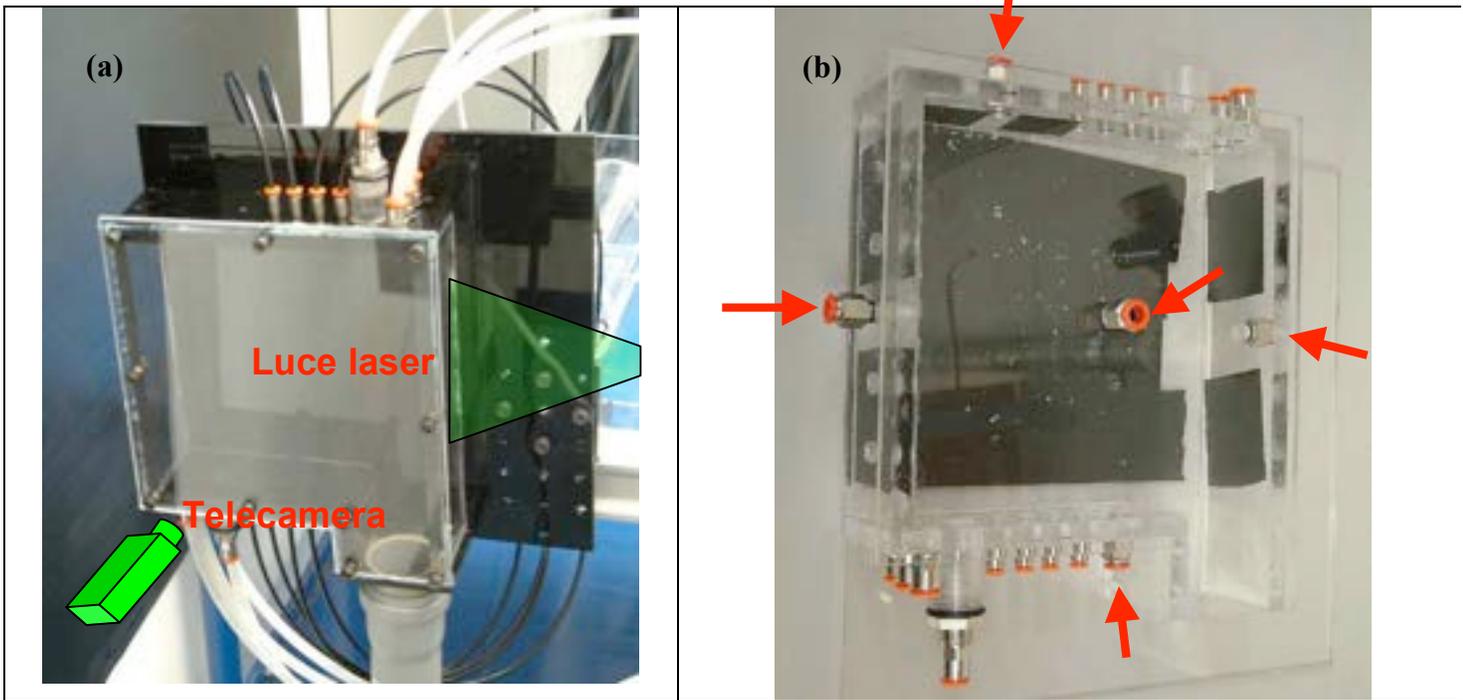


Figura 8: Schema del set-up di prova per le misure PIV (a) e microfoniche (b). Le frecce riportate nella foto (b) indicano la posizione dei 5 microfoni utilizzati per le misure.

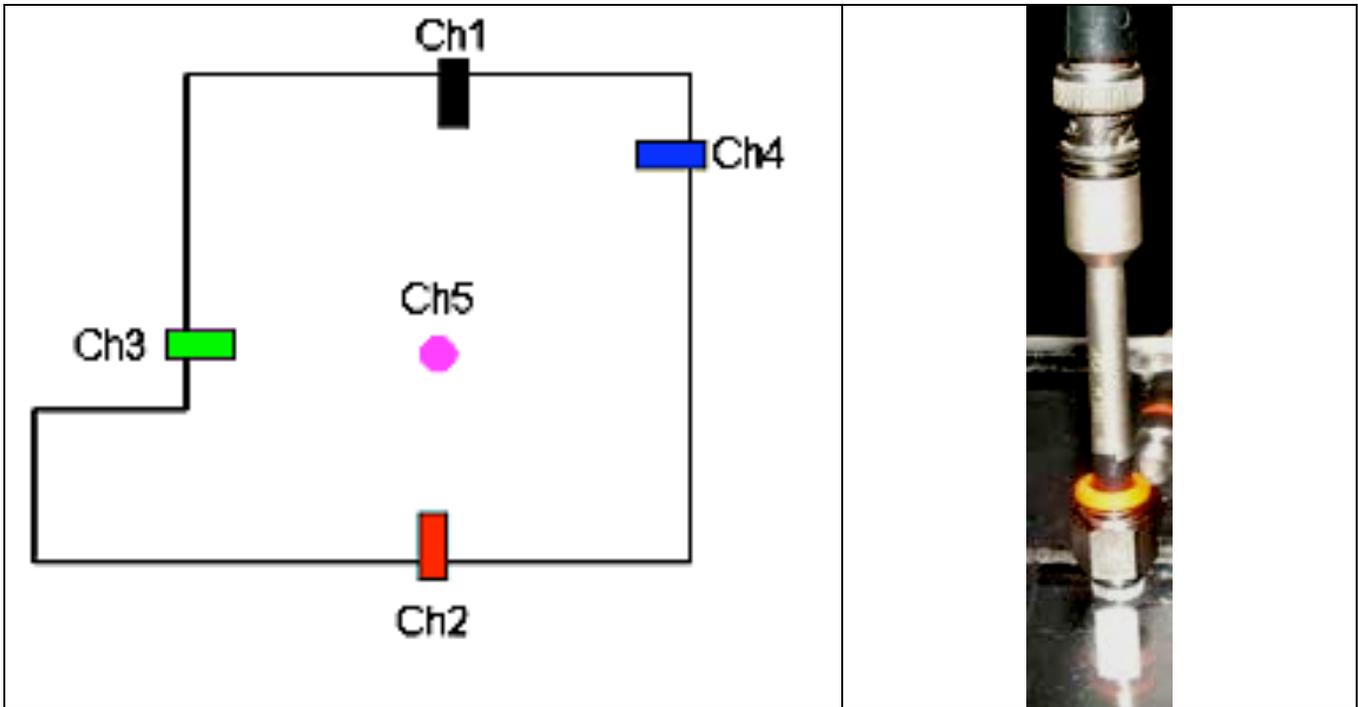


Figura 9: Dettaglio della configurazione adottata per l'installazione dei microfoni. Lo schema di sinistra illustra in maniera schematica il posizionamento dei microfoni. La foto di destra mostra l'alloggiamento del microfono che viene inserito nei collettori evidenziati nella figura precedente e la cui parte sensibile viene posizionata a filo con la superficie interna della parete.

Come si può osservare dalle Figure 7 e 8, di particolare complessità è risultato essere il sistema di alimentazione dell'aria. Al fine di riprodurre le condizioni di flusso desiderate, è stato necessario infatti realizzare due circuiti di alimentazione indipendenti. Un circuito fornisce l'alimentazione ai fori di maggiore dimensione, l'altro ai fori più piccoli, incluso il cluster di fori posizionato al di sotto dei fori grandi. Nella Figura 10 vengono riportate delle foto illustrative del sistema utilizzato. Nella stessa figura è anche riportato un dettaglio delle connessioni dei circuiti dell'aria con il modello. Come si può notare, il cluster di fori viene alimentato da un unico condotto, mentre gli altri fori sono collegati a tubi indipendenti. Sono state effettuate delle misure con un tubo di Pitot per verificare l'uniformità delle portate in uscita dai vari tubi. I risultati sono stati soddisfacenti e non vengono qui riportati per motivi di brevità.

Nella Figura 11 viene riportato uno schema semplificato del sistema di alimentazione.

Un elemento essenziale utilizzato per l'effettuazione delle misure PIV è il sistema di alimentazione dell'inseminante. Poiché il circuito di alimentazione del flusso d'aria si trova a pressione superiore rispetto alla pressione atmosferica, è stato realizzato ad hoc un sistema per il mescolamento dell'inseminante con l'aria e la sua immissione nel circuito di adduzione che fornisce il flusso d'aria al modello. Il sistema è costituito da un cilindro in plexiglass in cui viene inserito l'inseminante ed una ventola comandata da un potenziometro. Quest'ultimo dispositivo consente il controllo del grado di mescolamento tra inseminante ed aria. L'inseminante utilizzato è borotalco commerciale che si è verificato essere costituito da particelle sufficientemente piccole (dell'ordine di $5\mu\text{m}$) e con buone proprietà riflettenti (ved. par. 2). Nella Figura 12 vengono riportate delle foto illustrative del sistema.

1.3.2 Differenze tra il modello sperimentale e la geometria nominale

A causa di limitazioni nell'ingombro dei sistemi di connessione dei tubi di alimentazione con la parete del modello, sono state effettuate delle piccole modifiche al disegno realizzativo rispetto alla configurazione nominale riportata nella Figura 2. In particolare si è modificata parzialmente la distanza tra i fori piccoli ed il cluster di fori posizionato vicino ai fori più grandi. A titolo di chiarimento si riporta nella Figura 13 un confronto tra il disegno realizzativo delle piastre forate utilizzate per il modello dell'esperimento e le dimensioni nominali. La sovrapposizione dei due disegni, evidenzia che le differenze tra la configurazione adottata nell'esperimento e quella nominale fornita da ENEA, sono minimali. Si ritiene quindi che, dal punto di vista fluidodinamico, la configurazione testata in laboratorio rappresenta in maniera accurata il comportamento nominale.

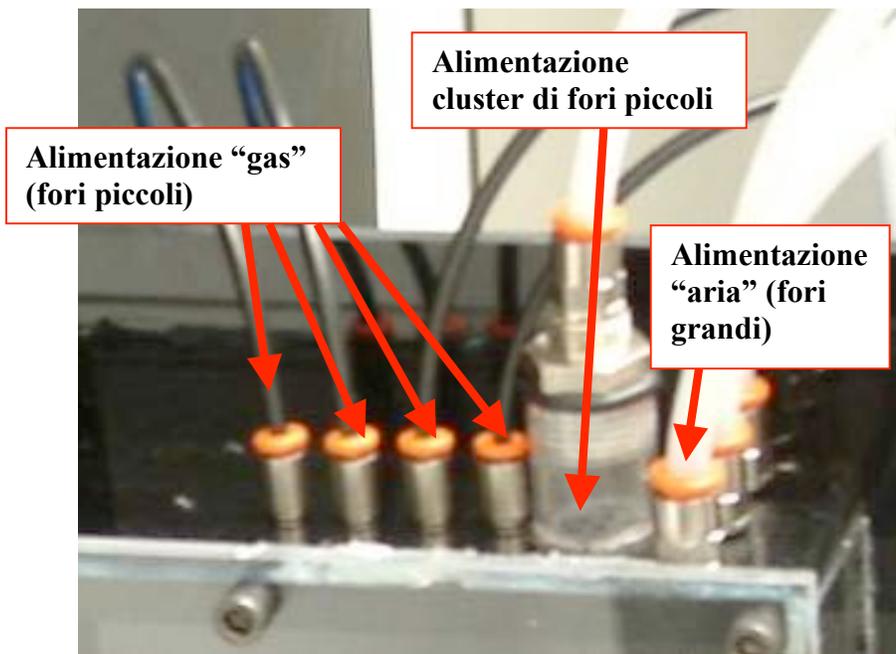
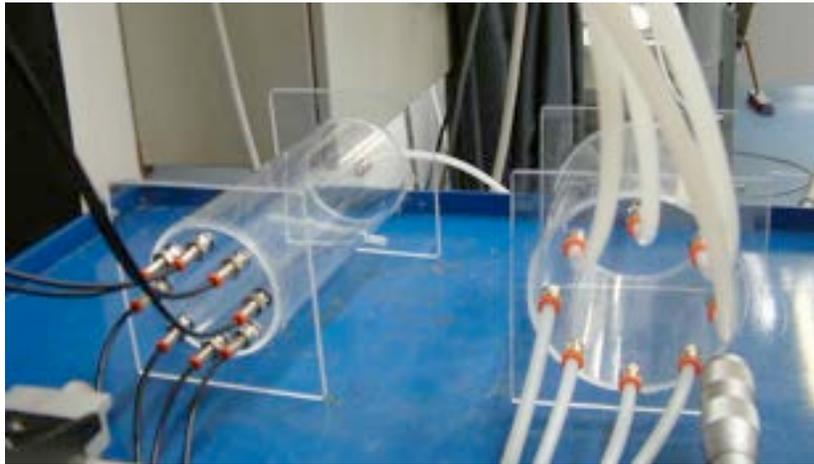
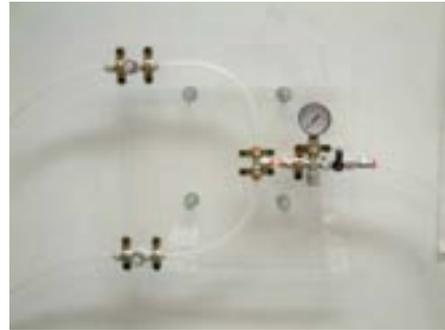
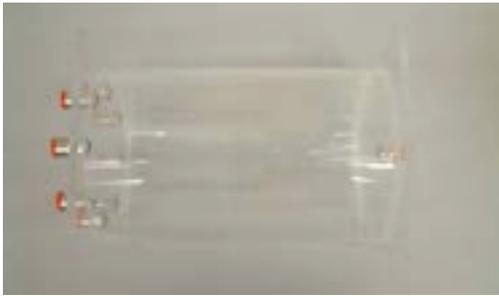


Figura 10: Foto illustrative di alcuni elementi del sistema di alimentazione utilizzato. Nella foto al centro sono riportati i serbatoi da cui derivano i circuiti di alimentazione per i fori piccoli (tubi neri) e per i fori grandi (tubi bianchi). Nella foto in basso sono evidenziate le connessioni con il modello ed in particolare, il sistema di connessione adottato per alimentare il cluster di fori con un unico condotto.