



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un bruciatore in scala di laboratorio per la combustione di miscele gassose in ambiente ricco di CO₂

R. Camussi, T. Pagliaroli
G. Troiani, M. Marrocco

SVILUPPO DI UN BRUCIATORE IN SCALA DI LABORATORIO PER LA COMBUSTIONE DI MISCELE GASSOSE IN AMBIENTE RICCO DI CO₂

Roberto Camussi, Tiziano Pagliaroli (università degli Studi di Roma Tre)
G. Troiani (ENEA), M. Marrocco (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2014
Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente
Progetto: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta da combustibili fossili
Obiettivo: Cicli turbogas a CO₂
Responsabile del Progetto: :ng. Stefano Giammartini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Caratterizzazione sperimentale di bruciatori di ultima generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Guido Troiani
Responsabile scientifico Università degli studi Roma TRE: Prof. Roberto Camussi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	5
3 CONCLUSIONI.....	20
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	20

Sommario

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 2 agosto 2010 un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

Il presente allegato tecnico si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2014, per quanto attiene all'Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", Progetto B.2 (Cattura ed il sequestro della CO₂ prodotta da combustibili fossili), linea di attività c (Cicli turbogas a CO₂ –Combustione in diluizione in CO₂ EGR).

In questo ambito un'importante attività è volta allo sviluppo di bruciatori di ultima generazione ed in particolare alla messa a punto di un nuovo bruciatore premiscelato di piccola scala. Il nuovo bruciatore sarà di tipo "Slotted Burner", un test bench diffuso nei laboratori di termofluidodinamica sperimentale per la relativa semplicità della fisica associata al processo di combustione che esso sviluppa [3]. Questa caratteristica rende il bruciatore di valido supporto alla comprensione dei meccanismi alla base della combustione, e.g. l'interazione fronte di fiamma-scale fluidodinamiche.

Tale configurazione sarà improntata in un co-flow di CO₂ ad alta temperatura con la finalità di studiarne gli effetti sull'irraggiamento.

1 Introduzione

Nell'ambito della presente attività di ricerca, è stato progettato e realizzato un bruciatore di ultima generazione di tipo cosiddetto "Slotted Burner. I test preliminari volti a dimensionare il dispositivo, la progettazione, il reperimento dei materiali ed infine la realizzazione del modello per test a freddo e del bruciatore vero e proprio, hanno ricoperto un ruolo importante della presente attività.

Il dispositivo è concepito per effettuare analisi inerenti allo studio dell'adduzione di CO₂ ad alta temperatura nelle fiamme. Il bruciatore è stato studiato mediante le più avanzate tecniche di diagnostica sperimentale e simulazione numerica.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Caratterizzazione acustica del bruciatore "Slotted Burner" mediante simulazione numerica FEM

La geometria del bruciatore è stata soggetta ad un'analisi numerica preliminare, volta a caratterizzare i modi acustici del dispositivo. Lo scopo di tale attività è duplice: verificare che non ci siano modi acustici che causano fluttuazione nella portata in uscita al bruciatore e dare una valida chiave interpretativa dei risultati ottenuti, sia in condizione reattive che non-reattive. Infatti, i modi propri acustici possono accoppiarsi con le frequenze caratteristiche della fluidodinamica, ed influenzare il processo di combustione. Poiché l'obiettivo è quello di realizzare una fiamma stabile e stazionaria, lo studio dei modi acustici è di fondamentale importanza per supportare l'attività di sviluppo: dal *conceptual* design alla realizzazione del progetto esecutivo. Tale studio è stato effettuato numericamente da parte del DING mediante il codice di calcolo COMSOL basato sull'approccio agli elementi finiti. Gli esiti della simulazione sono stati impiegati nelle fasi successive per interpretare correttamente i risultati dell'analisi dei dati di pressione ottenuti in condizioni di flusso non reattivo. Di seguito (Figura 1) viene mostrata la *mesh* del bruciatore.

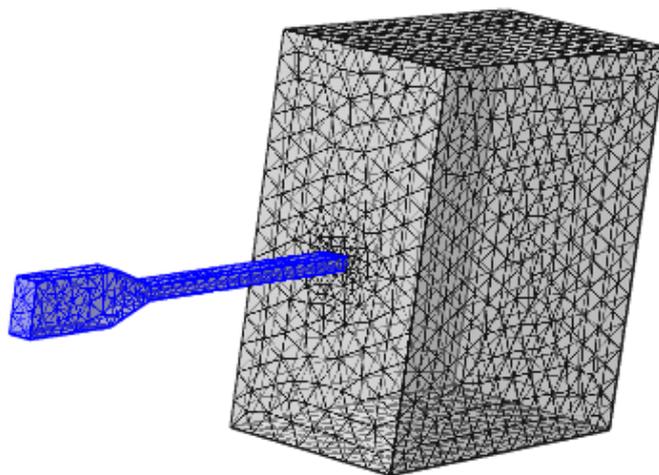


Figura 1. Mesh del modello agli elementi finiti del bruciatore slotted burner.

In Figura 1 la mesh del bruciatore è evidenziata di colore blu, mentre la mesh del dominio esterno al bruciatore, che simula l'ambiente, è di colore grigio. Mediante la simulazione è stato possibile calcolare la funzione di risposta in frequenza (FRF) del bruciatore rappresentata in Figura 2.

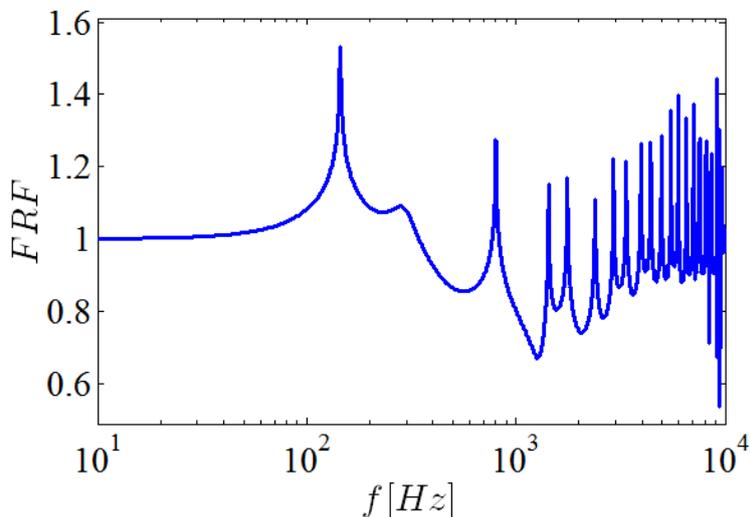


Figura 2. Funzione di risposta in frequenza del bruciatore.

Nel range 100-10000 Hz il dispositivo presenta in totale 14 modi acustici. Le frequenze dei primi 14 modi acustici, ottenute mediante la simulazione agli elementi finiti, sono raccolte nella Tabella 1.

Tabella 1. Modi acustici del bruciatore e loro frequenze.

Modo	Frequenza [Hz]	Modo	Frequenza [Hz]
1 st LT	144	8 th LT	3956
2 nd LT	801	9 th LT	4410
3 rd LT	1432	10 th LT	4958
4 th LT	1760	11 th LT	5509
5 th LT	2388	12 th LT	5958
6 th LT	2928	13 th LT	9093
7 th LT	3366	14 th LT	9438

La frequenza del primo modo acustico, ovvero il modo dominante, è 144 Hz. Tale frequenza potrebbe dare luogo ad accoppiamenti tra fluidodinamica ed acustica che potrebbero portare ad oscillazioni della portata elaborata dal bruciatore. Tali oscillazioni sono comunemente indesiderate, poiché in alcuni casi possono contribuire all'instabilità del processo. L'eventuale presenza di tale accoppiamento verrà verificata mediante delle prove sperimentali descritte all'interno del presente rapporto tecnico.

Per completezza la morfologia di alcuni dei modi acustici ottenuti è riportata nella figura 3.

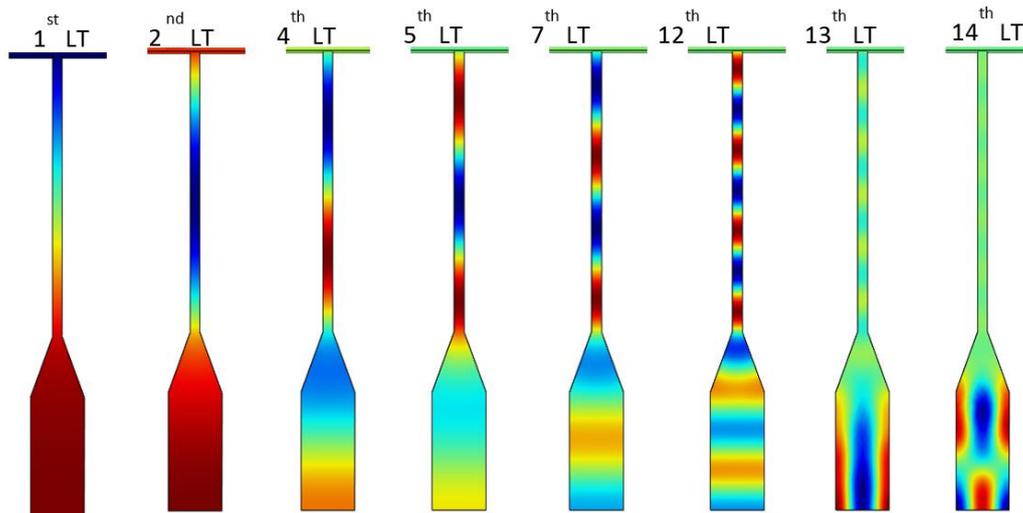


Figura 3. Modi acustici del bruciatore.

In Figura 3 con colore rosso e blu vengono indicate le regioni nelle quali si ha compressione seguita da espansione, mentre con il giallo vengono indicati i nodi.

si può osservare che il primo modo acustico sarà causa di compressioni ed espansioni nella camera di calma del bruciatore.

Allo scopo di mettere in evidenza eventuali oscillazioni acustiche nella *feedline*, che si possono accoppiare con quelle fluidodinamiche, è stato implementato il modello di FEM dell'*inlet* del bruciatore, ottenendo la FRF riportata in Figura 4.

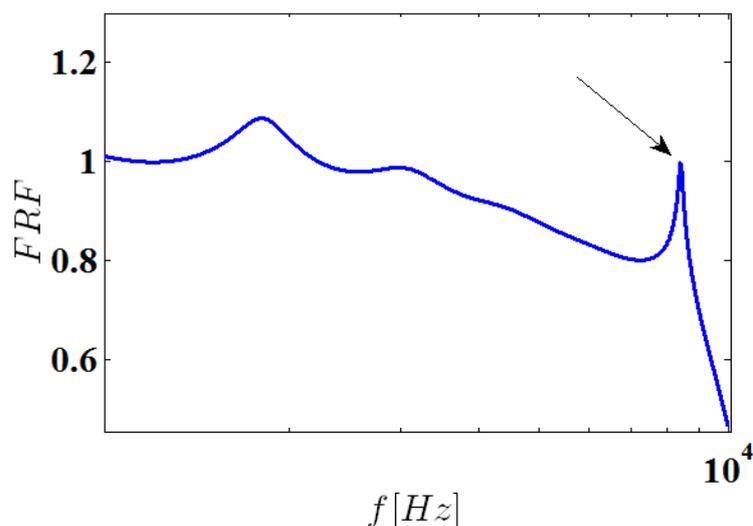


Figura 4. Funzione di risposta in frequenza dell'inlet.

L'inlet del bruciatore ha una frequenza di risonanza del primo modo acustico pari a 8402 Hz. Sarà verificato sperimentalmente che tale frequenza non presenti fenomeni di accoppiamento con la fluidodinamica. Per completezza la morfologia del primo modo acustico dell'inlet è riportata in **Figura 5**.

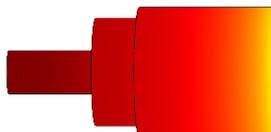


Figura 5. Primo modo acustico dell'inlet.

Caratterizzazione aeroacustica dello Slotted Burner a freddo ed in condizioni reattive

La caratterizzazione a freddo del bruciatore ha previsto la realizzazione di un modello in metacrilato e di un allestimento sperimentale specifico per le prove acustiche. In particolare è stato realizzato presso il DING un volume di prova semi-anecoico. Uno *sketch* del setup sperimentale è riportato in **Figura 6**.

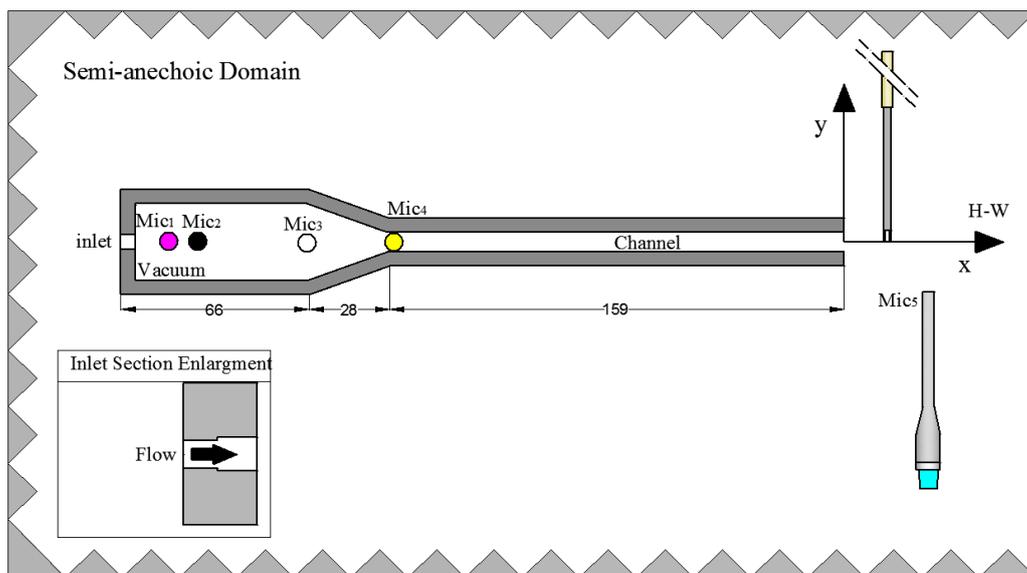


Figura 6. Rendering del setup sperimentale.

In **Figura 66** è riportata la posizione dei microfoni (Mic1-2-3-4-5), la posizione di una sonda *hot-wire*, la geometria del bruciatore in sezione e la geometria dell'inlet.

I test sperimentali sono stati condotti all'università degli studi di RomaTre utilizzando un dominio semi-anecoico di dimensioni $0.5 \times 0.2 \times 1.0$ m³. La linea di alimentazione era composta da una serie di regolatori di pressione, valvole a sfera, un *muffler* e un regolatore di portata in massa (Brooks Smart Mass Flow 5853) come illustrato in **Figura 7**.

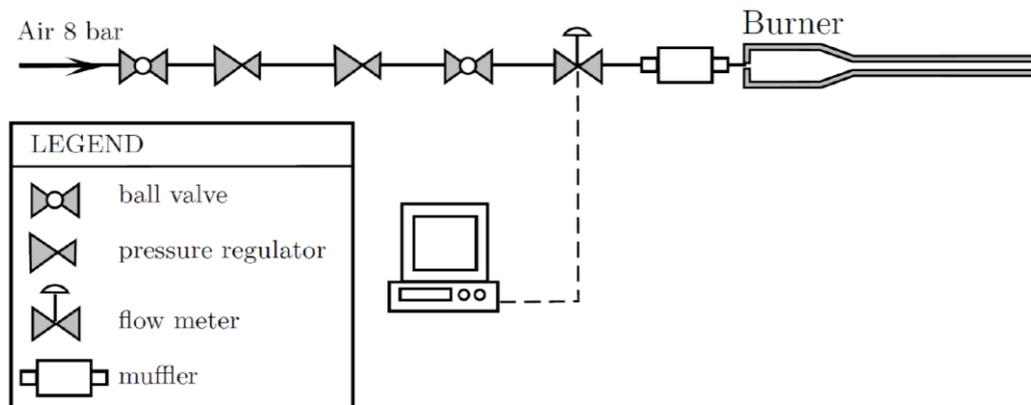


Figura 7. Diagramma unifilare della linea di alimentazione.

Le fluttuazioni di pressione a parete sono state misurate mediante l'impegno di 5 microfoni Microtech Gefell M360. I segnali sono stati campionati con una scheda National Instruments A/D board ad una frequenza di 32768 kHz per 30 s. La medesima catena di misura è stata utilizzata per l'acquisizione del segnale Hot-wire (tipo DANTEC 55P11) il quale è stato condizionato mediante il sistema -AN-1003 Lab-System-.

Tutte le serie temporali sono state acquisite simultaneamente.

Di seguito (Figura 7) si può osservare una fotografia del set-up sperimentale realizzato.

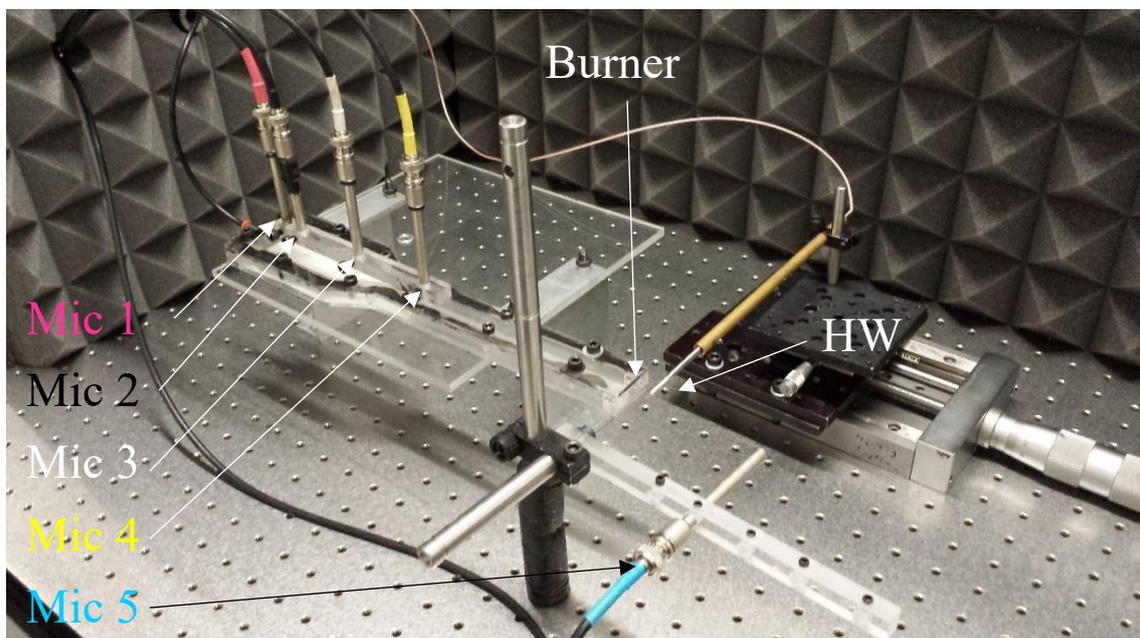


Figura 8. fotografia del setup sperimentale.

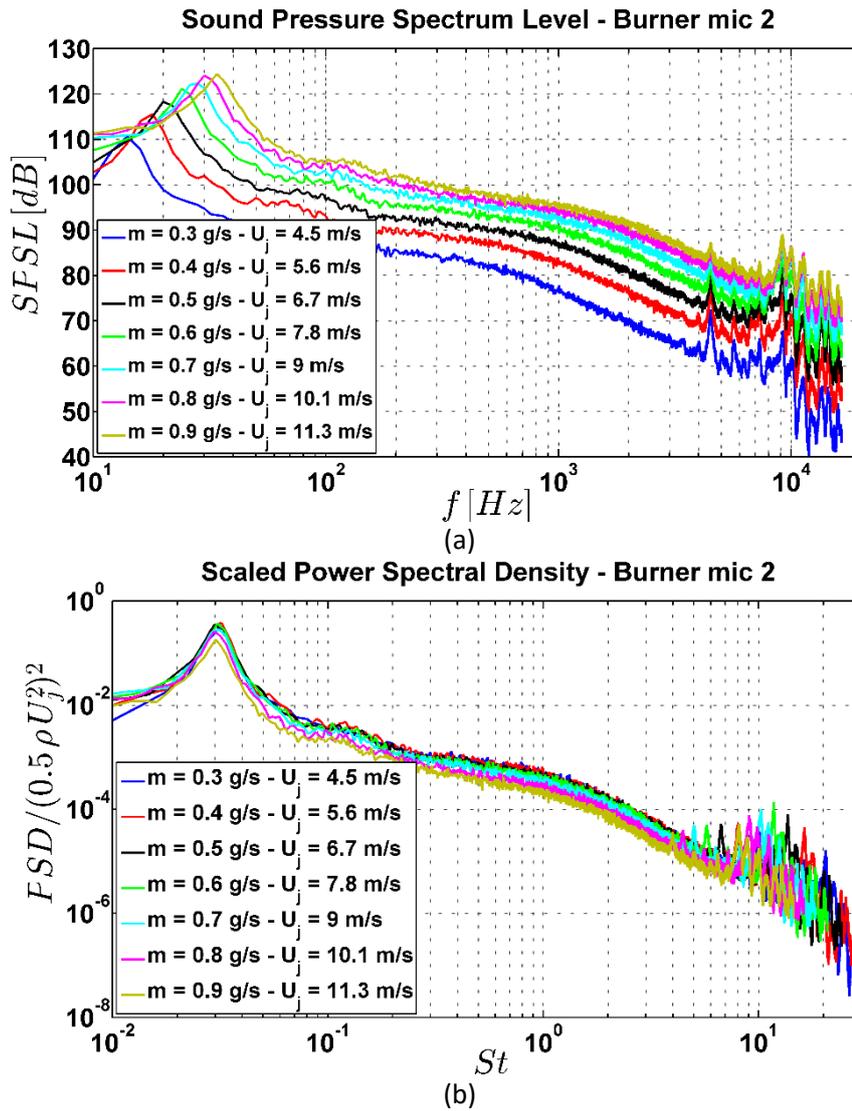
Per realizzare la foto la pareti anecoiche superiore, inferiore e laterale sono state rimosse.

I test sono stati effettuati a diverse portate di aria e gli spettri di pressione ottenuti mediante l'elaborazione dei segnali campionati dai vari microfoni sono mostrati in **Figura 9**.

In **Figura 9** (a) si nota la presenza di un picco dominante che trasla all'aumentare della velocità di alimentazione. Rappresentando i medesimi spettri in funzione del numero di Strouhal, definito come:

$$St = fD/U_j$$

dove f è la frequenza, D una dimensione caratteristica e U_j una velocità dell'inlet rappresentativa, si osserva un collasso degli spettri e della componente spettrale dominante. Da tale comportamento si deduce che la componente spettrale è ascrivibile a fenomeni di carattere fluidodinamico e non di carattere acustico. La presenza di tale componente tonale è indesiderata e non coincide con nessun modo acustico. In fase di progettazione è stato preso in considerazione questo aspetto e progettato un sistema di controllo passivo della fenomenologia. Al fine di investigare in tal senso il DING ha realizzato un modello CFD del bruciatore. Nello specifico mediante l'utilizzo di COMSOL è stata fatta una simulazione RANS del bruciatore (v. Figura 10).



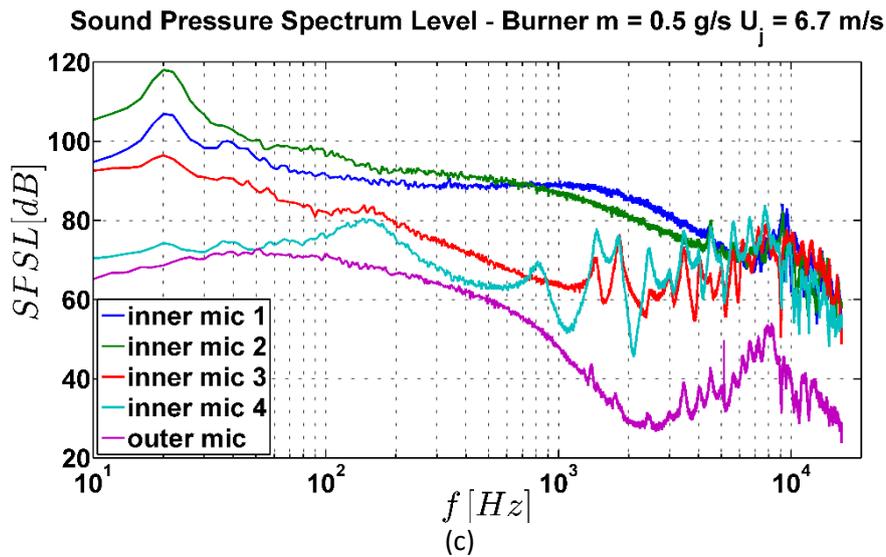


Figura 9. Sound pressure spectral level (SPSL) ottenuto per diverse velocità di alimentazione rappresentato vs frequenza (a) e numero di Strouhal (b); Sound pressure spectral level (SPSL) ottenuto per diversi microfoni a velocità di alimentazione costante.

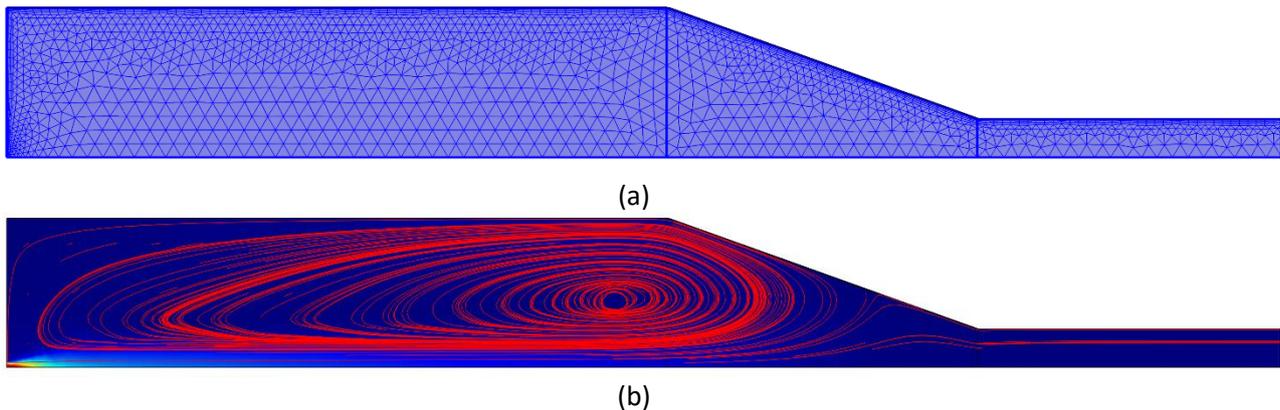


Figura 10. Mesh del bruciatore (a) e campo fluidodinamico ottenuto all'interno del bruciatore mediante simulazione CFD (b).

Dalla simulazione emerge la formazione in camera di calma di una macroscale fluidodinamica. La dinamica di questa struttura può essere correlata con la componente armonica a bassa frequenza presente nello spettro di pressione.

Sovrapponendo la FRF del bruciatore con il segnale campionato dal mic 4 si osserva un perfetto accordo tra le frequenze delle componenti tonali (v. Figura 11).

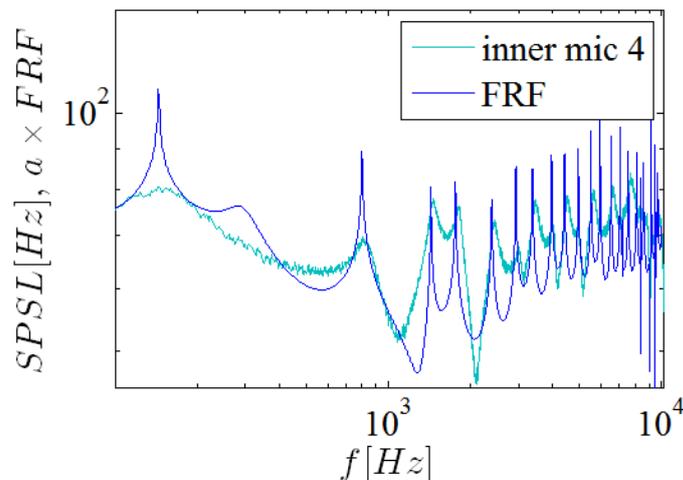


Figura 11. Confronto tra la funzione di risposta in frequenza del bruciatore e SPSL campionato dal mic 4.

L'accordo tra simulazione e sperimentazione, non solo consente di validare la simulazione, ma indica che i modi acustici del dispositivo, dal punto di vista aeroacustico, sono significativi. Il comportamento finora descritto può portare a condizioni dette di *self excited oscillation* che sono alla base dell'instabilità di fiamma dovuta ad interazione acustica-combustione.

Successivamente sono state fatte delle misure mediante l'impiego di una sonda hot-wire, volte a caratterizzare dal punto di vista fluidodinamico il getto in uscita dal bruciatore.

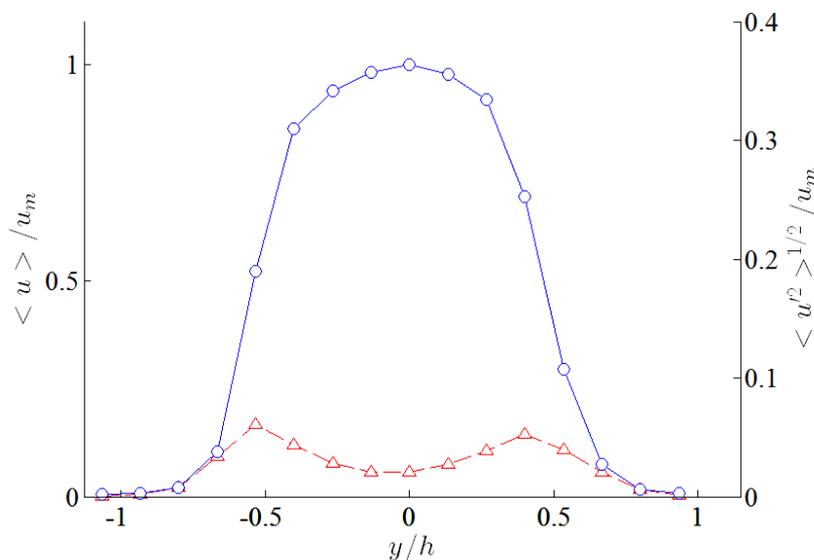
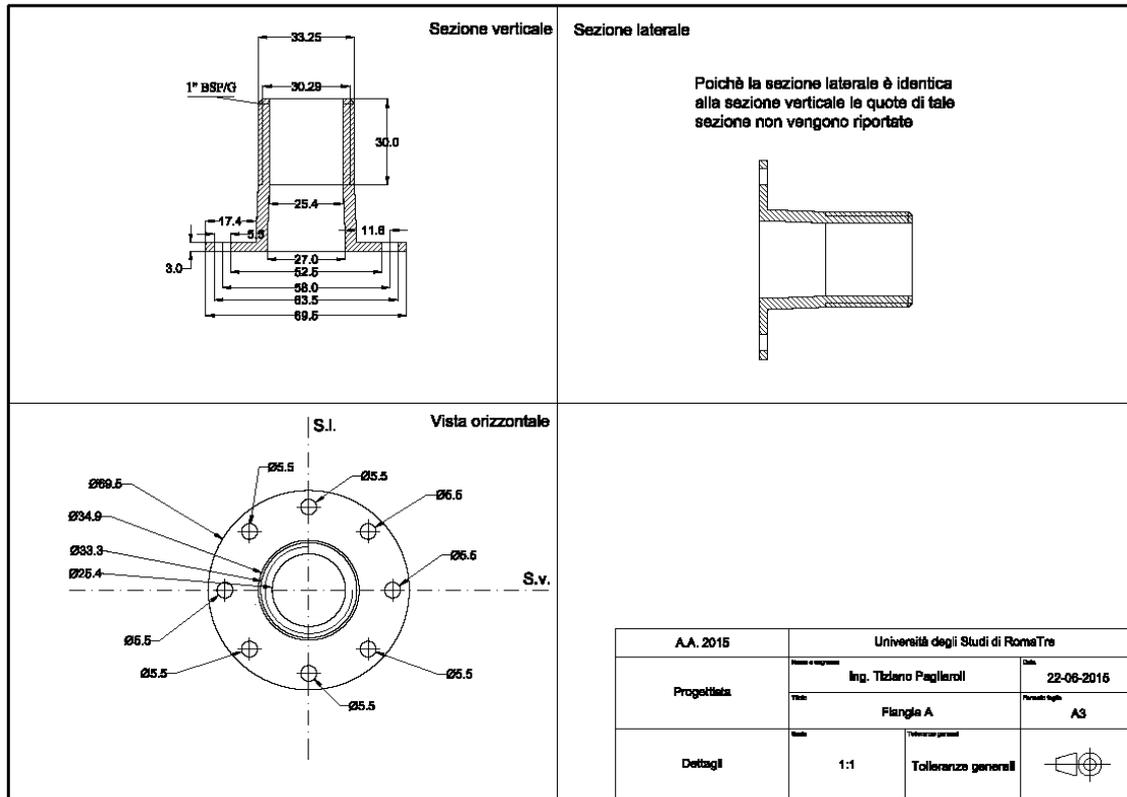


Figura 12. Profili di velocità e di turbolenza relativa all'uscita del bruciatore.

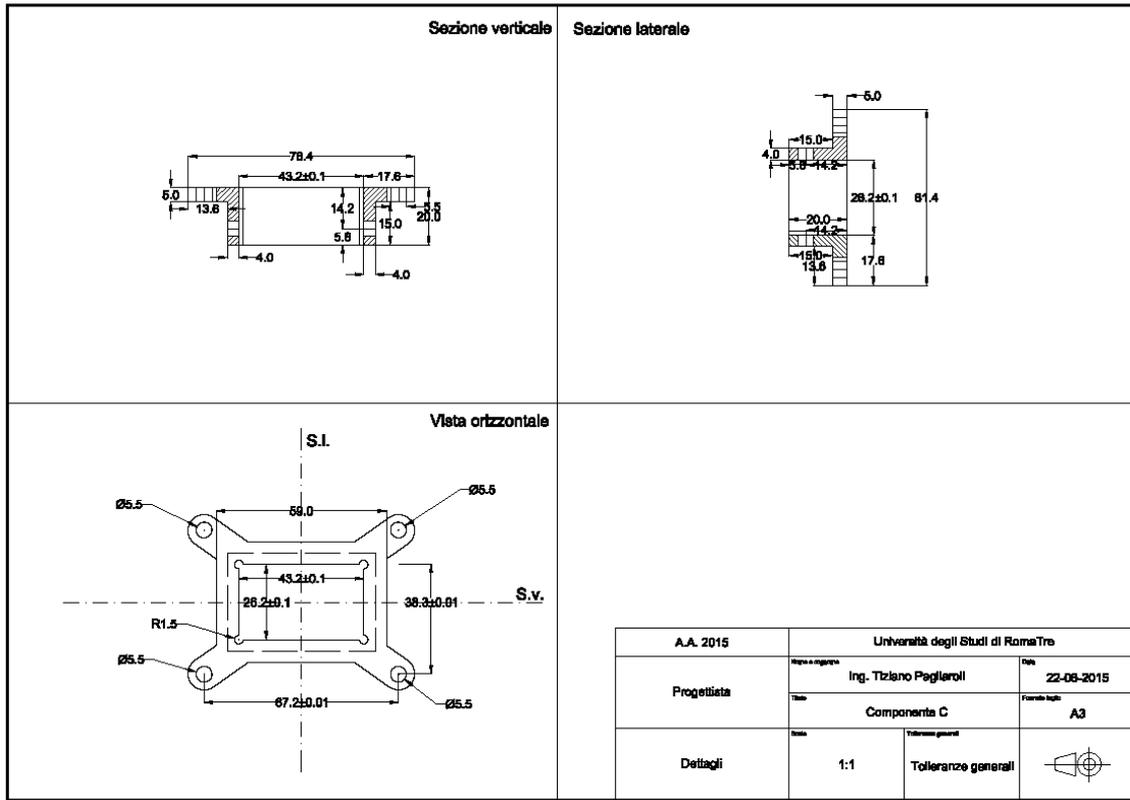
Sia il profilo di velocità che di turbolenza relativa presenta una forma asimmetrica rispetto allo zero. Tale asimmetria può essere dovuta alla precisione nella realizzazione del modello. In fase di progetto esecutivo, nell'intorno della testa del bruciatore è stata specificata una precisione del centesimo di millimetro per ovviare a tale problematica. Osservando il profilo di turbolenza relativa (RTL) si nota che il livello è superiore per $y/h = \pm 0.5$, dove h è l'altezza del canale, ed inferiore al centro. Al fine di aumentare il livello di

turbolenza in ampiezza e di omogenizzare tale profilo, per promuovere il mescolamento, la dimensione h è stata ridotta da 7.5 mm a 3mm.

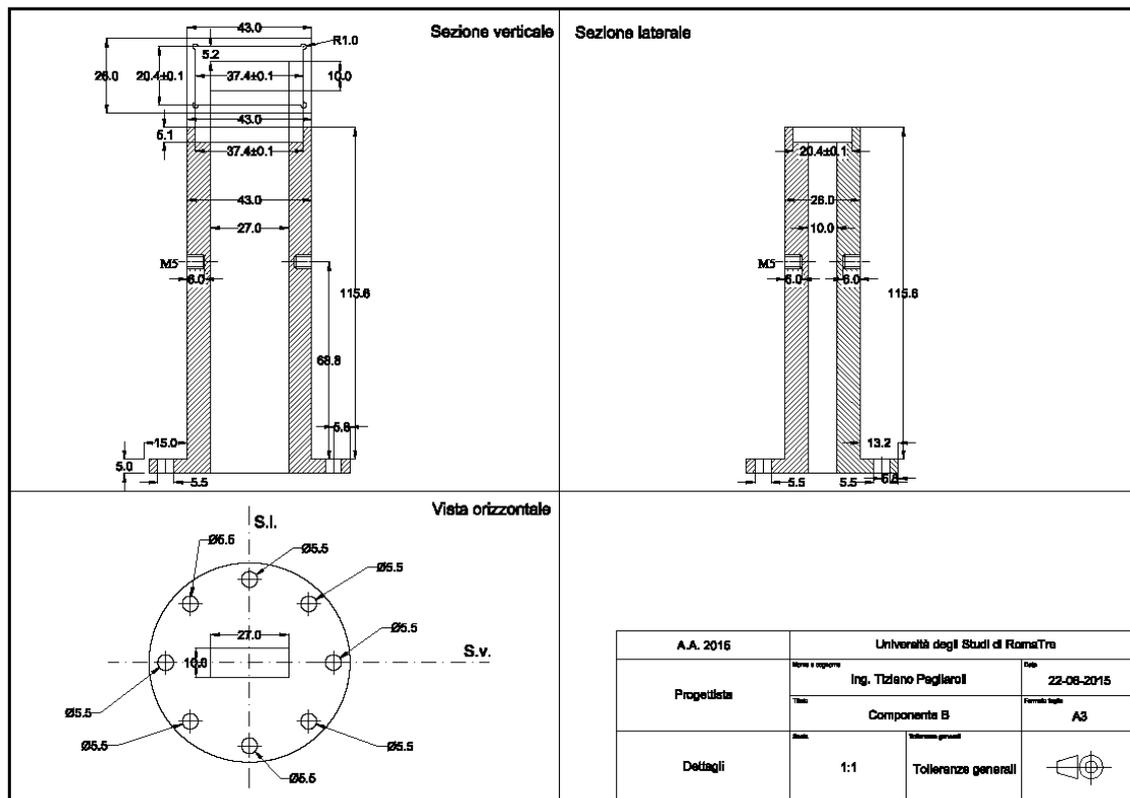
In parallelo il DING ha utilizzato le informazioni ottenute dalla sperimentazione per produrre in CAD le tavole di progetto necessarie per la realizzazione in officina il bruciatore. Le tavole del progetto esecutivo del bruciatore sono riportate di seguito.



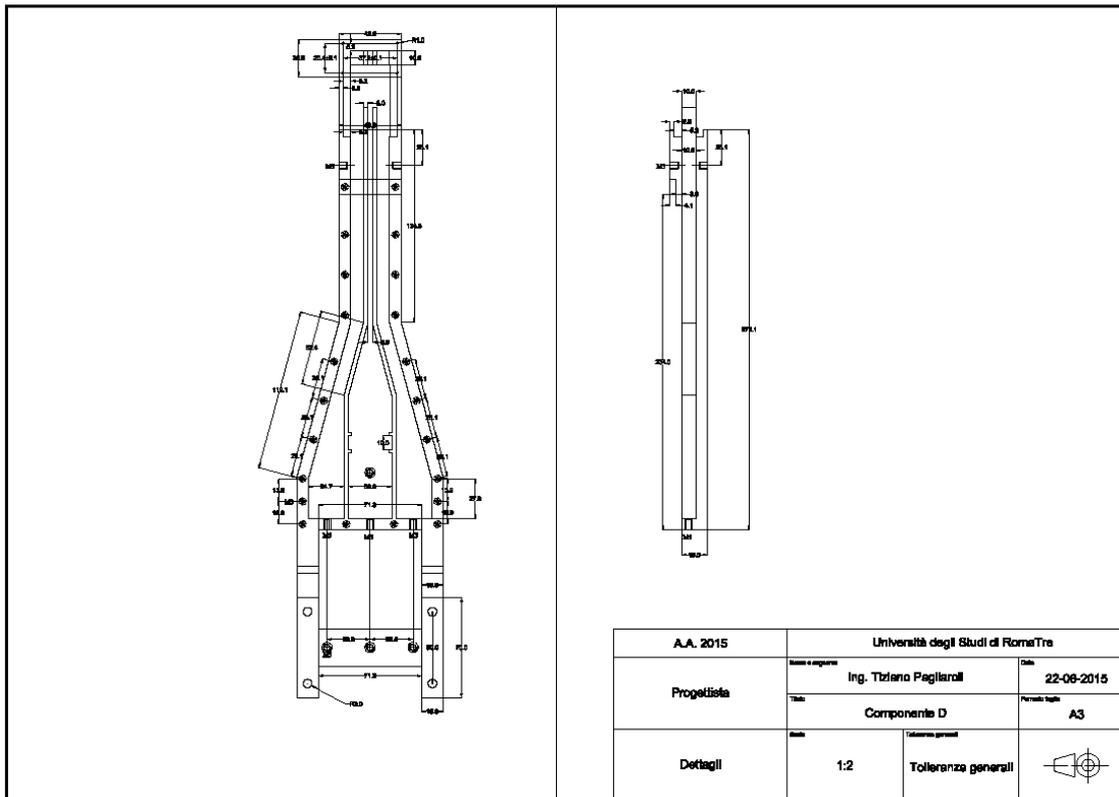
(a)



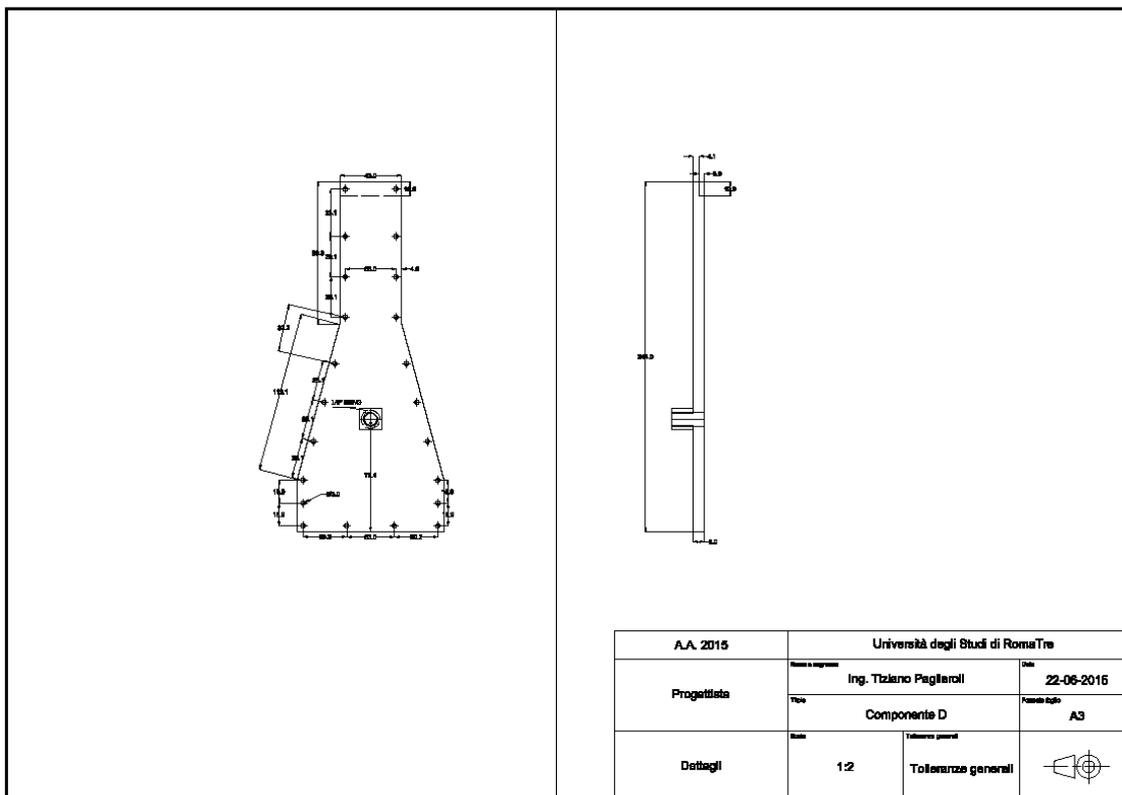
(b)



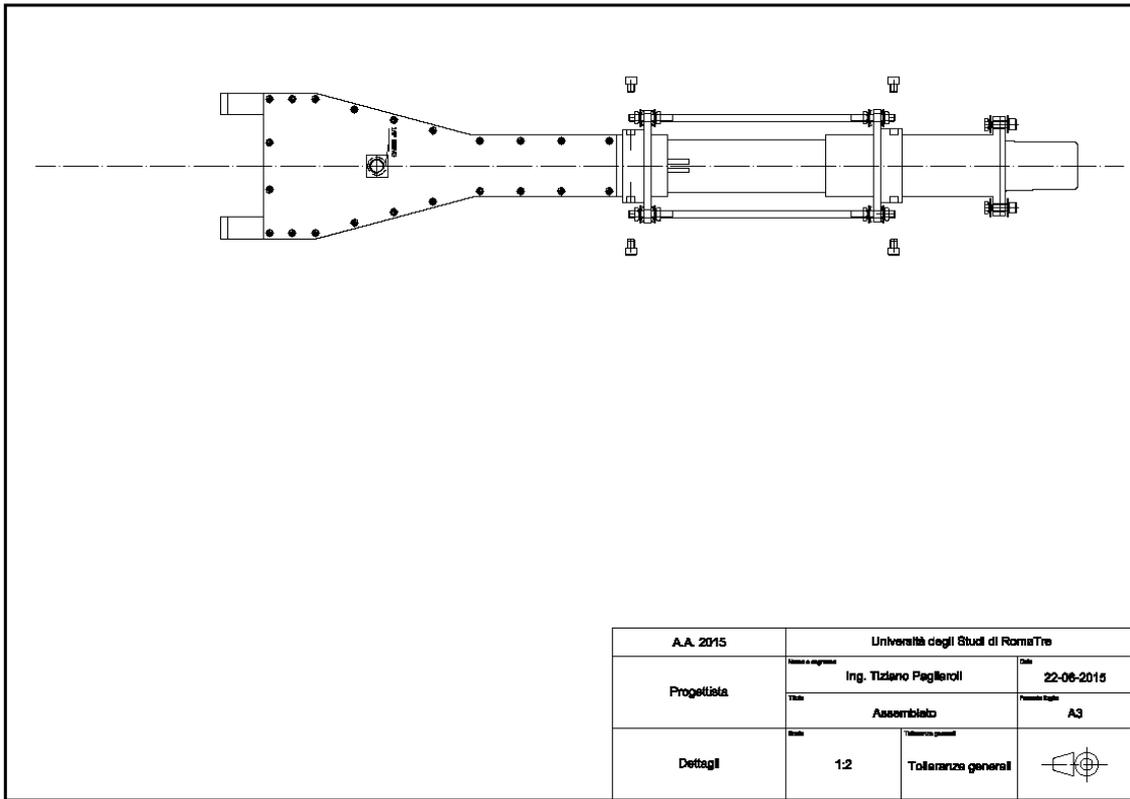
(c)



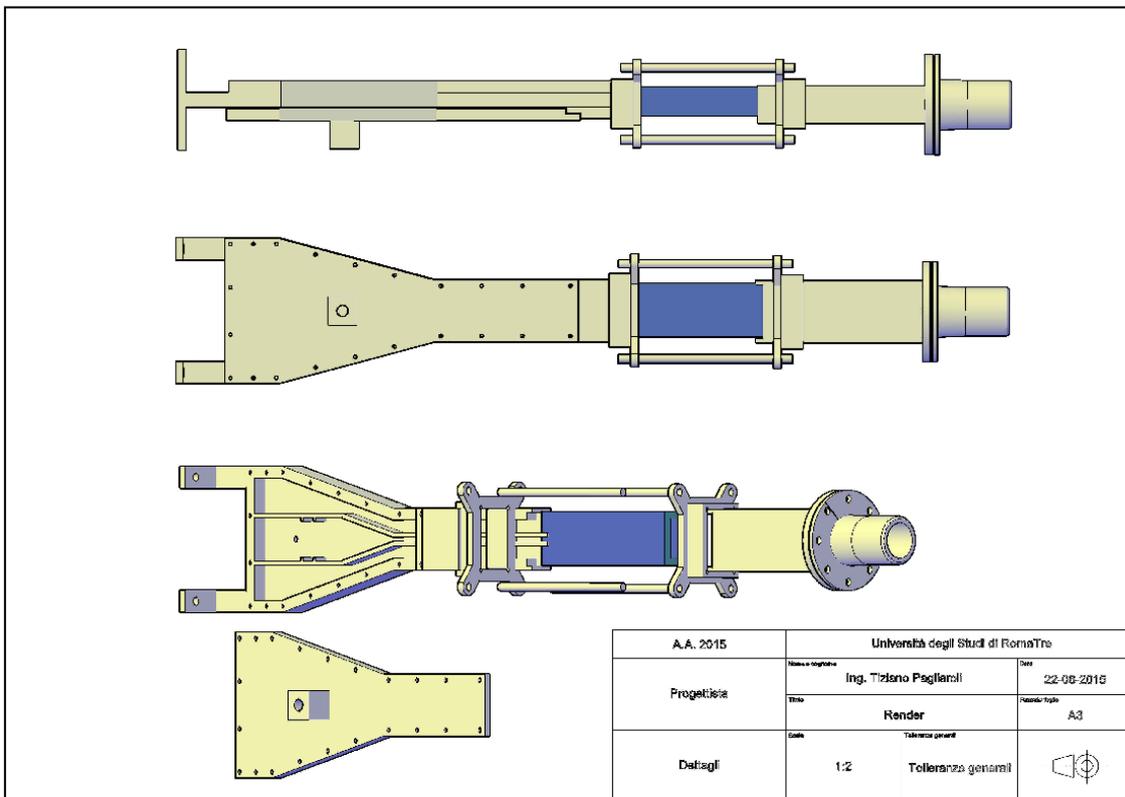
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 13. (a) progetto della flangia dell'outlet; (b) progetto della flangia di accoppiamento diffusore-quarzo; (c) progetto del camino; (d) progetto diffusore; (e) cover del diffusore; (f) assemblato; (g)

rendering 3D del dispositivo 3 viste.

Successivamente alla realizzazione del dispositivo (v. **Figura 14**), il DING si è occupato di un test di assemblaggio volto a verificare la qualità del dispositivo realizzato. Infine è stato improntato un test di tenuta.

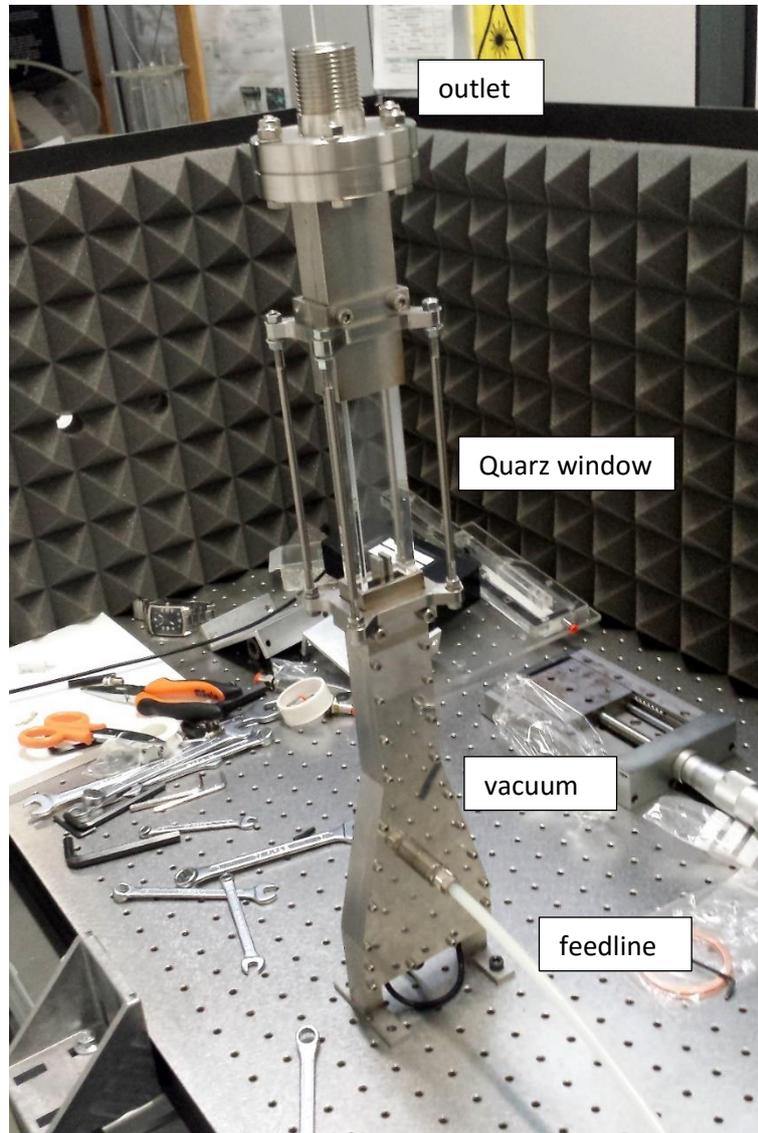


Figura 14. Fotografia dello slotted burner.

Una volta verificata la tenuta del bruciatore, il dispositivo e il sistema di alimentazione sono stati trasportati e allestiti all'ENEA Casaccia per effettuare le prove sperimentali.

Nello specifico sono state effettuate delle misure mediante l'applicazione della tecnica particle image velocimetry (PIV). Lo scopo principale di questa campagna preliminare è stato quello di mettere appunto il set-up ed eventualmente apportare le ultime modifiche al bruciatore. Nello specifico la strumentazione è stata costituita da un laser Nd: YAG (BigSkyLaser/Quantel) da 200mJ di potenza fornito dall'università. Da una telecamera (4 Mpixel), un sincronizzatore della Dantec (presenti in ENEA).

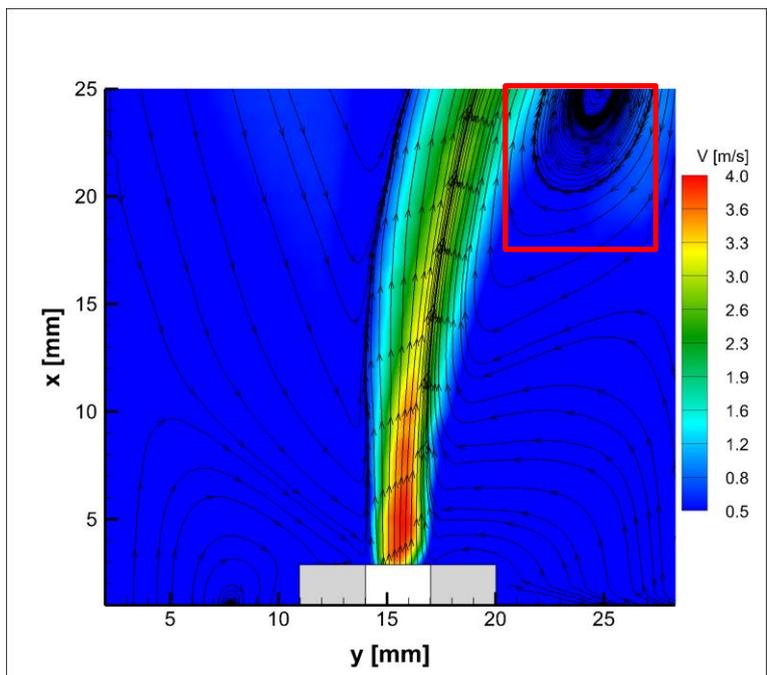


Figura 15. Campo medio di velocità riferito alla portata di 0.5 g/s.

Il campo medio di velocità, ottenuto dalla media di una popolazione di 500 campioni, presenta una forte ed inaspettata asimmetria. Il getto risulta flesso verso destro ed una macroscala fluidodinamica di dimensioni significative è osservabile in **Figura 15**. La deviazione del getto è dovuto ad un effetto del sistema di aspirazione delle particelle d’inseminante. Per ridurre l’effetto del sistema di aspirazione sul campo investigato si è pensato di giuntare la sezione di scarico con una tubazione che allontani dal dominio il sistema d’aspirazione.

Il campo di fluttuazione di velocità assiale è mostrato per completezza in **Figura 16**.

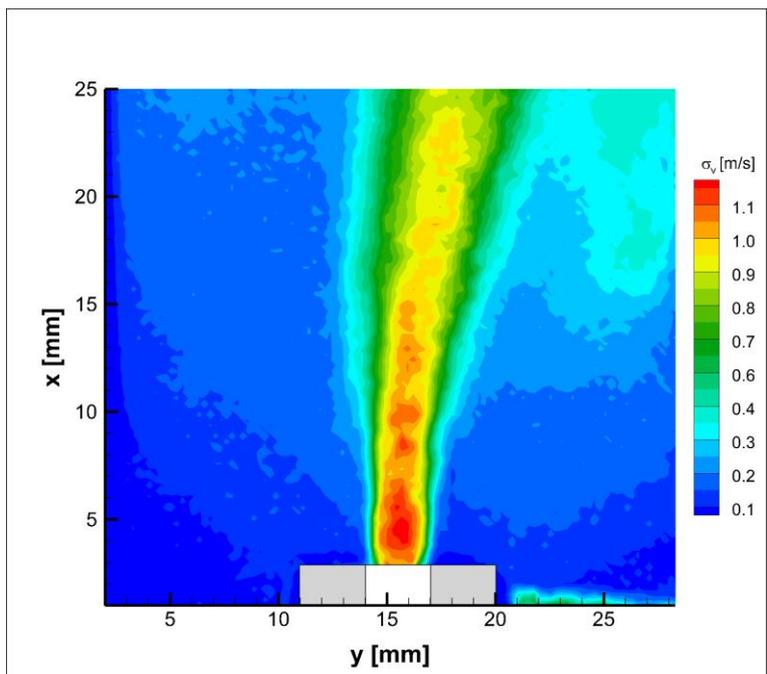
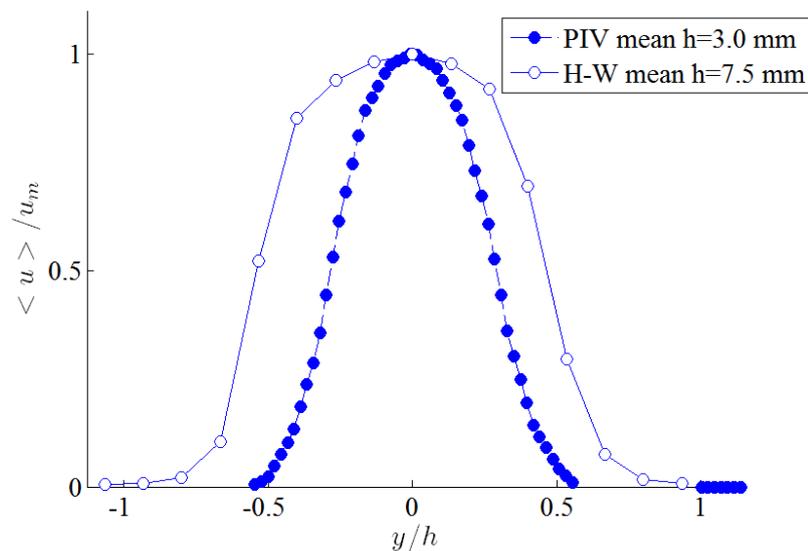
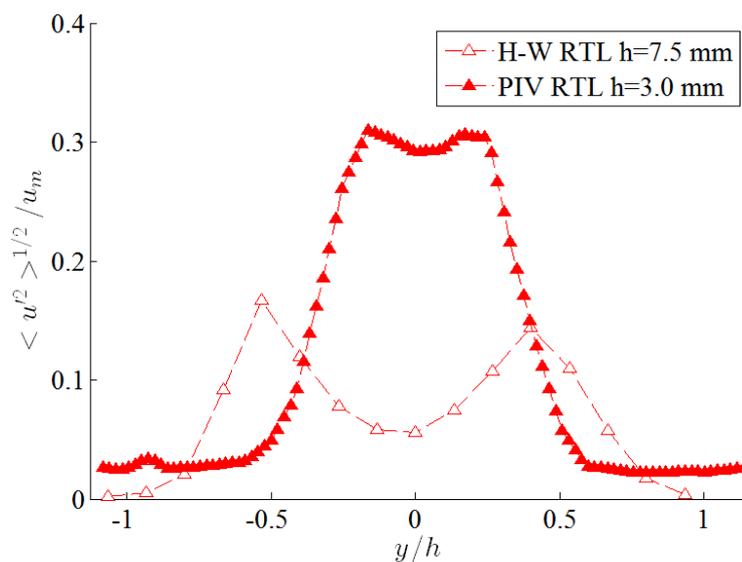


Figura 16. Deviazione standard del campo di velocità riferito alla portata di 0.5 g/s.



(a)



(b)

Figura 17. Profilo di velocità media (a) e di turbolenza relativa (b) misurati mediante l'impiego di due tecniche di misura: PIV e H-W. I dati sono riferiti alla portata di 0.5 g/s. Il confronto è stato fatto tra la misura effettuata sul modello per le prove a freddo e quella effettuata sul bruciatore.

In **Figura 17** (a) viene mostrato un confronto tra il profilo medio di velocità e quello di turbolenza (**Figura 17** (b)) misurati con due differenti tecniche: PIV e H-W, su due diverse geometrie di bruciatore. In particolare mediante la PIV, le misure sono state effettuate sul prototipo di bruciatore realizzato in officina, mentre con il sistema H-W è stata effettuata la misura sulla maquette. Le due geometrie differiscono per l'altezza del canale. Il prototipo ha un'altezza del canale di 3.0 mm mentre il modello per le prove a freddo, di 7.5 mm. La riduzione dell'altezza del canale ha generato un incremento del livello di turbolenza e un profilo maggiormente omogeneo. Tale caratteristica garantirà una maggiore efficienza nel mescolamento tra combustibile e comburente.

3 Conclusioni

L'attività di ricerca è stata volta a sviluppare, progettare e realizzare un bruciatore slotted burner, mediante l'allestimento di esperimenti pilota e simulazioni FEM e CFD.

Il dispositivo realizzato dal DING rispetta le specifiche progettuali richieste dall'ENEA nella fase di concertazione dell'attività.

4 Riferimenti bibliografici

1. N. Suraj, T. Lieuwen, "Acoustic detection of blowout in premixed flames", *Journal of Propulsion and Power*, 21.1, 2005, 32-39.
2. T. Pagliaroli, R. Camussi, E. Giacomazzi, E. Giulietti, "Velocity Measurement of Particles Ejected from a Small-Size Solid Rocket Motor", *Journal of Propulsion and Power*, 2015: 1-8.
3. S. Kartheekyan, S. R. Chakravarthy. "An experimental investigation of an acoustically excited laminar premixed flame." *Combustion and flame* 146.3 (2006): 513-529.
4. T. Pagliaroli, R. Camussi, A. Di Marco, C. Stringola, E. Giulietti, E. Giacomazzi, "COMBUSTION ACOUSTIC COUPLING IN TRAPPED VORTEX COMBUSTOR", 9th MCS, Rhodes, Greece.
5. T. Pagliaroli, R. Camussi, "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures." *Journal of Sound and Vibration* 341 (2015): 116-137.

Breve Curriculum del responsabile scientifico del gruppo proponente

Roberto Camussi si è laureato con lode in Ingegneria Aeronautica presso l'Università "La Sapienza" di Roma nel 1991. Nel 1995 ha completato il Dottorato di Ricerca in Meccanica Teorica ed Applicata presso la stessa Università e, nello stesso anno, ha vinto un posto da Ricercatore presso l'Università Roma Tre. Dal 2002 è Professore Associato presso la facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre. Dal 2012 è Professore Straordinario presso l'Università Roma Tre.

Nel periodo 1994-1995 ha svolto attività di ricerca presso l'Ecole Normale di Lione. Dal 1994 ad oggi ha partecipato a numerose conferenze Nazionali ed Internazionali, come Chairman in alcune sessioni. E' stato organizzatore di workshop, conferenze e scuole internazionali.

E' stato invitato a tenere numerosi seminari presso Università e centri di ricerca italiani ed esteri.

E' stato invitato a contribuire su riviste internazionali con pubblicazioni di review ad invito. E' Referee di numerose prestigiose riviste internazionali (ad esempio. *Journal of Fluid Mechanics*, *Physics of Fluids*, *Experiments in Fluids*).

E' Referee della *National Science Foundation* degli USA, del sistema *EPSRC* – UK Engineering and Physical Science Research Council, del sistema *e-GAP2* della Royal Society, London (UK).

Fa parte del Consiglio Direttivo dell'associazione AIVELA (Associazione Italiana di Velocimetria Laser). E' il rappresentante dell'AIDAA (Associazione Italiana di Aeronautica ed Astronautica) presso l'*Aeroacoustic Specialists Committee* della CEAS (Council of European Aerospace Society).

Ha avuto ruolo di responsabilità e di collaborazione in numerosi contratti e convenzioni di ricerca finanziati dalla comunità europea (nel 6° e 7° programma quadro, CleanSky, H2020 CleanSky2), da enti pubblici (quali MUR, CNR, Regione Lazio), da centri di ricerca (quali ASI, CIRA, ENEA, AVIO) e da società private (quali ad esempio ALENIA, MBDA, ITALFERR).

Insegna presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre, tenendo un corso di fluidodinamica nella laurea in Ingegneria Meccanica, e corsi di Aerodinamica e Propulsione, nell'ambito della laurea magistrale di Ingegneria Aeronautica. Tiene corsi nel settore dell'aeroacustica agli studenti della sezione di Ingegneria

Meccanica e Industriale della Scuola Dottorale di Ingegneria dell'Università Roma Tre, del cui Collegio dei Docenti fa parte. E' docente guida di diversi dottorandi, di numerosi laureandi di primo e secondo livello, di numerosi stagisti italiani e stranieri. Ha fatto parte di commissioni per concorsi a posti di Ricercatore, di Dottorato, di assegni di ricerca ed ha fatto parte di commissioni per l'esame finale di Dottorato sia in Italia che presso Università straniere.

Ha lavorato principalmente nel settore della fluidodinamica sperimentale con studi nel campo dei flussi turbolenti, dell'aeroacustica ed aerodinamica di flussi di parete, dell'aeroacustica ed aerodinamica di getti, della combustione turbolenta e nello sviluppo di metodologie avanzate per analisi di segnali.

Le ricerche svolte hanno portato alla realizzazione di oltre 150 lavori scientifici pubblicati su riviste scientifiche internazionali e atti di conferenze nazionali o internazionali. Per brevità si riportano nel seguito solo gli articoli pubblicati su riviste internazionali, con referaggio.

1. R. CAMUSSI, G. GUJ, "On the Extended Self Similarity and the Form-Function", **Meccanica**, vol. 30, pp. 719-725, 1995.
2. R. CAMUSSI, D. BARBAGALLO, G. GUJ, F. STELLA: "Transverse and longitudinal scaling laws in homogeneous and non-homogeneous low Re_λ turbulence", **Lecture notes in Physics**, ed. Springer-Verlag, pp. 171-178, 1995.
3. R. CAMUSSI, G. GUJ: "Experimental analysis of scaling laws in low Re grid-generated turbulence", **Experiments in fluids**, vol. 20, pp. 199-209, 1996.
4. R. CAMUSSI, G. GUJ: "Extended Self Similarity in Anisotropic Grid-generated Turbulent flow", **European Journal of Mechanics /B**, vol. 15(2), pp. 257-273, 1996.
5. R. CAMUSSI, D. BARBAGALLO, G. GUJ, F. STELLA: "Transverse and longitudinal scaling laws in non-homogeneous low Re Turbulence", **Physics of Fluids**, vol. 8 (5), pp. 1181-1191, 1996.
6. R. CAMUSSI, C. BAUDET, R. BENZI, S. CILIBERTO, "Scaling properties of the velocity increments correlation function", **Physics of Fluids**, vol. 8 (6), pp. 1686-1688, 1996.
7. R. CAMUSSI ed altri autori, "Structure functions in turbulence in various flow configurations, at Reynolds number between 30 and 5000, using Extended Self Similarity", **Europhysics Letters**, vol. 34 (6), pp. 411-416, 1996.
8. R. CAMUSSI, S. CILIBERTO, R. BENZI, C. BAUDET, "Statistical uncertainty in the analysis of structure functions in turbulence", **Physical Review E**, vol. 4, pp. 100-103, 1996.
9. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Wavelet decomposition and coherent structures eduction of low Re_η turbulent hot wire signals", **Flow, Turbulence and Combustion**, Vol. 57, pp. 195-209, 1996.
10. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Orthonormal wavelet decomposition of turbulent flows: intermittency and coherent structures", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 348, pp. 177-199, 1997.
11. R. CAMUSSI, R. BENZI, "Hierarchy of transverse structure functions", **Physics of Fluids**, Vol. 9 (2), pp. 257-259, 1997.
12. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "Transitional regimes of low-Prandtl thermal convection in a cylindrical cell", **Physics of Fluids**, Vol. 9 (6), pp. 1287-1295, 1997.
13. R. CAMUSSI, D. BARBAGALLO, G. GUJ, "Experimental analysis of transverse intermittency in a turbulent jet flow", **Experiments in Fluids**, Vol. 22, pp. 268-270, 1997.
14. R. CAMUSSI, S. CILIBERTO, C. BAUDET, "Experimental study of the evolution of a velocity perturbation in fully developed turbulence", **Physical Review E**, Vol. 56 (5), pp. 6181-6184, 1997.
15. R. CAMUSSI, R. VERZICCO, "Convective turbulence in mercury: scaling laws and spectra", **Physics of Fluids**, Vol. 10, pp. 516-527, 1998.
16. G. GUJ, R. CAMUSSI, "Statistical analysis of local turbulent energy fluctuations", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 382, pp. 1-26, 1999.
17. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "Prandtl number effects in convective turbulence", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 383, pp. 55-73, 1999.

18. V. NINNI, R. CAMUSSI, G. GUJ, "Statistical study of anisotropic anomalous behavior of a cylinder wake", **Experiments in Fluids**, Vol. 26, pp.161-168, 1999.
19. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Experimental analysis of intermittent coherent structures in the near field of a high Re turbulent jet flow", **Physics of Fluids**, Vol. 11 (2), pp. 423-431, 1999.
20. R. CAMUSSI, A. STELLA, T. KOWALEWSKI, G. GUJ, "Large-scale structures forming in a cross-flow: Particle Image Velocimetry conditional analysis", **Machine, Graphics and Vision**, Vol. 8, pp. 579-596, 1999 (also presented at the conference "EUROMECH 406: Image Processing Methods in Applied Mechanics", Varsavia, 6-9 Maggio, 1999).
21. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "On thermally-driven convection in cylindrical cells of unitary aspect ratio", (invited) **Recent Research Developments in Fluid Dynamics**, Vol. 2, pp. 63-85, 1999
22. M. ONORATO, R. CAMUSSI, G. IUSO, "Anomalous scaling and bursting process in an experimental turbulent channel flow", **Physical Review E**, Vol. 61 (2), pp. 1447-1454, 2000.
23. R. CAMUSSI, R. VERZICCO, "Anomalous scaling exponents and coherent structures in high Re fluid turbulence", **Physics of Fluids**, Vol. 12 (3), pp. 676-687, 2000.
24. V. NIKORA, D. GORING, R. CAMUSSI, "Intermittency and interrelationships between turbulence scaling exponents: phase-randomisation tests", **Physics of Fluids**, Vol. 13 (5), pp. 1404-1414, 2001.
25. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Wavelet analysis of turbulence data: coherent structures identification and intermittency", **Non Linear Instability Analysis**, Vol. II, L. Debnath & D.N. Rihani eds., Wit Press, Computational Mechanics Publications, pp 179-220, 2001 (invited).
26. R. CAMUSSI, "Wavelets", **2001 Yearbook of science and technology**, *Encyclopedia of Science and Technology*, McGraw-Hill ed., 2001 (invited).
27. R. CAMUSSI, "Coherent structures identification from Wavelet analysis of PIV bidimensional velocity fields", **Experiments in Fluids**, Vol. 32, pp. 76-86, 2002.
28. R. CAMUSSI, G. GUJ, A. STELLA, "Experimental study of a jet in a cross-flow at very low Reynolds number", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 454, pp. 113-144, 2002.
29. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "Structure function exponents and pdf of the velocity difference in turbulence", **Physics of Fluids**, Vol. 14, pp. 906-909, 2002.
30. G. GUJ, M. CARLEY, R. CAMUSSI e A. RAGNI, "Acoustic identification of coherent structures in a turbulent jet", **Journal of Sound and Vibrations**, Vol 259, pp 1037 – 1065, 2003.
31. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "Numerical experiments on strongly turbulent thermal convection in a slender cylindrical cell", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 477, pp. 19-49, 2003.
32. R. CAMUSSI, R. VERZICCO, "Temporal statistics in high Rayleigh number convective turbulence", **European Journal of Mechanics – B/Fluids**, Vol. 23, pp. 427-442, 2004.
33. R. CAMUSSI, M. FELLI, "Far field pressure fluctuations and coherent structures in a low Mach number turbulent jet flow", **International Journal of Aeroacoustics**, Vol. 3, pp. 347-360, 2004.
34. R. CAMUSSI, G. GUJ, A. RAGNI, "Wall pressure fluctuations induced by turbulent boundary layers over surface discontinuities", **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 294, 177–204, 2006.
35. R. CAMUSSI, DI FELICE F., "Statistical properties of vortical structures with spanwise vorticity in zero pressure gradient turbulent boundary layers", **Physics of Fluids**, Vol. 18, pp. 035108-1 035108-16, 2006.
36. R. CAMUSSI, G. GUJ, A. DI MARCO, A. RAGNI, "Propagation of wall pressure perturbations in a large aspect-ratio shallow cavity", **Experiments in Fluids**, Vol. 40, pp. 612-620, 2006.
37. M. FELLI, F. DI FELICE, G. GUJ, R. CAMUSSI, "Analysis of the Propeller wake evolution by pressure and velocity phase measurements", **Experiments in Fluids**, Vol. 41, pp. 441-451, 2006.
38. R. CAMUSSI, G. GUJ, B. IMPERATORE, A. PIZZICAROLI, D. PERIGO, "Wall pressure fluctuations induced by transonic boundary layers on a launcher model", **Aerospace Science and Technology**, Vol. 11, pp. 349-359, 2007.
39. M. FELLI, G. GUJ, R. CAMUSSI, "Effect of the number of blades on propeller wake evolution", **Experiments in Fluids**, Vol. 44, 409-418, 2008.
40. R. CAMUSSI, G. GUJ, F. TOMASSI, R. SISTO, "Effect of air injection on the far field pressure radiated from a jet at subsonic Mach numbers", **International Journal of Aeroacoustics**, Vol. 7, pp. 69-82, 2008.

41. R. CAMUSSI, M. FELLI, F. PEREIRA, G. ALOISIO, A. DI MARCO, "Statistical Properties of Wall Pressure Fluctuations Over a Forward Facing Step", **Physics of Fluids**, Vol. 20, pp. 075113-1 075113-13, 2008.
42. R. CAMUSSI, G. ROBERT, M. C. JACOB, "Cross-Wavelet analysis of wall pressure fluctuations beneath incompressible turbulent boundary layers", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 617, pp. 11-30, 2008.
43. M. FELLI, R. CAMUSSI, G. GUJ, "Experimental analysis of the flow field around a propeller-rudder configuration", **Experiments in Fluids**, Vol. 46, pp. 147-164, 2009.
44. M. C. JACOB, J. GRILLIAT, R. CAMUSSI, G. CAPUTI GENNARO, "Aeroacoustic investigation of a single airfoil tip leakage flow", **International Journal of Aeroacoustics**, Vol. 9 (3), pp. 253-272, 2010.
45. R. CAMUSSI, M. JACOB, J. GRILLIAT, G. CAPUTI GENNARO, "Experimental study of a tip leakage flow: wavelet analysis of pressure fluctuations", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 660, pp. 87-113, 2010.
46. M. FELLI, R. CAMUSSI, "Experimental characterization of the tip vortex evolution in a propeller wake", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 682, pp. 5 – 53, 2011.
47. F.R. VERDUGO, A. GUITTON, R. CAMUSSI, "Experimental investigation of a cylindrical cavity in a low Mach number flow", **Journal of Fluids and Structures**, Vol. 28, pp. 1–19, 2012.
48. S. GRIZZI, R. CAMUSSI, "Wavelet analysis of Near-Field Pressure Fluctuations Generated by a Subsonic Jet", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 698, pp. 93-124, 2012.
49. A. DI MARCO, R. CAMUSSI, M. BERNARDINI, S. PIROZZOLI, "Wall pressure coherence in supersonic turbulent boundary layers", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 732, pp. 445-456, 2013.
50. R. CAMUSSI, S. GRIZZI, "Statistical analysis of the pressure field in the near region of a $M = 0.5$ circular jet", **International Journal of Aeroacoustics**, Vol. 13, pp. 169-182, 2014.
51. T.PAGLIAROLI, R.CAMUSSI, "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures", **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 341, pp. 116-137, 2015.
52. A. DI MARCO, M. MANCINELLI AND R. CAMUSSI, "Pressure and velocity measurements of an incompressible moderate Reynolds number jet interacting with a tangential flat plate", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 770, pp 247 – 272, 2015,
53. D. GRASSUCCI, R. CAMUSSI, P. JORDAN, S. GRIZZI, "Intermittency of the near pressure field induced by a compressible coaxial jet", **Experiments in Fluids** 56:23, 2015
54. T.PAGLIAROLI, R.CAMUSSI, E. GIACOMAZZI, E. GIULIETTI, "Velocity measurements of particles ejected from a small size solid rocket motor", **Journal of Propulsion and Power**, accepted for publication, 2015.

Contributi a invito:

55. R. CAMUSSI, D. BARBAGALLO, G. GUJ, F. STELLA: "Transverse and longitudinal scaling laws in homogeneous and non-homogeneous low Re_λ turbulence", **Lecture notes in Physics**, ed. Springer-Verlag, pp. 171-178, 1995.
56. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Wavelet analysis of turbulence data: coherent structures identification and intermittency", **Non Linear Instability Analysis**, Vol. II, L. Debnath & D.N. Rihani eds., Wit Press, Computational Mechanics Publications, pp 179-220, 2001.
57. R. CAMUSSI, "Wavelets", **2001 Yearbook of science and technology**, *Encyclopedia of Science and Technology*, McGraw-Hill ed., 2001.
58. J. GRILLIAT, L. ZHOU, A. DELGADO, R. CAMUSSI, M. C. JACOB, "Applications of the wavelet theory on turbulent time signals: denoising and conditioning", **Developments in mechanical engineering**. Vol. 5. Eds. J.T. Cieslinski, J.A. Szymczyk, Gdansk: Gdan. Univ. Technol., 2012, pp. 59-64.
59. R. CAMUSSI, A. DI MARCO, "Boundary Layer Noise", in **Noise Sources in Turbulent Shear Flows: Fundamentals and Applications**, CISM Courses and Lectures 545, Springer, 2013.
60. R. CAMUSSI, A. DI MARCO, "Wall pressure fluctuations statistics: measurements and numerical simulations", in **Advanced post-processing of experimental and numerical data**, Von Karman Institute Lecture Series, Nov. 2013.
61. R. CAMUSSI, "Wavelet analysis and applications in aeroacoustics", in **Advanced post-processing of experimental and numerical data**, Von Karman Institute Lecture Series, Nov. 2013.
62. R. CAMUSSI, "Advanced analysis techniques (Wavelets, LSE, POD) for noise sources identification", in **Aeroengin Noise**, Von Karman Institute Lecture Series, Dec. 2014.

63. R. CAMUSSI, A. DI MARCO, "Wall pressure fluctuations induced by supersonic turbulent boundary layer", in *Flinovia – Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects*, E. Ciappi, S. De Rosa, F. Franco, J.L. Gyader, S.A. Hambrics Eds, pp 67-90, Springer, 2015.