



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi numerica e sperimentale dell'instabilità in bruciatori di ultima generazione: studi sulla combustione in cicli EGR per turbogas

R. Camussi, T. Pagliaroli, L. Burghignoli, G. Troiani

ANALISI NUMERICA E SPERIMENTALE DELL'INSTABILITÀ IN BRUCIATORI DI ULTIMA GENERAZIONE: STUDI SULLA COMBUSTIONE IN CICLI EGR PER TURBOGAS

R. Camussi , T. Pagliaroli, L. Burghignoli (Università di Roma TRE)
G. Troiani (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2015
Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio
Progetto: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'uso di combustibili fossili
Obiettivo: c.3 - Studi sulla combustione in cicli turbogas EGR
Responsabile del Progetto: F.R. Picchia ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Analisi sperimentale e numerica dell'instabilità in bruciatori di ultima generazione”*.

Responsabile scientifico ENEA: Guido Troiani

Responsabile scientifico Università di Roma 3: Prof. Roberto Camussi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 SVILUPPO SISTEMA DI ACCENSIONE	5
2.2 SVILUPPO DELLA LINEA DI ALIMENTAZIONE.....	6
2.3 SVILUPPO DELLA FIAMMA PILOTA.....	7
2.4 CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DEL BRUCIATORE “SLOTTED BURNER” (SB) MEDIANTE SIMULAZIONE NUMERICA FEM.	8
2.5 CARATTERIZZAZIONE AERODINAMICA E AEROACUSTICA DELLO SLOTTED BURNER.	12
2.5.1 <i>Misure con i microfoni</i>	12
2.5.2 <i>Misure di velocimetria mediante tecnica PIV</i>	13
2.6 TEST DELLA TECNICA PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION SUL DATABASE DNS.....	15
3 CONCLUSIONI.....	20
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	20

Sommario

Nel presente documento sono riportate le attività relative al contratto di collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria (nel seguito DING) dell'Università Roma Tre (resp. Prof. R. Camussi) inquadrato negli obiettivi C.3: *Studi sulla combustione in cicli turbogas EGR* del PAR2015 - Progetto B.2.

La ricerca si è articolata nelle attività che verranno descritte nel seguito: (i) test e sviluppo di un bruciatore sperimentale di piccola scala e (ii). Il bruciatore sperimentale denominato in ENEA Romolus è di tipo *slot burner* (oppure *slotted burner*, in letteratura sono presenti le due denominazioni). Per estendere l'intervallo di funzionamento del bruciatore e migliorare l'accuratezza della misura sono stati effettuati una serie d'interventi, sia di carattere impiantistico, sia sul software di gestione della linea di alimentazione. Il principale risultato è stato quello di estendere notevolmente l'intervallo di funzionamento, espresso in termini di numero di Reynolds, attraverso l'implementazione di una fiamma pilota.

1 Introduzione

Il bruciatore Romolus ha una scala notevolmente inferiore rispetto ai bruciatori generalmente testati nel laboratorio di termofluidodinamica dell'ENEA e più in generale sul piano scientifico internazionale. Questa scelta progettuale è intimamente legata ad uno dei principali obiettivi scientifici dell'attività: validare una simulazione DNS in condizioni reattive.

La scala del bruciatore e la sua geometria implicano la risoluzione di alcune problematiche ingegneristiche:

1. Sviluppo di un sistema di accensione di piccole dimensioni
2. Sviluppo della linea di alimentazione *ad hoc*
3. Stabilizzazione del processo di combustione
4. Reperimento, acquisto e installazione di componentistica dedicata

Il primo punto è connesso alla necessità di avere un'accensione dell'impianto Romolus mediante l'inserimento di una lancia d'accensione passante attraverso la canna fumaria. Date la piccola sezione trasversale (10 mm) è stata necessaria la costruzione di una lancia ad arco elettrico.

La fase di sviluppo della linea di alimentazione è anch'essa legata alla piccola scala dell'impianto. È stato quindi necessario acquistare dei regolatori di portata *ad hoc* che permettessero le regolazioni del bruciatore con un'accuratezza sufficiente tale da garantire la ripetibilità degli esperimenti.

La realizzazione di un dispositivo di stabilizzazione del processo, è una fase che è stata inserita *in itinere* per ottenere una maggiore flessibilità dell'impianto ed ha richiesto una particolare attenzione. Durante questa fase è stata implementata una fiamma pilota nel bruciatore Romolus che ha richiesto la costruzione di una linea di alimentazione secondaria e dell'hardware necessario a generare le fiammelle pilota. Ogni aspetto finora descritto è stato dettagliato all'interno del presente documento.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Sviluppo sistema di accensione

Il sistema di accensione è stato sviluppato e fornito dal DING. Nello specifico è stato realizzato un accenditore elettrico a scarica. Il dispositivo consta di un alimentatore, un circuito per innalzare la tensione e una lancia con due punte per generare la scarica in prossimità della testa del bruciatore (vedi [Figura 1](#)).

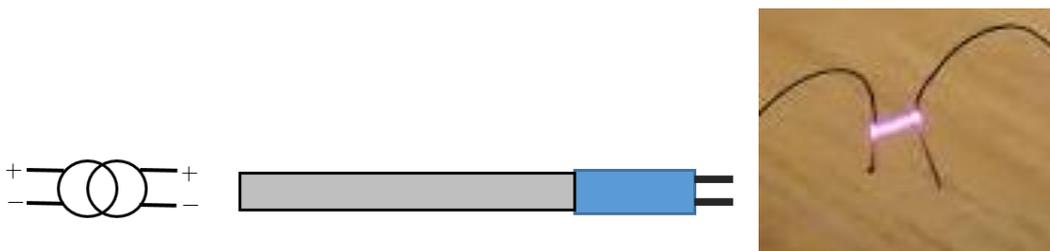


Figura 1 schematizzazione dell'accenditore elettrico ed immagine dei primi test di scarica.

2.2 Sviluppo della linea di alimentazione

L'impianto del bruciatore Romolus è costituito da due linee: la linea primaria che alimenta il bruciatore e la linea secondaria che alimenta una fiamma pilota realizzata allo scopo di ancorare la fiamma principale alla testa del bruciatore. La linea primaria è costituita da due misuratori/regolatori di portata: uno regola la portata dell'aria e l'altro quella del gas che vengono iniettati nella regione dove avviene il mescolamento. In questo circuito è stato integrato un sistema d'inseminazione dell'aria primaria, parte integrante dell'allestimento per la Particle Image Velocimetry (PIV). L'intero sistema di alimentazione è controllato in remoto attraverso un applicativo in Labview che il DING ha implementato a questo proposito. La GUI (Graphical User Interface) e il diagramma a blocchi del software sviluppato sono mostrati rispettivamente in Figura 2 e Figura 3.

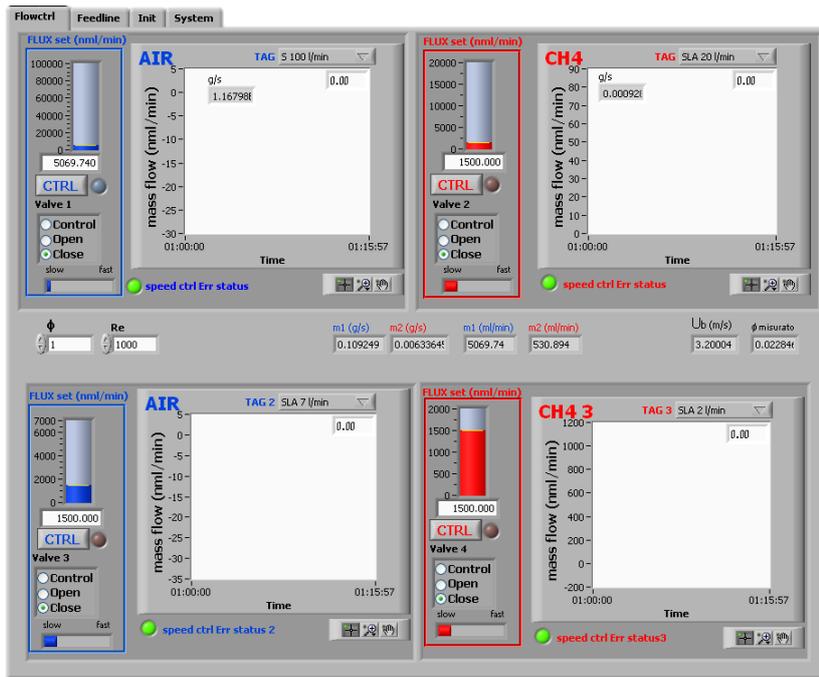


Figura 2 Graphical User Interface (GUI) dell'impianto Romolus.

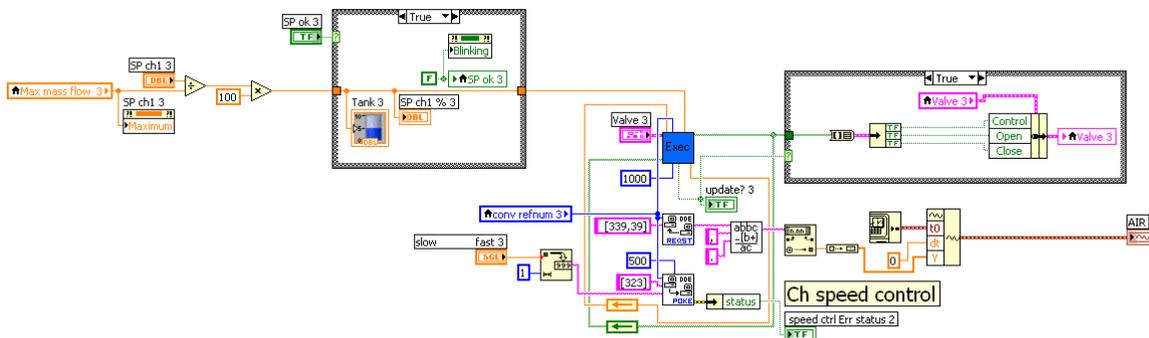


Figura 3 parte del diagramma a blocchi dell'applicazione che gestisce l'impianto di alimentazione di Romolus.

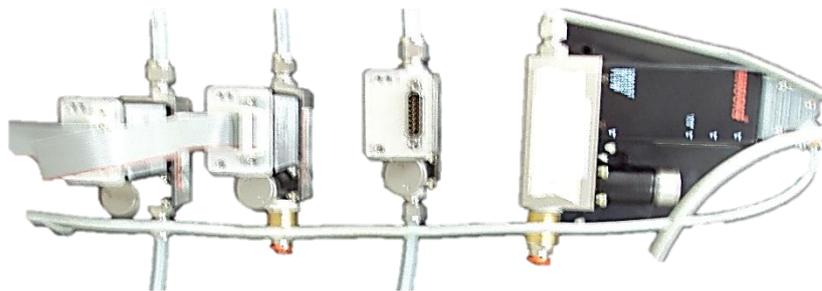


Figura 4 fotografia del sistema di alimentazione che è stato realizzato.

Il DING si è occupato inoltre di reperire sul mercato il sistema d'inseminazione, del trasporto ed integrazione dello stesso con il sistema di alimentazione del *test case* in esame. Un'immagine del sistema d'inseminazione acquistato e installato è mostrata in Figura 5.



Figura 5 sistema d'inseminazione.

La sostituzione del precedente sistema d'inseminazione ha dato luogo ad un sensibile miglioramento dell'apparato di misura PIV. Nello specifico la qualità delle immagini ottenute, attraverso l'acquisizione dello *scattering* di Mie, è nettamente superiore a quanto ottenuto in precedenti campagne di misura. Inoltre, la riduzione del diametro delle particelle ha incrementato notevolmente la precisione della misura che è dipendente dal diametro delle particelle generate [4, 5].

2.3 Sviluppo della fiamma pilota

Per raggiungere dei regimi di funzionamento del bruciatore che fossero il più possibile estesi in termini di numero di Reynolds è stata necessaria una modifica sostanziale dell'esperimento che ha previsto la realizzazione di una fiamma pilota. I principi di progettazione e realizzazione del pilota sono i medesimi assunti nella realizzazione di bruciatori di tipo *McKenna burner* nei quali è previsto la realizzazione di una fiamma mediante il passaggio della miscela attraverso un setto ad elevata porosità. In quest'ottica, è stato realizzato un prototipo di pilota, che ha dato ottimi risultati stabilizzando la fiamma principale fino ad un numero di Reynolds pari a 8000. In Figura 6 è mostrata una fotografia della piastra forata prodotta per realizzare la fiamma pilota. Un'immagine del pilota, in condizioni di funzionamento, e della fiamma principale, sono riportate in Figura 7.



Figura 6 fotografia della piastra forata utilizzata per realizzare la fiamma pilota.

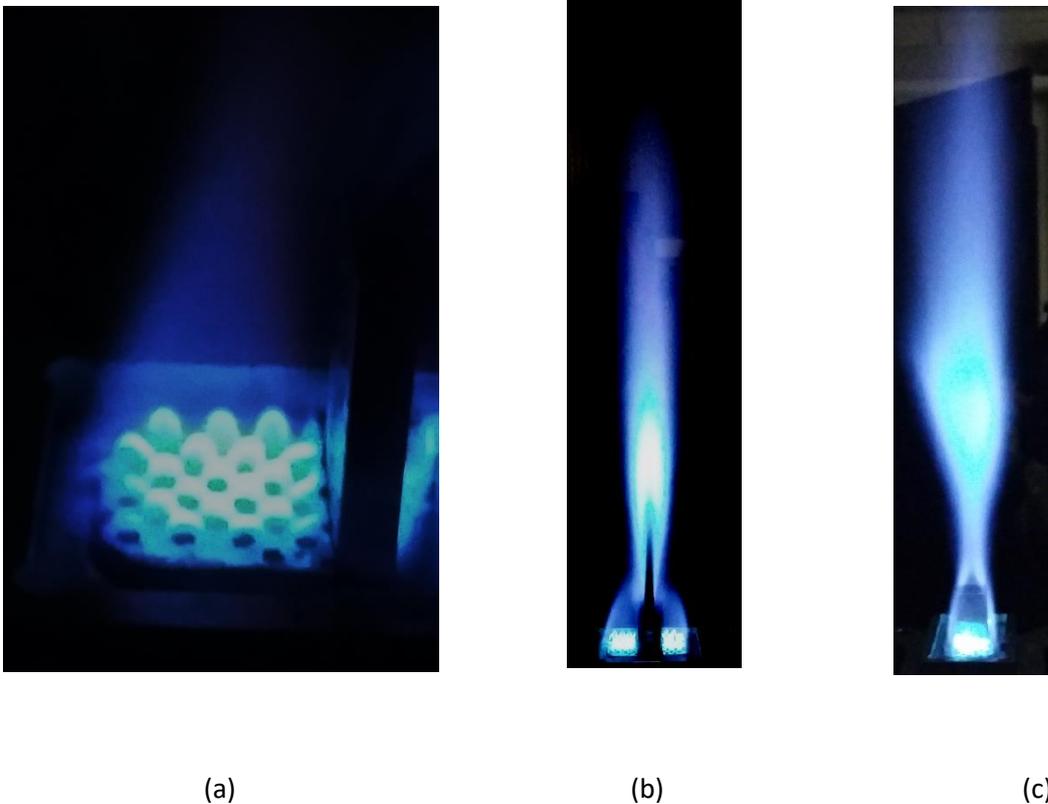


Figura 7 fotografia del pilota (a), fotografia della fiamma attenuata a $Re=8000$: piano frontale (b) e trasversale (c)

2.4 Caratterizzazione acustica del bruciatore "Slotted Burner" (SB) mediante simulazione numerica FEM.

In studi precedenti si è evidenziato che il bruciatore Romulus, a causa dell'elevato rapporto di contrazione che si realizza al suo interno, si comporta come un risonatore di Helmholtz. Tale caratteristica produce intensi quanto indesiderati modi acustici all'interno del dispositivo. I modi propri possono accoppiarsi con le frequenze caratteristiche della fluidodinamica, ed influenzare il processo di combustione [2]. Tale accoppiamento non solo potrebbe ridurre la stabilità del processo, ma anche restituire un falso negativo

nella procedura di validazione delle simulazioni numeriche. Infatti, i modi acustici potrebbero introdurre intense fluttuazioni di pressione di tipo tonale che non sono predicibili attraverso una DNS che riproduca una porzione della geometria reale.

Data la schematizzazione del bruciatore riportata in Figura 8, definito il rapporto d'aspetto del bruciatore come:

$$\Gamma = \frac{H}{h}$$

Tabella 1 valori assunti dai parametri geometrici relativi ai casi simulati.

C [mm]	D [mm]	L [mm]	W [mm]	l [mm]	H [mm]	h [mm]	Γ [-]
28	5	66	10	159	40	1	40
28	5	66	10	159	40	2	20
28	5	66	10	159	40	3	13.3
28	5	66	10	159	40	4	10
28	5	66	10	159	40	5	8
28	5	66	10	159	40	6	6.6
28	5	66	10	159	40	7	5.7
28	5	66	10	159	40	7.5	5.3
28	5	66	10	159	40	8	5
28	5	66	10	159	40	9	4.4
28	5	66	10	159	40	10	4

è stata condotta un'indagine parametrica al variare del rapporto d'aspetto dal quale dovrebbe dipendere la frequenza dei modi acustici. I valori assunti dalle dimensioni della geometria per i diversi casi che sono stati studiati sono riportati in Tabella 1. Le simulazioni sono state effettuate attraverso l'implementazione di un modello FEM sviluppato mediante l'utilizzo del codice commerciale COMSOL. Un esempio della mesh adottata e delle condizioni al contorno assunte è illustrato in Figura 9.

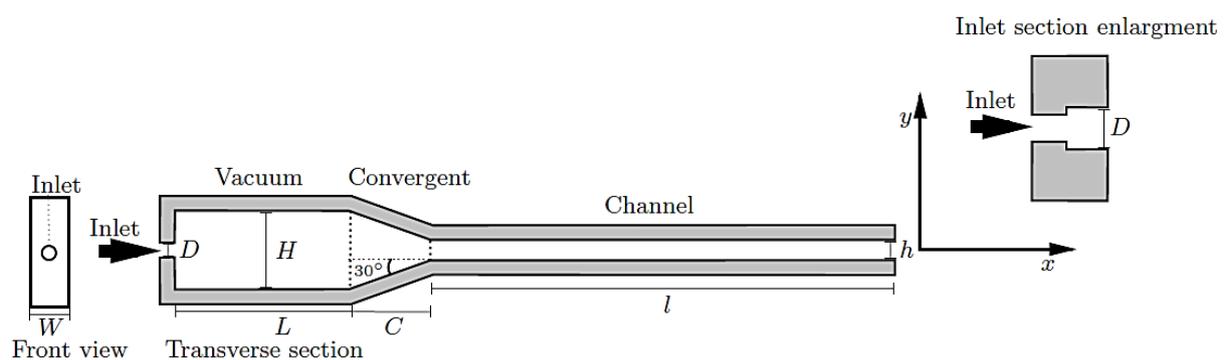


Figura 8 schematizzazione della sezione dello slot burner lungo il piano di simmetria e ingrandimento della geometria dell'inlet.

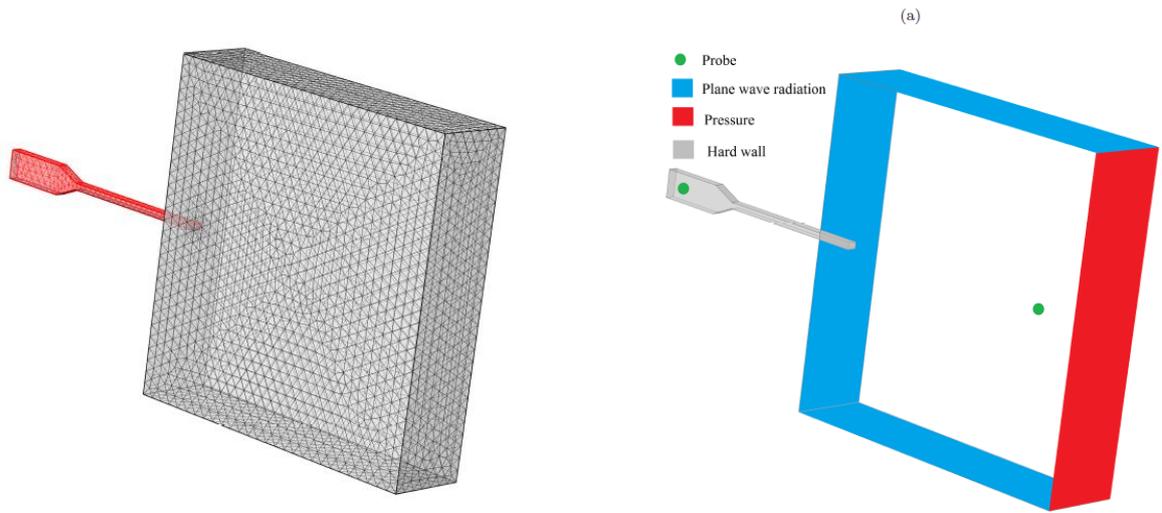


Figura 9 mesh del modello FEM sviluppato e rappresentazione delle condizioni al contorno adottate.

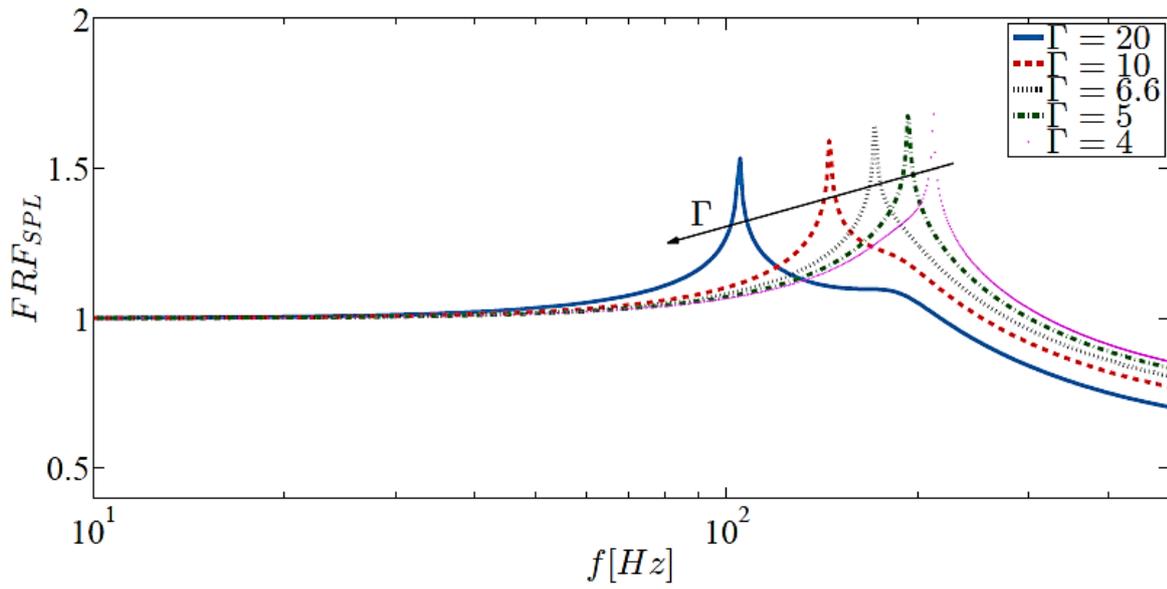


Figura 10 andamento della funzione di risposta in frequenza del primo modo acustico al variare del rapporto di contrazione del bruciatore.

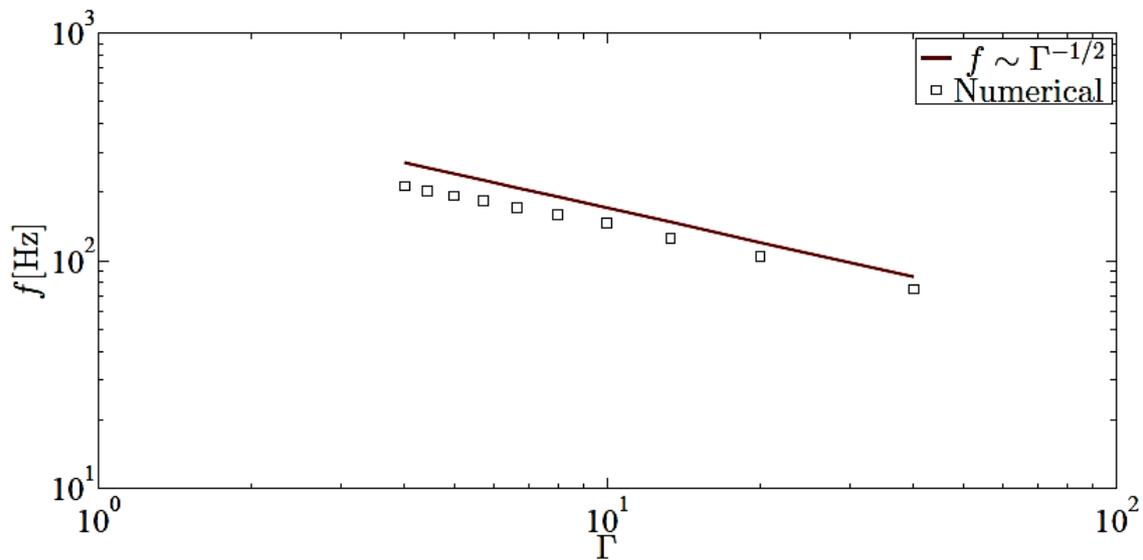


Figura 11 andamento della frequenza del primo modo acustico del bruciatore al variare del rapporto di contrazione del bruciatore.

Con la finalità d’interpretare i risultati ottenuti, è stata utilizzata una formula di natura semi-empirica mediante la quali è possibile ricavare il valore della frequenza di risonanza di un risonatore di Helmholtz, ossia la frequenza del primo modo acustico note le caratteristiche geometriche:

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\Gamma(L + C)l}}$$

dove c_0 è la velocità del suono nel mezzo considerato: in questo caso il mezzo di propagazione delle onde di pressione è l’aria, e quindi tale valore è pari a 348 m/s. In conclusione, si è voluto graficare l’andamento della frequenza fondamentale, ottenuta con il codice di calcolo COMSOL, in funzione del parametro Γ , ovvero il rapporto adimensionale tra H (sezione d’ingresso dello SB –*Slotted Burner*) e h (sezione di uscita dello SB). Nel grafico in Figura 11 è rappresentato l’andamento della cosiddetta Funzione di Risposta in Frequenza (FRF) del primo modo acustico in funzione della frequenza ed è evidente la presenza di un picco di risonanza acustica, detta frequenza fondamentale. Al variare di Γ si può notare come la frequenza fondamentale diminuisca all’aumentare del parametro Γ , ciò vuol dire che per un modello di SB con un diametro di uscita (h) relativamente grande (10mm) si avranno frequenze più basse. Solitamente si rappresenta questo andamento in un diagramma bi-logaritmico come mostrato in Figura 11. Nel grafico è rappresentata una retta rossa, avente coefficiente d’inclinazione pari a $\Gamma^{-0.5}$. La retta è rappresentativa dell’andamento dei risonatori di Helmholtz. A tale proposito, quest’ultimo grafico dimostra l’inclinazione del bruciatore Romulus a comportarsi, dal punto di vista acustico, come un risonatore di Helmholtz.

L’abbattimento della risonanza acustica è stato affrontato ideando un sistema di controllo passivo opportunamente testato sperimentalmente. Esso consiste in un setto forato inserito all’interno del *vacuum* che ha lo scopo di interrompere la continuità del mezzo e ridurre la risonanza in termini di ampiezza. In Figura 12 sono mostrate le immagine del setto e il suo progetto in 3 dimensioni.

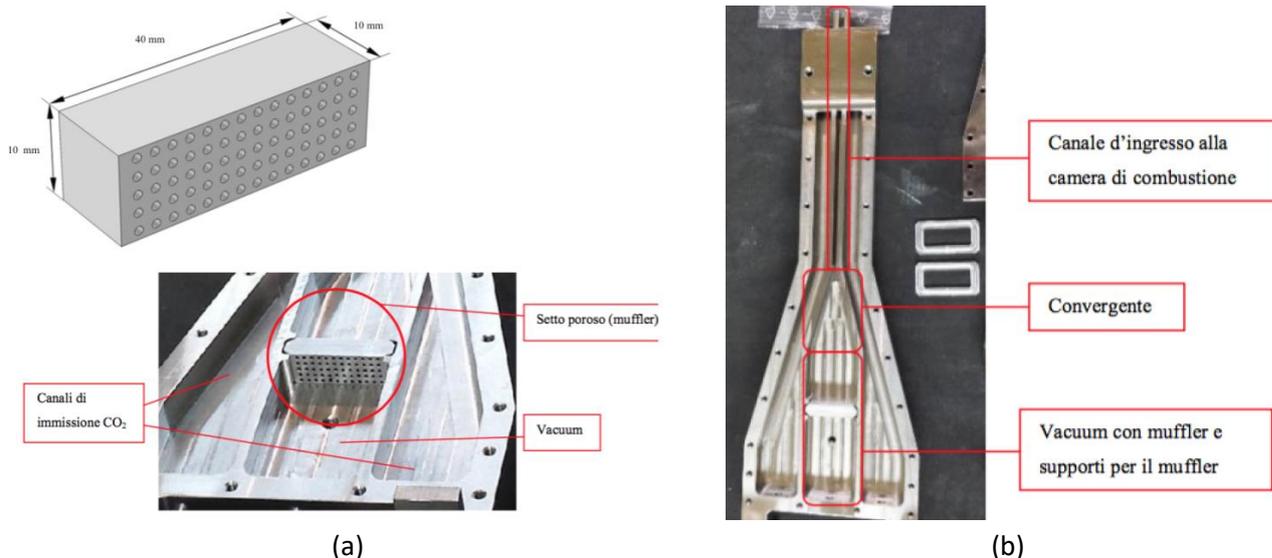


Figura 12 progetto Figura 12 e particolare del setto poroso (a); immagine dell'interno del bruciatore dove è stato messo in evidenza il setto poroso.

2.5 Caratterizzazione aerodinamica e aeroacustica dello Slotted Burner.

Lo slot burner è stato caratterizzato mediante l'impiego di tecniche di diagnostica non intrusiva:

- Microfoni
- Particle Image Velocimety (PIV)

2.5.1 Misure con i microfoni

Le misure sono state condotte presso il laboratorio di combustione dell'ENEA dove è stata allestita la catena di misura che consta di:

- Due microfoni Microtech Gefell da 1/8'
- Una scheda National Instruments di tipo NI 9032
- Un computer per l'acquisizione dei dati
- Un modulo Microtech Gefell per l'amplificazione del segnale

I dati sono stati acquisiti ad una frequenza di 2000 Hz per 10 secondi.

I microfoni sono stati posti all'interno del vacuum del bruciatore e in prossimità della sezione di uscita.

In Figura 13 sono mostrati gli spettri delle fluttuazioni di pressione, ottenuti alimentando il bruciatore solo con una portata d'aria, alla quale corrisponde un numero di Reynolds pari a 8000. Gli spettri non subiscono nessuna variazione significativa, fuorché in termini d'ampiezza all'aumentare della portata d'aria. L'ampiezza degli spettri del segnale di pressione è stata adimensionalizzata opportunamente.

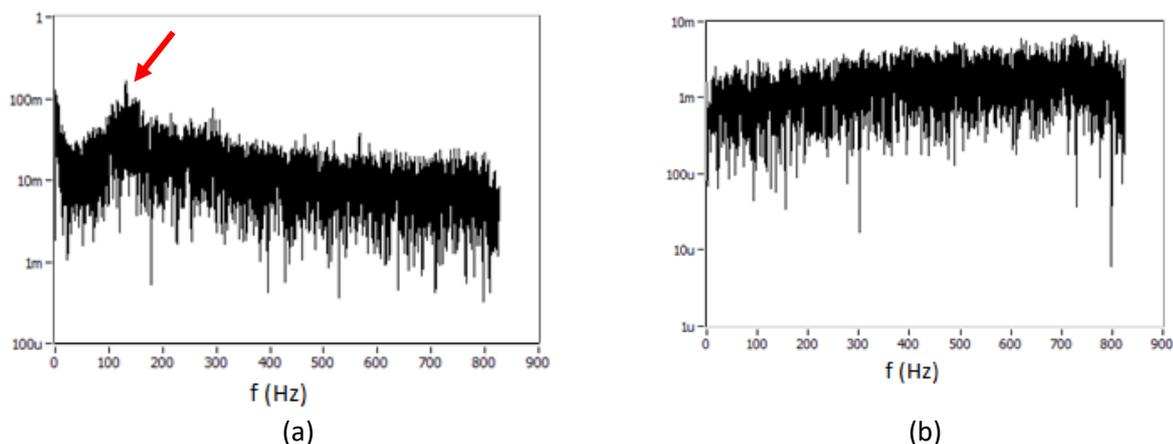


Figura 13 spettro di potenza delle fluttuazioni di pressione misurate all'interno del vacuum (a) e in prossimità della sezione di uscita del bruciatore (b).

In Figura 13 (a) si può notare la presenza di un picco in prossimità di 100 Hz. In accordo con l'analisi FEM mostrata precedentemente, tale componente tonale può essere ascritta al primo modo di risonanza acustica del bruciatore. Come si può osservare in Figura 13 (b), la presenza di un setto poroso posto all'interno di Romolus elimina tale fenomeno che non viene più osservato all'esterno del bruciatore.

2.5.2 Misure di velocimetria mediante tecnica PIV

E' stata effettuata una caratterizzazione fluidodinamica del bruciatore mediante tecnica PIV al variare della portata dell'aria in ingresso al bruciatore. A titolo di esempio sono stati riportati i profili di velocità media assiale al variare della distanza dall'asse del getto. Dei marker sono stati utilizzati sui profili allo scopo di evidenziare l'elevato numero di punti sperimentali ottenuti. Considerando che il database è volto alla validazione di una simulazione DNS, sebbene la scala del bruciatore sia molto piccola, la sperimentazione ha consentito la misura della velocità con un'ottima risoluzione spaziale tale da rendere la successiva attività di validazione notevolmente significativa e di assoluta affidabilità. In Figura 13 (pannello di destra) si nota come il getto, all'aumentare della distanza assiale, incrementi la sua dimensione trasversale, coerentemente con la fisica dei getti più comuni (assial-simmetrici). Si nota inoltre un incremento della velocità massima nel range $x/h < 4.8$ ed una successiva riduzione all'esterno di questa regione.

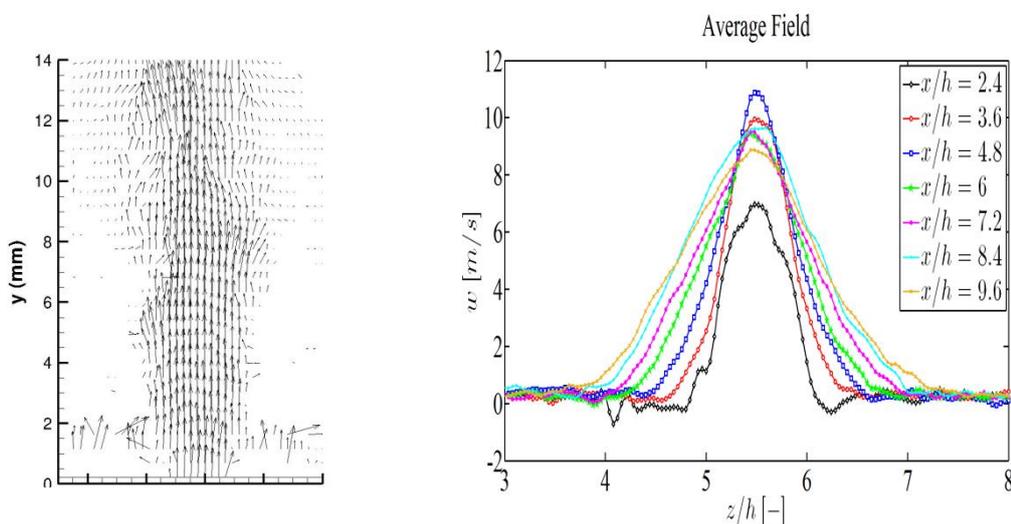


Figura 13 Sinistra: campo vettoriale istantaneo di velocità. Destra: andamento del profilo di velocità assiale medio al variare della distanza dalla sezione di uscita.

Per investigare ulteriormente il comportamento di questa particolare tipologia di getto è stata applicata la tecnica Proper Orthogonal Decomposition. Trattandosi di un database sperimentale, i campi istantanei risultano affetti da due tipologie di rumore che notoriamente compromette i risultati prodotti dalla tecnica:

- presenza di outliers
- rumore broadband

La reiezione del rumore ha richiesto l'applicazione di un complesso algoritmo di filtraggio seriale. Gli outliers sono stati rimossi mediante un thresholding e l'applicazione successiva di un filtro mediano, basato su statistiche di ordinamento. La rimozione del rumore broadband è stata ottenuta mediante un filtro di convoluzione gaussiana. Nello specifico è stato applicato un kernel gaussiano 3x3.

Il principale risultato ottenuto è che il primo modo POD, della componente assiale della velocità, è dominante. Dalla topologia del primo modo si osserva una significativa fluttuazione della penetrazione del getto come confermato in Figura 15 (in alto a destra).

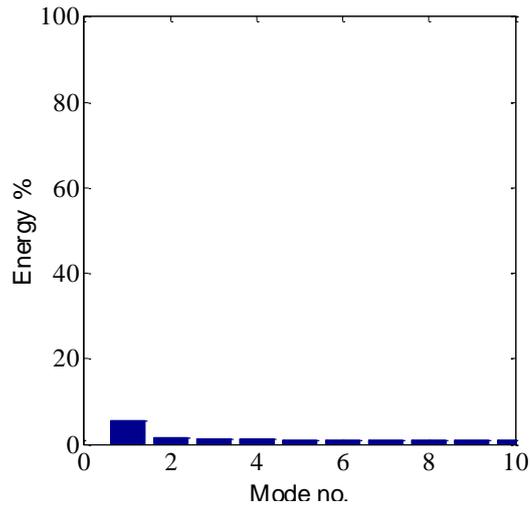


Figura 14 spettro di distribuzione degli autovalori riferiti alla componente assiale di velocità.

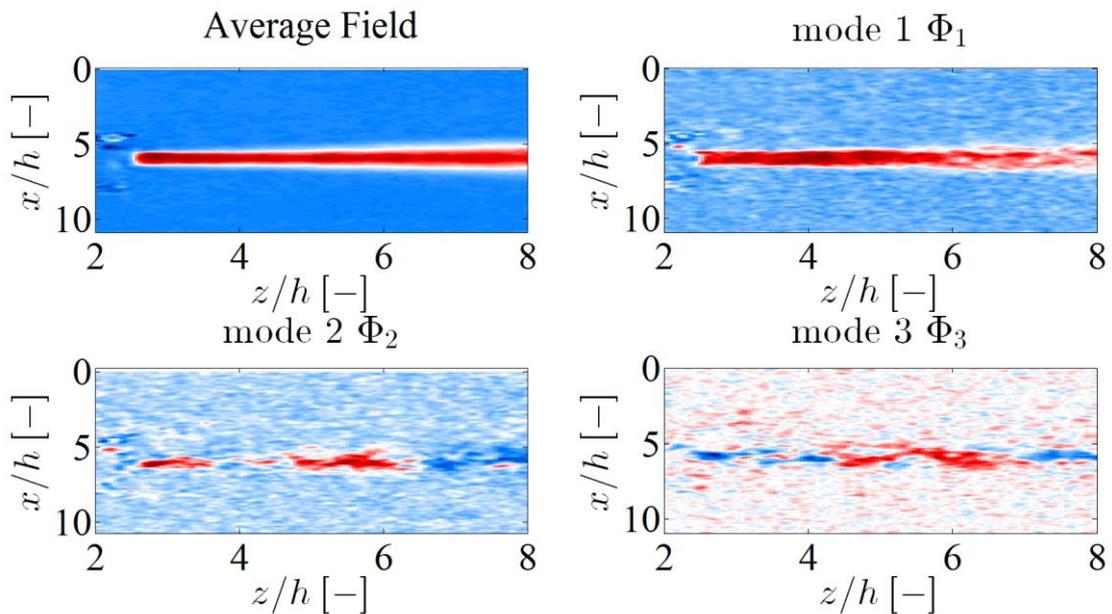


Figura 15 campo medio e primi tre modi POD relativi alla componente assiale di velocità.

Sono riportati per completezza anche i modi 2 e 3 che risultano essere maggiormente rumorosi. Quest'ultima caratteristica probabilmente è dovuta al numero dei campi di velocità utilizzati per la decomposizione. In ultimo, la decomposizione POD del campo di velocità misurato in condizioni reattive è riportato in Figura 17. Anche in questo caso il numero dei campi impiegati per la decomposizione non permette una piena convergenza dell'algoritmo. Nonostante quest'ultima caratteristica il primo modo ha una struttura coerente che suggerisce un modo di *flapping* del getto.

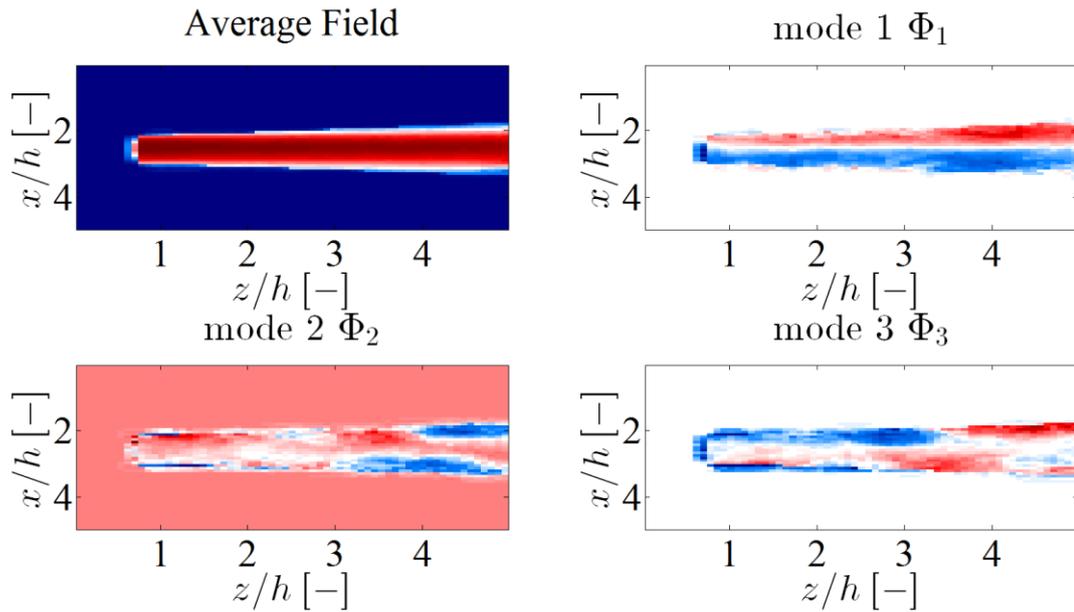


Figura 16 campo medio e primi tre modi POD relativi alla componente assiale di velocità in condizioni reattive.

2.6 Test della tecnica Proper Orthogonal Decomposition sul database DNS.

L'algoritmo di analisi Proper Orthogonal Decomposition (POD) è stato testato su un database prodotto mediante un simulazione numerica di tipo Direct Numerical Simulation (DNS) dello slot burner. Il database fornito dall'ENEA è composto da 150 campi istantanei di velocità e concentrazione di due specie di radicali: CH e OH.

Nonostante la simulazione sia tridimensionale, l'analisi è stata condotta su un piano di simmetria del dominio, con la finalità di riprodurre dei dati rappresentativi del database sperimentale.

La POD è una tecnica di analisi che permette dato un campo n-dimensionale di proiettarlo in uno spazio m-dimensionale. Nella meccanica dei fluidi si è soliti applicare questa tecnica alla fluttuazione del campo di velocità $\vec{V}'(\vec{x}, t)$ che viene proiettato su una base m-dimensionale costituita dai modi $\vec{\phi}_i(\vec{x}, t)$.

La determinazione dei modi è stata effettuata implementando il metodo di Sirovich basato sul calcolo della matrice di autocorrelazione e dalla soluzione del problema agli autovalori associato [1, 2].

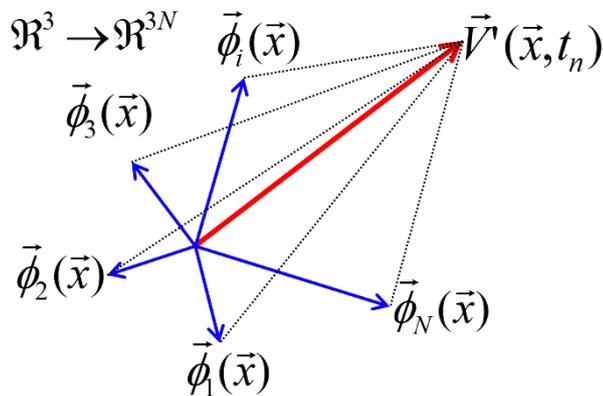


Figura 17: rappresentazione grafica delle decomposizione POD della fluttuazione di velocità.

Per chiarire meglio la natura della decomposizione POD di seguito viene riportata la decomposizione alla Reynolds del campo di velocità:

$$\vec{V}(\vec{x}, t) = \langle \vec{V}(\vec{x}, t) \rangle + \overline{\vec{V}}(\vec{x}, t)$$

Il termine fluttuazione di velocità $\overline{\vec{V}}(\vec{x}, t)$ può essere soggetto ad un'espansione in serie:

$$\overline{\vec{V}}(\vec{x}, t) = \langle \vec{V}(\vec{x}, t) \rangle + \sum_{i=1}^N a_i \Phi_i$$

Dove $a_i(t)$ è il coefficiente dell'espansione che ha la sola dipendenza temporale mentre $\Phi_i(x)$ è il modo i -mo che è dipendente dal solo spazio. È stata dunque eseguita una separazione delle variabili.

Si è soliti analizzare sia la storia temporale del coefficiente, sia lo spettro degli autovalori che la morfologia del modo associato all' i -mo modo.

In Figura 18 sono stati riportati i risultati relativi alla componente assiale della velocità. In particolare è stato rappresentato l'andamento temporale dei coefficienti relativi ai primi quattro modi (in alto a sinistra). Dei medesimi coefficienti sono state fatte le trasformate di Fourier e riportati gli andamenti del modulo della trasformata (in alto a destra). Si può notare che il coefficiente relativo al modo 1 e 2 presenta due componenti tonali dominanti alla stessa frequenza. La rappresentazione del coefficiente 1 e 2 sulla sezione di Poincaré mette in evidenza la presenza di un bacino di attrazione dovuto all'accoppiamento dei due modi. Infine osservando lo spettro degli autovalori si osserva che il primo e secondo modo sono molto energetici e possono essere considerati le dinamiche dominanti (figura in basso a destra).

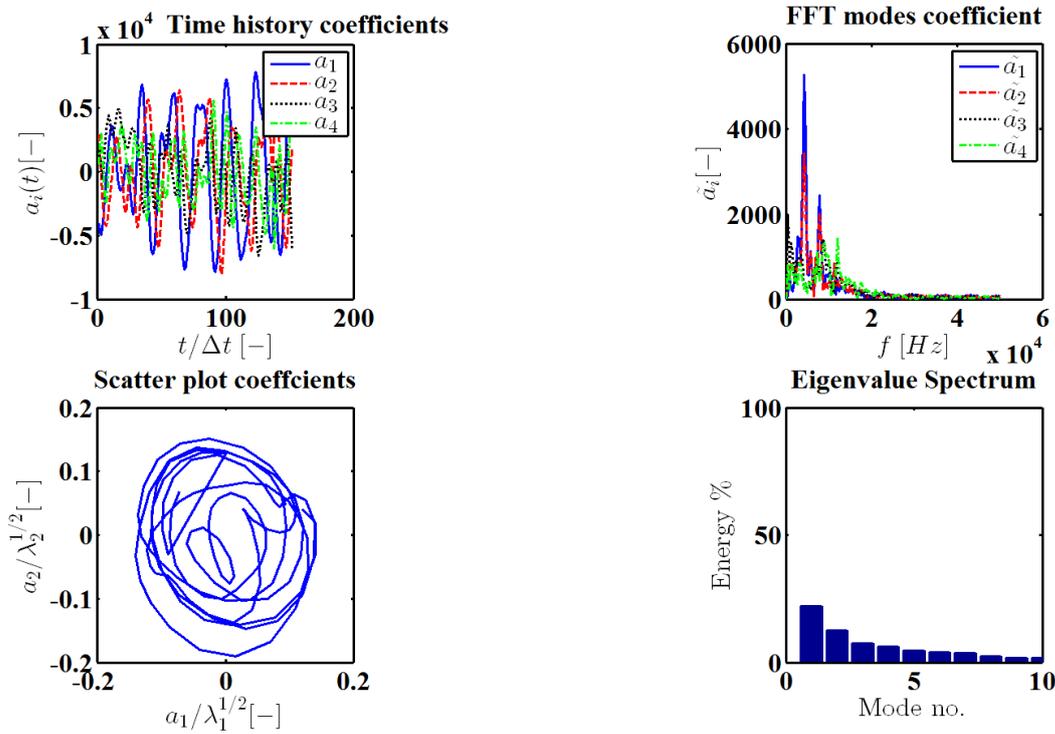


Figura 18 andamento temporale, trasformata di Fourier, sezione di Poincaré dei coefficienti e spettro normalizzato degli autovalori.

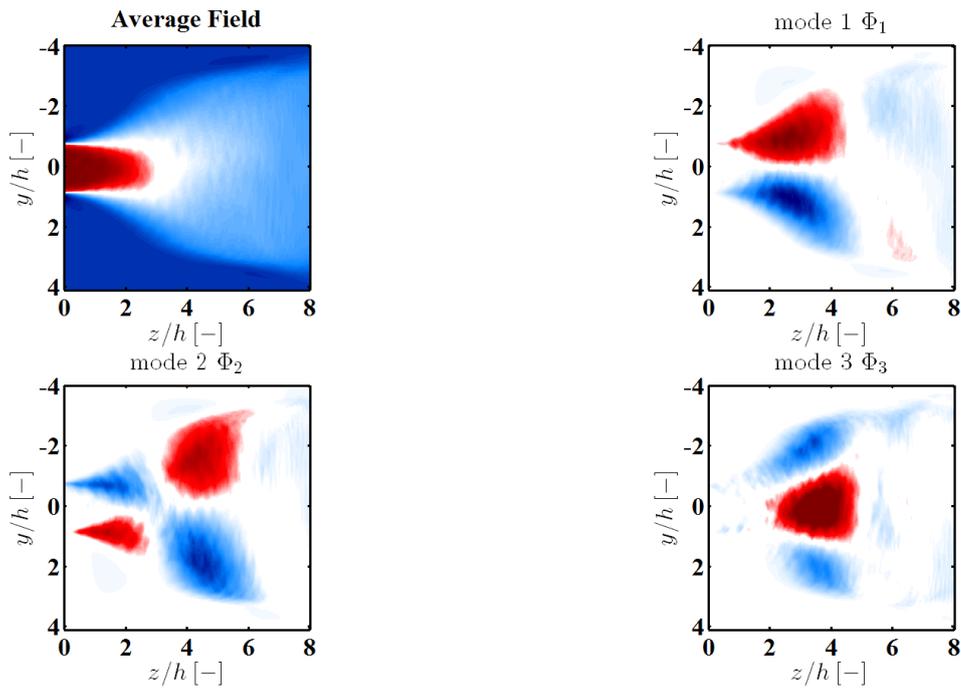


Figura 19 Campo medio, modo 1, modo 2 e modo 3 della componente assiale di velocità.

Informazioni interessanti sono ottenute osservando la topologia dei modi in Figura 19. Il modo 1 e 3 sono simmetrici rispetto l'asse del getto (asse z) mentre il modo 2 è antisimmetrico. Il modo 1 può essere interpretato come la tendenza del getto al flapping mentre il modo 2 è attribuibile ad una dinamica più complessa che dà luogo a fenomeni di tilting del getto, mentre una variazione periodica ad alta frequenza della penetrazione del getto è rappresentata dal terzo modo [1].

La decomposizione modale è stata applicata anche all'altra componente di velocità: quella trasversale. I risultati mostrati in Figura 20 denotano la presenza di una instabilità fluidodinamica. Infatti osservando l'evoluzione temporale del coefficiente, relativo al primo modo, possiamo vederne una significativa amplificazione nel tempo.

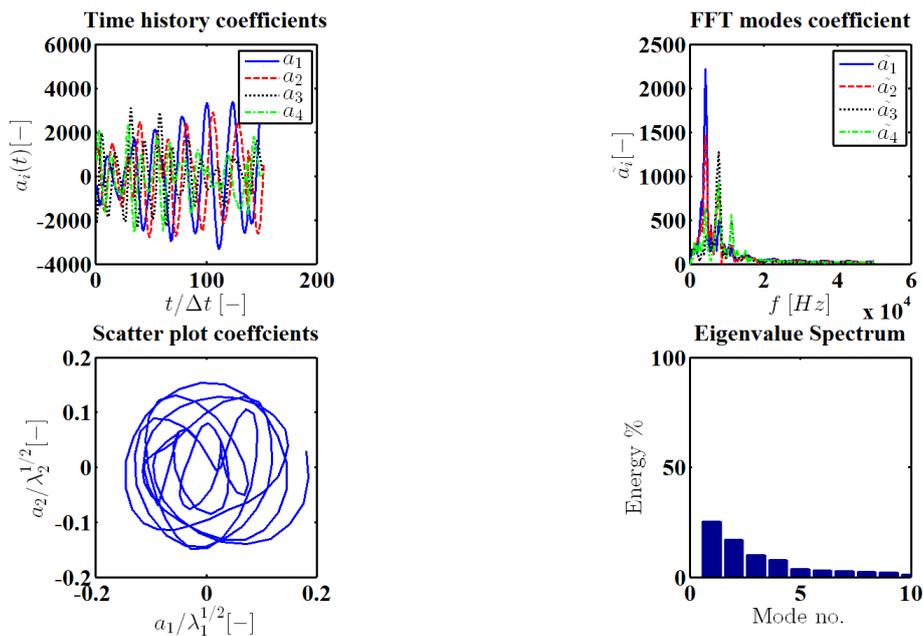


Figura 20 Campo medio, modo 1, modo 2 e modo 3 della componente trasversale di velocità.

È interessante notare che i primi tre modi sono simmetrici rispetto all'asse del getto e che hanno delle frequenze dominanti. Dalla topologia dei modi si evince che sono presenti nel getto delle standing wave. Le standing wave sono in generale correlate a fenomeni di risonanza, tale caratteristica è in accordo con il fenomeno di amplificazione precedentemente evidenziato.

Per quanto riguarda la dinamica della specie radicale CH, in genere utilizzata per l'identificazione del fronte di fiamma, dalla decomposizione in modi si evince che si ha una dinamica del fronte di fiamma non particolarmente importante. Il primo modo risulta essere asimmetrico rispetto all'asse del getto, ed indica un flapping del fronte di fiamma. Anche in questo caso il primo modo sembra essere soggetto ad una fase di transizione ovvero una significativa amplificazione.

Gli altri modi hanno un'intensità trascurabile per tale ragione vengono riportati solo per completezza.

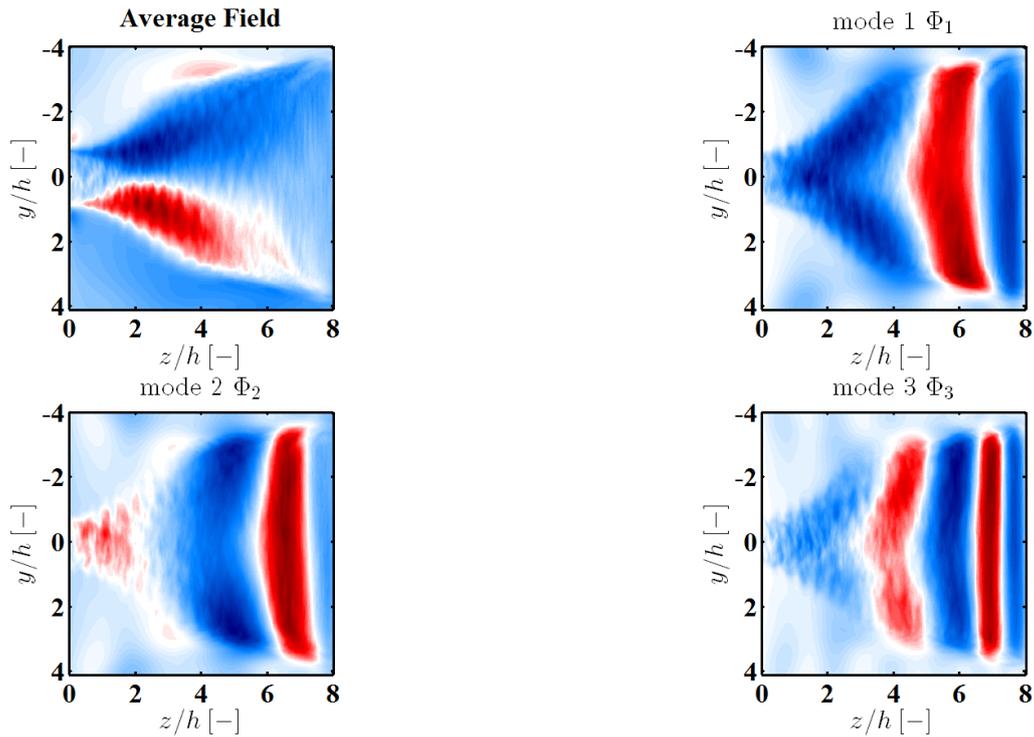


Figura 21 Campo medio, modo 1, modo 2 e modo 3 della componente trasversale di velocità.

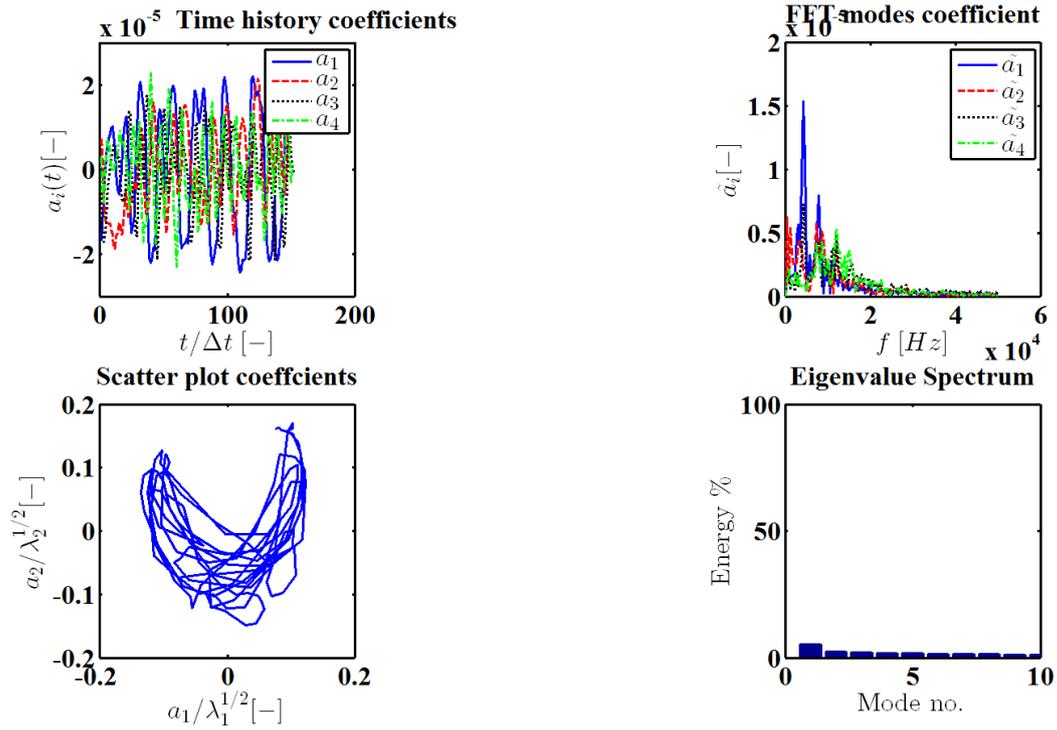


Figura 22 Campo medio, modo 1, modo 2 e modo 3 del campo di concentrazione della specie radicale CH.

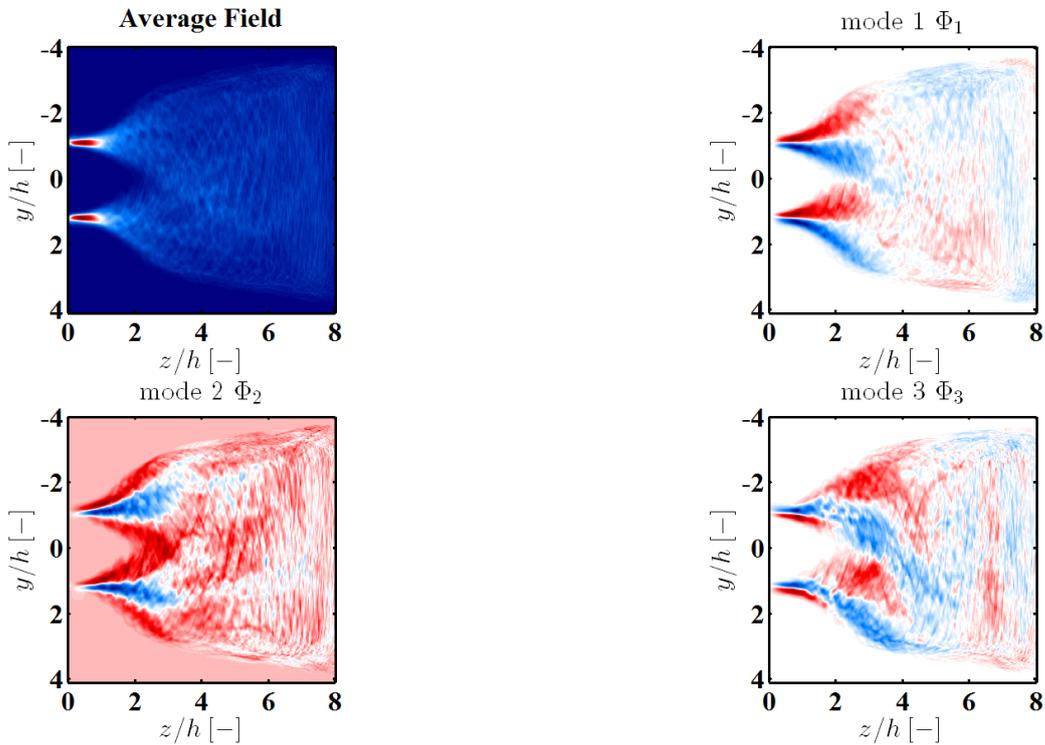


Figura 23 Campo medio, modo 1, modo 2 e modo 3 della componente trasversale di velocità.

3 Conclusioni

L'attività finora svolta ha messo in evidenza principalmente due aspetti: le dimensioni e geometria del bruciatore sperimentale Romolus danno luogo ad un processo di combustione di bassa stabilità che deve essere necessariamente soggetto a procedure di stabilizzazione. Nel caso specifico è stato messo appunto un circuito secondario di alimentazione di una fiamma pilota. Nel prossimo futuro si prevede di effettuare delle misure sperimentali volte alla caratterizzazione di questa nuova configurazione.

4 Riferimenti bibliografici

1. Bernero, S., and H. E. Fiedler. "Application of particle image velocimetry and proper orthogonal decomposition to the study of a jet in a counterflow." *Experiments in Fluids* 29.1 (2000): S274-S281.
2. Pagliaroli, T., and R. Camussi. "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures." *Journal of Sound and Vibration* 341 (2015): 116-137.
3. Cencini, Massimo, Fabio Cecconi, and Angelo Vulpiani. "From simple models to complex systems." *Chaos* 10 (2010): 9789814277662_0001.
4. Pagliaroli, T., et al. "Velocity Measurement of Particles Ejected from a Small-Size Solid Rocket Motor." *Journal of Propulsion and Power* 31.6 (2015): 1777-1784.
5. Stella, A., et al. "Application of particle image velocimetry to combusting flows: design considerations and uncertainty assessment." *Experiments in Fluids* 30.2 (2001): 167-180.
6. Pagliaroli, Tiziano, et al. "Aeroacoustic study of a slotted burner." 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2016.

CV breve del responsabile scientifico del cobeneficiario, Prof. Roberto Camussi

POSIZIONE ATTUALE E POSIZIONI PRECEDENTI:

Dal 2011 è Professore Ordinario in Fluidodinamica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università Roma Tre.

1995-2002: Ricercatore in Fluidodinamica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre

2002-2011: Professore Associato in Fluidodinamica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre

FORMAZIONE

1991: Laurea (con lode) in Ingegneria Aeronautica presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" (tesi vincitrice premio A.I.D.A.A.)

1992-1995: Dottorato di ricerca in "Meccanica Teorica ed Applicata", VIII ciclo, consorziato tra l'Università la Sapienza di Roma e l'Università Roma Tre

1994-1995: Visiting Scientist presso l'Ecole Normale Supérieure di Lione

SUPERVISIONE DI TESI DI LAUREA, DOTTORANDI E POSTDOC

Attualmente è docente guida di cinque dottorandi, due assegnisti di ricerca ed un Ricercatore a tempo determinato (di tipo A). Dal 2008 al 2013 è stato docente guida di 8 dottorandi e 7 assegnisti di ricerca; Dal 2008 è stato relatore di oltre 150 tesi di laurea triennale e oltre 20 tesi di laurea magistrale.

ATTIVITÀ DIDATTICA

Docente di corsi di Fluidodinamica e Aerodinamica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre fin dal 1998.

Nell'a.a. 2014-2015 è docente dei corsi di: "Meccanica dei Fluidi II modulo - Fluidodinamica" (6CFU) della Laurea in Ingegneria Meccanica, "Aerodinamica" (9CFU) e "Termofluidodinamica dei sistemi propulsivi" (9CFU) della Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica.

Dal 2007 è responsabile dei corsi "Jet Noise" (5CFU) e "Airframe Noise" (5CFU) nell'ambito della Corso di Dottorato in Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università Roma Tre.

PRINCIPALI INCARICHI ISTITUZIONALI PRESSO L'UNIVERSITÀ ROMA TRE

Attualmente: è Vice-Direttore con delega alla didattica del Dipartimento di Ingegneria; è referente del Dipartimento di Ingegneria presso il "Centro Linguistico di Ateneo" e presso l'"Ufficio Studenti con Disabilità" dell'Ateneo Roma Tre. E' responsabile della Qualità (per la didattica) del Dipartimento di Ingegneria dell'Università Roma Tre;

Dal 2008 è responsabile del laboratorio di Aerodinamica e Termofluidodinamica del Dipartimento di Ingegneria.

Dal 2007 al 2013 è stato membro rappresentante della Facoltà di Ingegneria presso il Consiglio Scientifico della "Biblioteca di Area Scientifica e Tecnologica" dell'Ateneo.

ALTRI INCARICHI SCIENTIFICI

Dal 2008 è membro del Consiglio Direttivo dell'associazione AIVELA (Associazione Italiana di Velocimetria Laser).

Dal 2008 è membro del comitato di gestione della galleria del vento ENEA-DIMI presso ENEA C.R. Casaccia.

Dal 2009 è Membro dell'Aeroacoustic Specialists Committee della CEAS (Council of European Aerospace Society).

Dal 2012 è Associate Editor della rivista Acta Acustica United with Acustica

Dal 2011 è membro dell' Editorial Advisory Board della rivista The Open Acoustic Journal

Inoltre: ha fatto parte di commissioni nazionali per esame finale di dottorato e concorsi a posti di ricercatore; è stato membro di numerose commissioni per esame finale di dottorato presso sedi estere (TU Delft, Univ. of Poitiers, Trinity College of Dublin, Ecole Centrale de Lyon), per assegnazione del titolo HDR (Habilitation a Diriger la Recherche, Ecole Centrale de Lyon), per concorsi a posizioni di Associate Professor (Trinity College of Dublin, University of Bath).

ORGANIZZAZIONE DI EVENTI SCIENTIFICI

- 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Roma, 21-23/5 2006 (supporto all'organizzazione)
- Short Course on Aeroacoustics, Roma, 24-26/5 2006 (co-organizzatore).
- XIV Convegno Nazionale A.I.VE.LA., Roma, 6-7/11 2006 (supporto all'organizzazione)
- XVII Convegno Nazionale A.I.VE.LA., Roma, 15-16/12 2010 (organizzatore)
- National Workshop on Aeroacoustics, Capua (CE), 8-9 /4 2010 (co-organizzatore)
- Advanced school "Noise sources in turbulent shear flows", CISM (Centre International de Science Mechanique), Udine (IT) 18-22/4 2011 (organizzatore)
- 9th European Fluid Mechanics Conference (EFMC9), Roma 9-13/9 2012 (co-organizzatore)
- ASME Pressure Vessels & Piping Conference, Anaheim (California) (Member of the scientific Committee and session co-developer for the area: Control of FIV and noise), 20-24/7 2014
- 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering, EuroNoise 2015, Maastricht (member of the Scientific Committee) 31/5-2/6 2015
- 5th CEAS Air & Space Conference, Delft (Member of the International Program Committee) 7-11/9 2015

Inoltre, dal 2007, organizza meetings periodici nell'ambito dei contratti europei di cui è partner.

PRINCIPALI SEMINARI E PRESENTAZIONI AD INVITO

- Guest speaker presso il DLR Gottingen, lecture title "Application of wavelet transform in Aeroacoustics", 23/6/2015.
- Invited Lecturer nell'ambito del corso internazionale Fundamentals of Aeroengine Noise, Von Karman Institute Lecture Series, 1-3/12 2014. Lecture title "Advanced analysis techniques (wavelets, LSE, POD) for noise sources identification".
- Invited Lecturer nell'ambito del corso internazionale Advanced post-processing of experimental and numerical data, Von Karman Institute Lecture Series, 4-7/11 2013. Lecture title "Wavelet analysis and applications in aeroacoustics".
- Invited Lecturer nell'ambito del corso internazionale Advanced post-processing of experimental and numerical data, Von Karman Institute Lecture Series, 4-7/11 2013. Lecture title "Wall pressure fluctuations statistics: measurements and numerical simulations".
- Invited Lecturer alla conferenza Flinovia - Flow Induced Noise and Vibration, Roma 11-13/11 2013). Lecture title: "Wall pressure fluctuations induced by supersonic TBL".
- Invited speaker (plenary lecture) alla conferenza 14th European Turbulence Conference ETC14, Lyon 1-4/9 2013). Lecture Title "Application of time-frequency tools in aeroacoustics: identification of noise sources and theoretical modelling".
- Invited Lecturer nell'ambito del corso internazionale Noise sources in turbulent shear flows at C.I.S.M. (Centre International de Science Mechanique), Udine (IT) 18-22/4 2011). Lecture title: "Boundary Layer Noise".
- Invited Lecturer all'Ercofac Symposium on Sound Source Mechanisms in Turbulent Shear Flows, Poitiers – France, July 7-9/7 2008. Lecture title "Noise source identification through wavelet analysis of pressure/velocity data"

Nel passato è stato invitato a tenere seminari presso Ecole Normale Superieure of Lyon (1997), Trinity College of Dublin (1999), Cargese Summer School "Turbulence: measurements and signals" (2002), Ecole Centrale de Lyon (2004), University of Karlsruhe (2006).

ATTIVITA' DI REFERAGGIO PER RIVISTE ED ASSEGNAZIONE FINANZIAMENTI

E' referee di numerose riviste scientifiche internazionali (tra le quali Journal of Fluid Mechanics, Physics of Fluids, Experiments in Fluids, Journal of Sound and Vibration, Journal of the Acoustical Society of America, Journal of Turbulence). E' stato Referee per il MIUR per valutazione di finanziamenti SIR 2014. E' Referee per US National Science Fundation, EPSRC (UK Engineering and Physical Science Research Council), e-GAP (British Academy), IRCSET (Irish Research Council for Science, Engineering and Technology), STW (Dutch Funding Agency)

RESPONSABILITA' DI CONTRATTI E CONVENZIONI

E' stato/è responsabile scientifico di numerosi contratti di ricerca e convenzioni con enti pubblici e privati nazionali, tra i quali il MIUR, ENEA, CNR, CIRA, ALENIA, ASI, AVIO, BASF, MBDA, ItalFerr. Inoltre è stato Responsabile scientifico di progetti PRIN (2005 e 2008) e di progetti europei nell'ambito del FP6 (PROBAND, AEROTRANET), FP7 (ORINOCO, AEROTRANET2, JERONIMO, EASIER, WITTINESS), H2020 (ERACLE).

ATTIVITÀ SCIENTIFICA

L'attività scientifica si e' sviluppata principalmente nell'Aerodinamica e Fluidodinamica sperimentale con ricerche di base ed altre a carattere maggiormente applicativo. L'attività ha portato alla pubblicazione di circa 160 lavori scientifici di cui oltre 50 pubblicati su riviste con referaggio ed elevato impact factor.

PRINCIPALI PUBBLICAZIONI (2011-2015)

- M. felli, R. Camussi, "Mechanisms of evolution of the propeller wake in the transition and far fields", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. [682](#), pp. 5 – 53, 2011.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- T.Pagliarioli, R.Camussi, "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 341, pp. 116-137, 2015.
- 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.
- [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
- T.Pagliarioli, R.Camussi, E. GIACOMAZZI, E. GIULIETTI, "Velocity measurements of particles ejected from a small size solid rocket motor", *Journal of Propulsion and Power*, in press.
- A. Di Marco, M. Mancinelli, R. Camussi, "Flow-induced pressure fluctuations of a moderate Reynolds number jet interacting with a tangential flat plate", *Advances in Aircraft and Spacecraft Sciences*, in press.
- 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.
- 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.
- 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.
- R. Camussi, "Wavelet analysis and applications in aeroacoustics", in *Advanced post-processing of experimental and numerical data*, Von Karman Institute Lecture Series, Nov. 2013.
- R. Camussi, "Advanced analysis techniques (Wavelets, LSE, POD) for noise sources identification", in *Aeroengine Noise*, Von Karman Institute Lecture Series, Dec. 2014.
- 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.

- F.R. Verdugo, R. Camussi, G. Benneth, “Aeroacoustic source characterization technique applied to a cylindrical Helmholtz resonator”, 18th International Congress on Sound and Vibration (ICSV18), Rio de Janeiro (BR), 7/2011.
- S. GRIZZI, R. CAMUSSI, " Experimental investigation of the Near-Field Noise generated by a Compressible Round Jet” Journal of Physics: Conference Series 318 (2011) 092003, Proceedings 13th European Turbulence Conference (ETC13), Warsaw 7/2011.
- g. bernardini, L. Morino, A. gradassi, M. ONORI, R. Camussi, “A simple, but efficient aeroacoustic model of jets”, AIAA paper 2012-2164, 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Colorado Springs (USA), 6/2012.
- s. grizzi, r. Camussi, A. DI MARCO “Experimental Investigation of pressure fluctuations in the near field of subsonic jets at different Mach and Reynolds numbers”, AIAA paper 2012-2257, 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Colorado Springs (USA), 6/2012.
- a. di marco, m. bernardini, s. pirozzoli, r. Camussi, “Multi-variate Statistics of the Wall Pressure Field beneath Supersonic Turbulent Boundary Layers”, AIAA paper 2012-2053, 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Colorado Springs (USA), 6/2012.
- F. Magionesi, E. Ciappi, R. Camussi, T. Pagliaroli, A. Di Mascio, B. Imperatore, A. Marino, “Measurements and Modelling of Turbulent Boundary Layer Excitation for Naval and Aeronautical Applications, Noise and Vibration: emerging methods”, proceedings NOVEM 2012 Noise and Vibration: Emerging Methods, Sorrento 4/2012.
- R. Camussi, T. Pagliaroli, E. Ciappi, F. Magionesi, B. Imperatore, A. Marino, “Wind tunnel measurements of pressure fluctuations and structural response induced by the turbulent boundary layer at high Mach number, PART 1: velocity and pressure field characterization”, proceedings NOVEM 2012 Noise and Vibration: Emerging Methods, Sorrento 4/2012.
- T. pagliaroli, r. Camussi, “Acoustic and Aeroacoustic Characterization of Rectangular Partial Enclosures”, AIAA paper 2013-2050, 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Berlin (D), 5/2013.
- A. Marino, P. Vitiello, T. Pagliaroli. V. Quaranta, B. Imperatore, R. Camussi, “Innovative Vibration and Acoustic Methodologies for the Design of Enhanced Composite Panel for Aircraft”, 43rd AIAA Fluid Dynamics Conference, San Diego (USA),5/2013.
- [E. Miguel](#), [L. Gefen](#), [C. Freitas](#), [S. Grizzi](#), [R. Camussi](#), [M. Felli](#), “Pressure-density gradient correlations in the near-field of a transonic jet”, AIAA paper 2014-3310, [20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference](#), Atlante (USA), 6/2014.
- T. PAGLIAROLI, R. Camussi, A. Di Marco, C. Stringola, E. Glulietti, E. Giacomazzi, “Combustion Acoustic Coupling in Trapped Vortex Combustor”, Ninth Mediterranean Combustion Symposium, Rhodes, Greece, 6/2015.
- A. DI Marco, M. Mancinelli, R. Camussi, “Flow-Induced Noise of a Moderate Reynolds Number Jet Interacting with a Tangential Flat Plate“, NOVEM 2015 Noise and vibration: Emerging methods, 4/2015.
- M. Mancinelli, A. Di Marco, R. Camussi, “Flat Plate Installation Effects on Velocity and Wall Pressure Fields Generated by an Incompressible Jet”, Euronoise 2015 - 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Maastricht, 31 May – 3 June 2015.
- S. Grizzi, R. Camussi, "Experimental Investigation of the Near-Field noise of a compressible round jet” , 19° Convegno Nazionale AIVELA, Bertinoro, 12/2011.
- T. Pagliaroli, R. Camussi, S. Giammartini , “Flow-Acoustic Characterization of a Trapped Vortex Combustor in non-Reactive Condition”, 19° Convegno Nazionale AIVELA, Bertinoro, 12/2011.