



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi della dinamica di combustione su un bruciatore  
in scala da laboratorio in forte eccesso di anidride  
carbonica.

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

ANALISI DELLA DINAMICA DI COMBUSTIONE SU UN BRUCIATORE IN SCALA DA LABORATORIO IN FORTE  
ECESSO DI ANIDRIDE CARBONICA.

G. Troiani, M. Marrocco - ENEA

T. Pagliaroli, R. Camussi - Dip. di Ingegneria - Università di Roma 3

Settembre 2017

#### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto B.2: Polo Tecnologico del Sulcis: Tecnologie e Metodologie 'Low Carbon'

Parte A1: Tecnologie per impiantistica energetica 'Low carbon'

Cicli turbo-gas innovativi e ossicombustione pressurizzata di metano

Obiettivo: a.1 - task 2 - Studi sulla dinamica di combustione in cicli turbogas EGR (sperimentazione test-rig ROMULUS)

Responsabile del Progetto: F.R. Picchia, ENEA

Responsabile scientifico ENEA del Contratto di Ricerca con Università di Roma 3: Guido Troiani

Responsabile scientifico per l'Univ. di Roma 3: Prof. Roberto Camussi

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 ATTIVITÀ SPERIMENTALI SUL BRUCIATORE ROMULUS E RISULTATI OTTENUTI .....	6
1.1 MISURE DI VELOCITÀ.....	6
1.2 MISURE DI CONCENTRAZIONE DEL RADICALE OH (OH-LIF) .....	7
1.3 MISURE DI TEMPERATURA (CARS) .....	8
1.4 ANALISI DI FATTIBILITÀ PER L'UTILIZZO DI UNA CAMERA DI COMBUSTIONE RISTRETTA.....	9
1.5 MISURE DI PRESSIONE .....	11
1.6 ANALISI CAOTICA.....	13
1.7 ANALISI WAVELET .....	21
2 CONCLUSIONI.....	23
3 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	23

## Sommario

Il bruciatore denominato ROMULUS è stato realizzato per investigare e simulare aspetti fondamentali della combustione aria-metano in forte presenza di gas esausti (principalmente anidride carbonica,  $\text{CO}_2$ ) e individuare le condizioni che possano condurre ad instabilità di tipo termoacustico. In particolare, due fiamme pilota, poste ai lati della principale, hanno il compito di creare un ambiente ricco di  $\text{CO}_2$ , simile a quello presente nei sistemi EGR. Questa configurazione, inoltre, rende possibile stabilizzare una fiamma turbolenta fino a un numero di Reynolds dell'ordine di 10000 cui corrispondono velocità medie di efflusso di 40-50 m/s.

La geometria della sezione della camera di combustione costruita in quarzo (per permettere un accesso ottico alla fiamma) è stata modificata per superare le problematiche riscontrate durante le misure di velocità con la Particle Image Velocimetry (PIV) e di concentrazione di specie radicaliche con la Laser Induced Fluorescence (LIF). In particolare, l'eccessiva vicinanza della fiamma alle pareti in quarzo portava le particelle di allumina (utilizzate come insemillante per la misura della velocità) ad aderirvi, riducendo drasticamente la loro trasparenza alla luce laser e rendendo impossibile le misure di tipo spettroscopico. La nuova sezione di prova con accessi ottici più distanti dal fronte di fiamma individua un volume della camera di combustione maggiore, che è possibile simulare numericamente solo con una tecnica di tipo Large Eddy Simulation (LES).

Le attività sono state condotte da ENEA in stretta collaborazione con il gruppo di ricerca del Prof. Camussi, del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Roma TRE (DING); in particolare ENEA si è occupata di effettuare:

- 1) le misure di velocità (PIV) da fornire al gruppo ENEA dedicato allo studio numerico LES del bruciatore (task.3 dell'Ob. a.1)
- 2) Le misure della posizione del fronte di fiamma dedotte dalla concentrazione del radicale OH (OH-LIF).
- 3) Le misure di temperatura (tecnica Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, CARS)
- 4) L'analisi di fattibilità delle misure PIV, LIF, e CARS con camera di combustione in quarzo di dimensioni ridotte.

In collaborazione con l'Università si è provveduto, inoltre, all'ottimizzazione della densità dell'insemillante nel flusso principale al fine di ridurre la dimensione della camera di combustione in prossimità della sezione in quarzo per l'accesso ottico; la riduzione del volume della camera di combustione risulta necessario per poter effettuare in tempi accettabili una simulazione DNS (Direct Numerical Simulation) del combustore. In tal modo sarà possibile studiare le fenomenologie di combustione ottenendo dalle simulazioni numeriche le informazioni non ottenibili sperimentalmente.

Nell'ambito di questo obiettivo l'Università ha effettuato campagne di misura e studi orientati all'individuazione di eventuali regimi di instabilità di tipo termoacustico per le due configurazioni della sezione di prova in quarzo.

La transizione dal regime di "combustion noise" a quello di instabilità termoacustica si riflette sul segnale di pressione modificandone alcune caratteristiche statistiche. Le così dette firme spettrali dell'instabilità non sono direttamente visibili dall'analisi dei primi momenti statistici generalmente utilizzati in ambito ingegneristico, come valore medio o deviazione standard. Le modifiche sul segnale di pressione sono "sepolte" in profondità all'interno delle fluttuazioni di pressione, soprattutto i tempi a cui avvengono non sono caratterizzati da una precisa cadenza. Quando ciò avviene, si dice che questi eventi sono "intermittenti".

La profonda conoscenza dei metodi di analisi di queste intermittenze da parte del personale del DING, ha permesso, attraverso l'analisi caotica di estrarre queste tracce profonde nei segnali di pressione. Tracce

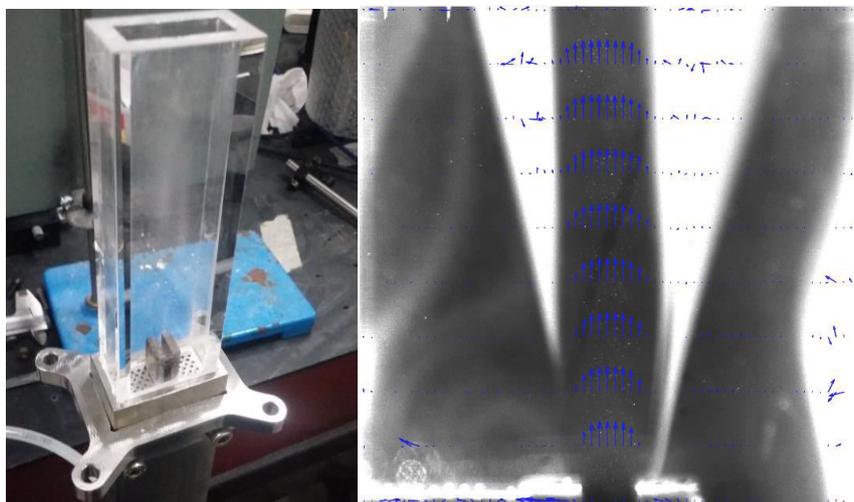
che, nonostante il loro carattere intermittente, hanno una profonda influenza (anche di interesse ingegneristico) sulle variabili globali, come campo medio di velocità e posizione e topologia del fronte di fiamma. In questa ottica, l'estrazione (da parte del personale del DING) delle firme spettrali dei fenomeni intermittenti risulta di fondamentale importanza per la definizione di alcuni osservabili capaci di diventare dei precursori dell'instabilità termoacustica. Questo permetterà di definire dei parametri operativi per evitare e anche individuare con sufficiente anticipo l'insorgere delle instabilità termoacustiche di combustione, capaci a lungo andare di inficiare non solo la qualità della combustione, ma causare danni macroscopici alle camere di combustione. Il tipo di analisi effettuato nello specifico e i risultati ottenuti sono descritti in dettaglio nei paragrafi 1.5, 1.6, 1.7.

## 1 Attività sperimentali sul bruciatore ROMULUS e risultati ottenuti

### 1.1 Misure di velocità

Il progetto originale del dispositivo prevedeva un volume della camera di combustione in quarzo dalle dimensioni ridotte. Nel pannello sinistro della Figura 1 è possibile notare i vari componenti del bruciatore. In particolare, è ben visibile la sezione di uscita della miscela reagente di forma rettangolare compresa tra le due fiamme pilota. Le fiamme pilota sono realizzate con matrici di fori (diametro pari a 1.3 mm) che creano una superficie uniforme a temperatura elevata, maggiore di quella di ignizione del combustibile. Sezione di uscita del fluido combustibile e fiamme pilota sono racchiuse all'interno della camera di combustione realizzata in quarzo, per motivi di trasparenza alle radiazioni ultraviolette (per la misura della temperatura). In questa configurazione la fiamma lambisce le pareti interne della camera di quarzo su cui si vanno a depositare le particelle di insemillante necessarie alla PIV (Particle Image Velocimetry, tecnica per la misura della velocità).

Questo effetto è visibile nel pannello centrale della Figura 1, dove la deposizione delle particelle di insemillante (allumina) è rappresentata dalle due strisce bianche. Sovrapposta all'immagine, è riportato il campo vettoriale di velocità a differenti altezze. Ovviamente, la velocità è ben risolta dove c'è presenza di particelle e il quarzo risulta essere trasparente (pulito), cioè nella sezione centrale della camera. Ai suoi lati, dove la parete di quarzo è coperta da uno strato di allumina, la tecnica PIV fallisce. Sono infatti ben visibili delle distribuzioni incoerenti di vettori, tipiche del rumore.

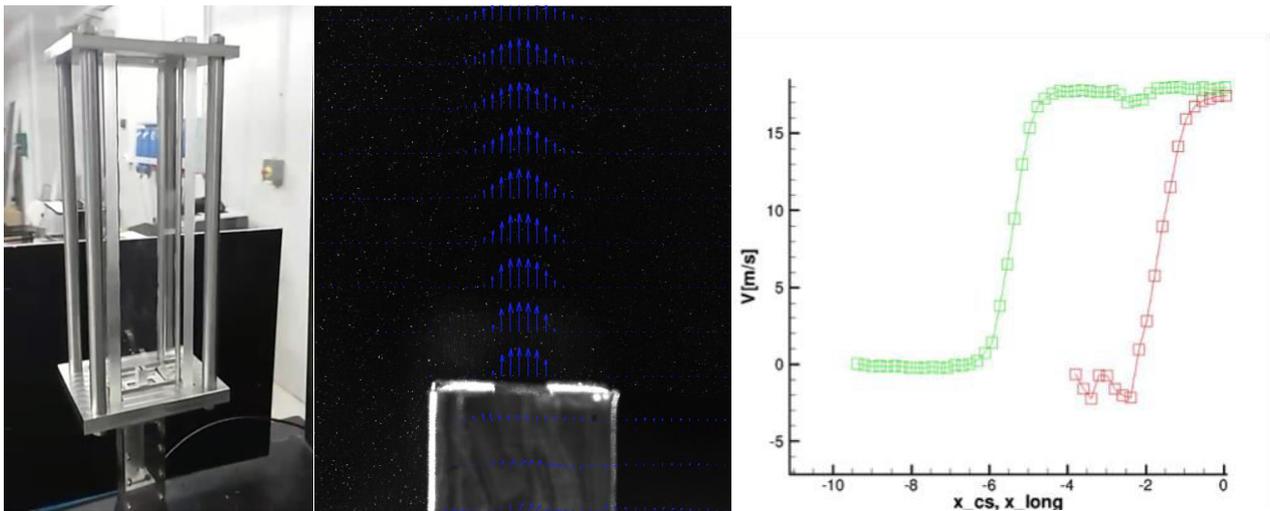


**Figura 1** Finestra in quarzo di ridotte dimensioni. Esempio di immagine Mie scattering con sovrapposizione del campo vettoriale di velocità. Esempio di adesione delle particelle alle pareti interne del quarzo.  $Re=5000$ , 26 l/min.

Questo problema è stato risolto allontanando le pareti in quarzo dal getto reagente. È stata costruita una nuova camera di combustione, dal volume maggiore, visibile nella Figura 2, pannello sinistro. Nel pannello di destra si può notare invece come la deposizione dell'allumina sulle pareti della camera non avvenga più e il campo vettoriale di velocità sia ben risolto ovunque. Queste sono quindi le condizioni operative prescelte per essere simulate numericamente. Dato l'aumento di volume della camera di combustione, la tecnica numerica prescelta è la Large Eddy Simulation (LES). Al fine di simulare al meglio la fiamma così definita si è reso necessario fornire, come dato di ingresso alla simulazione numerica, il profilo di velocità all'uscita del bruciatore e le portate in massa delle due fiamme pilota. Le due fiamme pilota elaborano una massa di

miscela aria/propano pari a 0.07 g/s che corrisponde ad una velocità di efflusso media di 0.4 m/s. La fiamma principale, invece, elabora una portata stechiometrica di aria/metano di 0.52 g/s, con una velocità media di efflusso di circa 17 m/s. Questo corrisponde un numero di Reynolds basato sul raggio idraulico del getto di 4000.

Nel pannello destro di Figura 2, sono visibili gli andamenti delle velocità trasversali e longitudinali (vedere la didascalia della figura per la definizione di trasversale/longitudinale). All'interno del getto reagente le velocità appaiono sostanzialmente costanti e sono ben risolti i forti gradienti di velocità dovuti allo *shearlayer* imposto dalle pareti. I valori delle fluttuazioni turbolente (non mostrate in figura, per non alterare la leggibilità del grafico) sono dell'ordine del 15% della velocità media.



**Figura 2 Sinistra, finestra in quarzo di grandi dimensioni. Centro, esempio di immagine *Mie scattering* con sovrapposizione del campo vettoriale di velocità, vista trasversale del bruciatore. Portata di miscela reagente non ignita di 40 l/min ( $Re=8000$ ). Destra, profilo di velocità trasversale ( $x_{cs}$ , simboli rossi) e longitudinale ( $x_{long}$ , simboli verdi) del flusso di reagenti all'uscita del bruciatore per un numero di Reynolds pari a 4000.**

## 1.2 Misure di concentrazione del radicale OH (OH-LIF)

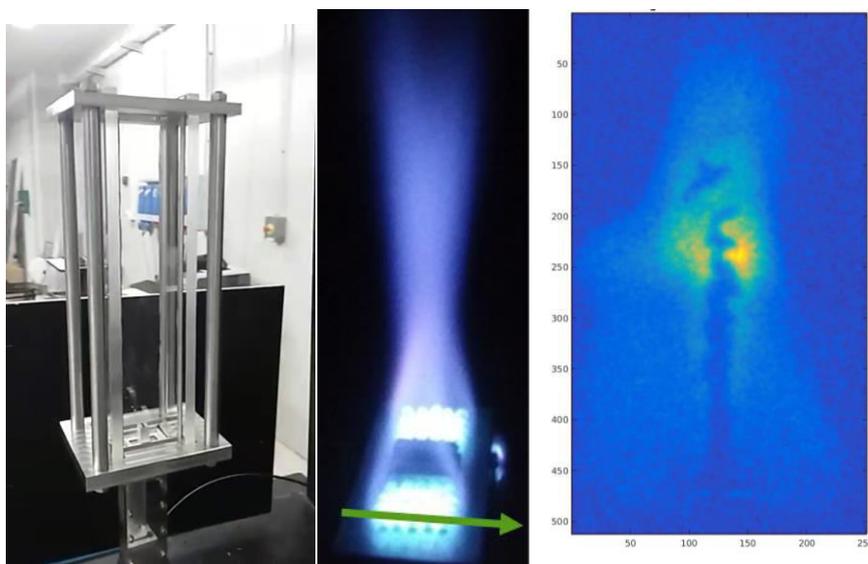
La Laser Induced Fluorescence (LIF) è una tecnica spettroscopica basata sull'eccitazione di una molecola mediante l'utilizzo di una onda elettromagnetica, tipicamente una sorgente laser, la quale, tornando ad uno stato fondamentale a minor energia, emette una radiazione sotto forma di fotoni, detta di fluorescenza. Ogni molecola ha il suo spettro di fluorescenza, per cui una volta stabilita la frequenza di eccitazione e quella di emissione, l'eventuale segnale raccolto dipende esclusivamente dalla presenza della molecola selezionata. Maggiore è l'intensità del segnale emesso, maggiore sarà la concentrazione.

L'emissione di fotoni per fluorescenza non è l'unico meccanismo attraverso il quale la molecola perde energia nel ritornare al suo stato fondamentale. Esistono altri canali di emissione di energia tra cui quelli dovuti agli urti interni alla molecola. Questi canali non emettendo fotoni sono conosciuti col nome di "quenching". A meno di non usare intensità di energia molto alte, al limite degli effetti fotochimici (le molecole possono essere modificate dall'energia dell'onda elettromagnetica incidente), la quota parte di energia persa per *quenching* non è facilmente quantificabile. Si può però affermare che nell'intervallo di temperature che interessano il fronte di fiamma, essa rimane sostanzialmente costante. Questo effetto non permette quindi di ottenere una misura di concentrazione assoluta, ma solo relativa, sufficiente comunque per la determinazione della posizione del fronte di fiamma (basato sui gradienti di concentrazione piuttosto che sul suo valore assoluto).

La Figura 3 mostra il bruciatore una volta accesa la miscela reagente. Si tratta di una miscela stechiometrica ad un Reynolds pari a 4000.

Nel pannello centrale si può notare la posizione media della fiamma evidenziata dal suo colore blu-viola e le due fiamme pilota ai lati. Ciò determina l'ancoraggio della fiamma principale alla base del canale di uscita. Senza l'ausilio delle fiamme pilota, la fiamma principale sarebbe stata disancorata a causa della velocità elevata del getto. La freccia verde indica la direzione dell'ascissa longitudinale con origine nella mezzeria della sezione di uscita del getto.

Il pannello di destra invece, mostra un'immagine istantanea della fluorescenza del radicale OH ottenuta con la tecnica LIF (Laser Induced Fluorescence). Il segnale luminoso è proporzionale alla concentrazione relativa del radicale OH. I valori più bassi di concentrazione di OH si hanno in corrispondenza della miscela reagente fredda. Il forte gradiente di concentrazione indica la posizione del fronte di fiamma.



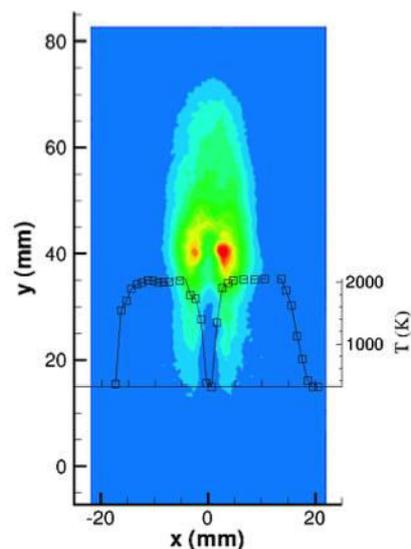
**Figura 3 Sinistra: vista del bruciatore confinato con le finestre in quarzo. Centro: Immagine del bruciatore acceso ad un Reynolds pari a 4000. La miscela è di tipo stechiometrico. Si possono notare le due fiamme pilota che hanno il duplice scopo di tenere ancorata la fiamma ed arricchire l'atmosfera di CO<sub>2</sub>. La freccia verde indica la direzione dell'ascissa longitudinale utilizzata nel seguito del testo. Nella foto di destra, invece, è visibile la struttura del fronte di fiamma attraverso la visualizzazione della concentrazione del radicale OH (OH-LIF).**

### 1.3 Misure di temperatura (CARS)

Il CARS, acronimo per Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy è una tecnica spettroscopica di tipo non lineare (ovvero, richiede l'impiego di tre fasci laser) appartenente alla famiglia di spettroscopie basate sull'effetto Raman. Viene utilizzata in combustione soprattutto per la misura della temperatura di gas reagenti e in alcuni casi per la misura di specie chimiche. In particolare, la tecnica convenzionale si basa sull'acquisizione di spettri (curve di intensità di segnale al variare della lunghezza d'onda elettromagnetica del segnale) caratteristici di una specifica molecola. In combustione, la molecola CARS di riferimento è l'azoto quando è presente dell'aria come comburente, ma in assenza di azoto, altre molecole possono essere scelte (ad es. ossigeno, idrogeno). Gli spettri CARS molecolari sono in corrispondenza biunivoca con la temperatura della miscela di gas per cui dalla forma spettrale è possibile estrarre l'informazione termometrica.

In una molecola i modi vibrazionali attivi per effetto Raman possono essere descritti dal modello di

oscillatore armonico smorzato la cui frequenza caratteristica è  $\omega_v$ . Nel CARS l'utilizzo contemporaneo di tre fasci laser fa sì che la molecola in esame e quindi l'oscillatore con frequenza propria  $\omega_v$  non sia stimolato da una singola onda elettromagnetica ma da una differenza tra i fasci di *pompa* e di Stokes ( $\omega_p - \omega_s$ ). Quando la differenza di frequenza ( $\omega_p - \omega_s$ ) è molto vicina a  $\omega_v$ , l'oscillatore è sottoposto a seguire in fase la forzante generata dai campi elettrici incidenti di pompa e Stokes. A questo punto la nuvola elettronica che circonda la molecola oscilla con frequenza ( $\omega_p - \omega_s$ ) e se sondata con un terzo fascio laser a frequenza  $\omega_{pr}$  (*probe*) sarà possibile registrare l'emissione di un raggio a frequenza ( $\omega_{pr} + \omega_p - \omega_s$ ) che rappresenta proprio l'emissione anti-Stokes. Generalmente i raggi di pompa e probe sono generati da un laser a banda stretta mentre quello di Stokes è a banda larga. Nel nostro caso i fasci di pompa e probe sono generati da un solo laser Nd:YAG che emette a 532 nm mentre il fascio Stokes è generato da un laser a coloranti eccitato dallo stesso Nd:YAG.



**Figura 4 Distribuzione di temperatura sovrapposta alla distribuzione media della concentrazione del radicale OH.**

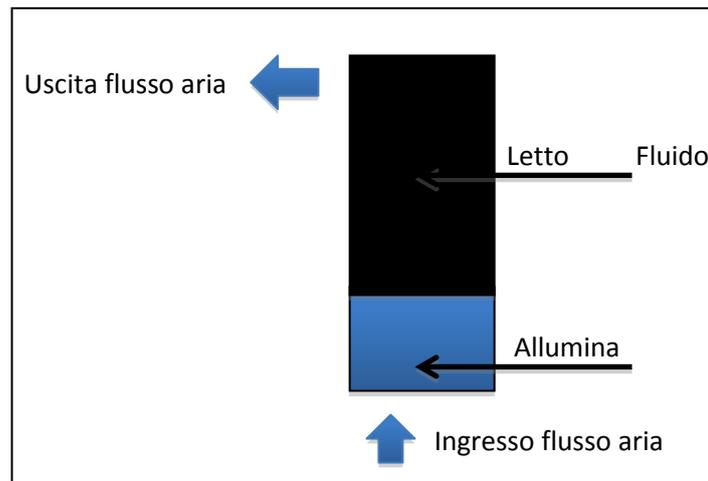
Nella Figura 4 è visibile la distribuzione della temperatura in una sezione trasversale ad una altezza di 15 mm dall'uscita del bruciatore. La distribuzione di temperatura è sovrapposta a quella media del radicale OH che ben rappresenta la posizione media della fiamma. Le temperature vanno da un minimo di 300 K che rappresentano una zona di minima concentrazione di OH e quindi presenza di reagenti freschi e ancora incombusti, fino a valori pari a 2158 K nella zona dei prodotti di combustione e di fiamma.

Si può notare come la distribuzione del radicale OH non arrivi fino all'uscita del bruciatore. Ciò è da attribuirsi all'assenza di fiamma all'uscita del bruciatore. In altre parole le fiamme pilota riescono a mantenere la fiamma principale in uno stato di "lift-off" cioè non ancorata all'uscita del bruciatore, ma fluttuante stabilmente ad una altezza di circa 15 mm. Questo è dovuto all'assenza della sezione in quarzo della camera di combustione, per cui la fiamma brucia in un'atmosfera non confinata. La focalizzazione dei raggi laser in prossimità del volume di misura è talmente concentrata spazialmente da innalzare la densità di potenza dei raggi ad un livello sufficiente a fondere il quarzo. Le misure pertanto sono state eseguite senza la sezione di quarzo. Questo ha leggermente modificato il punto di ancoraggio della fiamma.

#### 1.4 Analisi di fattibilità per l'utilizzo di una camera di combustione ristretta

In questa sezione si affronta il problema di reintrodurre l'utilizzo della camera di combustione originaria, quella di ristrette dimensioni.

Nelle sezioni precedenti lo studio termo-fluidodinamico della fiamma è stato effettuato con una camera di combustione di volume maggiore con lo scopo di ridurre la deposizione delle particelle di allumina sulle pareti interne della camera in quarzo e rendere possibili le misure di velocità con la tecnica PIV, necessarie a fornire indicazioni quantitative al gruppo di ricerca che si occupa della simulazione numerica del bruciatore. La tecnica numerica utilizzata è quella della Large Eddy Simulation (LES, in cui le scale spaziali del flusso simulato vengono risolte parzialmente, mentre quelle più fini sono descritte da opportuni modelli cosiddetti di *chiusura*) capace di simulare in maniera non stazionaria configurazioni di grandi dimensioni con un costo computazionale accettabile.



**Figura 5** Disegno schema iniettore flusso aria

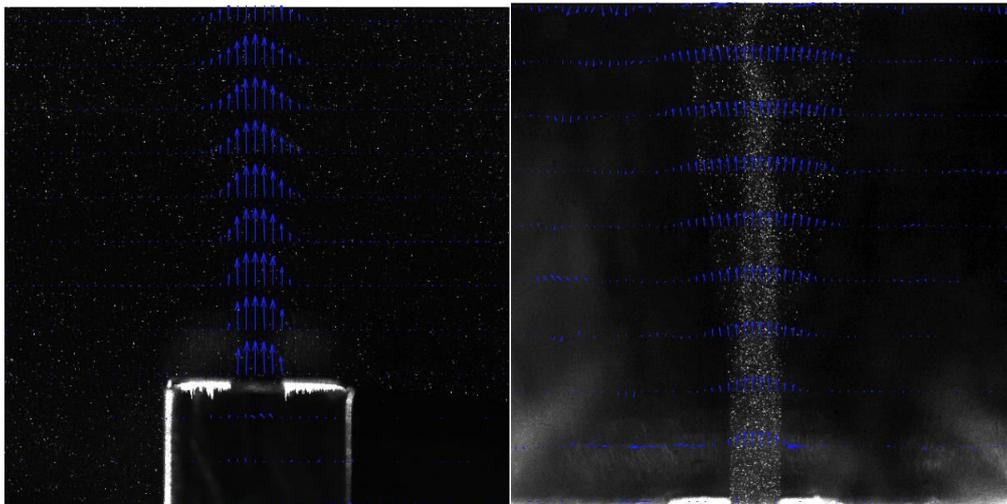
Nel tentativo di rendere possibile l'utilizzo di una camera di combustione di minori dimensioni, simulabile con una Simulazione Numerica Diretta (in modo da ottenere tutti i dettagli del flusso simulato, fino alle scale spaziali minori senza l'ausilio di modelli di *chiusura*), si è deciso di modificare il dispositivo che garantisce la dispersione, nel flusso d'aria principale, delle particelle traccianti di allumina per la misura del campo di velocità con la tecnica PIV.

Il dispositivo di iniezione può essere schematizzato come un letto fluido, vedi riferimenti nella Figura 5, in cui il flusso di aria comburente crea una sospensione omogenea di particelle di allumina (delle dimensioni di circa 3 micron) che poi viene inviata al bruciatore. La sospensione di particelle avviene solo al di sopra di certe portate, quindi esiste un limite minimo della quantità di particelle poste in sospensione nell'iniettore. Lo scopo è finale è quello di diminuire tale limite per evitare la deposizione di materiale sulle pareti del bruciatore.

Con l'aiuto del personale dell'Università di Roma 3 il dispositivo per la dispersione delle particelle traccianti di allumina è stato modificato. La modifica principale consiste nell'aver posto il dispositivo sopra un apposito piatto vibrante in modo da ottenere la fluidizzazione delle particelle anche per portate modeste d'aria.

Inoltre l'utilizzo di una valvola a tre vie di ricircolo ha permesso, una volta fissata la portata in massa del comburente, di parzializzare la quantità di allumina immessa nel flusso.

E' stato quindi possibile reintrodurre nel dispositivo le finestre in quarzo originali senza che vi fosse deposizione di allumina sulle pareti.



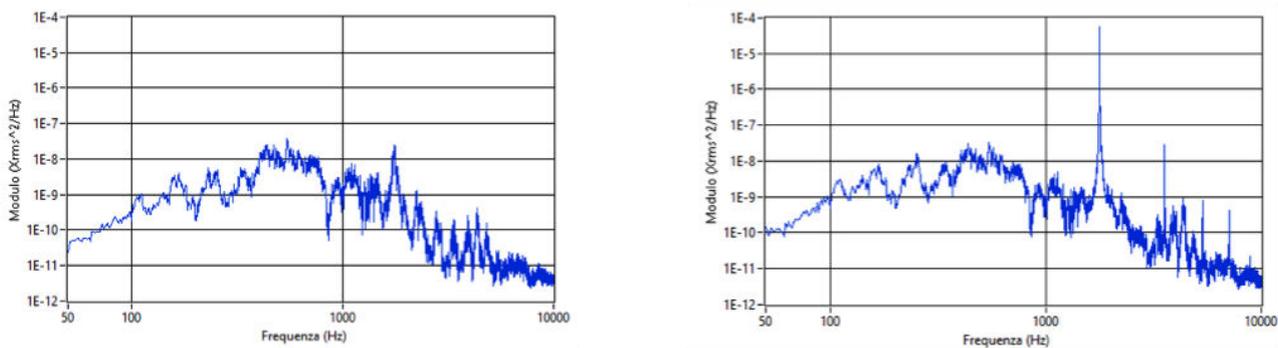
**Figura 6** Finestra in quarzo di ridotte dimensioni. Sinistra, esempio di immagine *Mie scattering* con sovrapposizione del campo vettoriale di velocità. Portata di miscela reagente non ignita di 60 l/min ( $Re=12000$ ). Destra, Finestra in quarzo di ridotte dimensioni. Esempio di immagine *Mie scattering* con sovrapposizione del campo vettoriale di velocità. L'adesione delle particelle alle pareti interne del quarzo è stata risolta con una migliore gestione della quantità di insemillante.  $Re=2000$  stechiometrico, miscela ignita (presenza di fiamma) 10 l/min.

Nella Figura 6 è riportata, nel pannello sinistro, l'immagine del bruciatore con una sospensione ottimale di particelle traccianti. Le particelle sono illuminate dal fascio laser e diffondono radiazione elettromagnetica (luce) sulla stessa lunghezza d'onda a causa del fenomeno chiamato *scattering di Mie*. Sovrapposta all'immagine il campo vettoriale di velocità ben risolto ovunque ci sia presenza di particelle. Nel pannello di destra, un esempio della stessa configurazione in condizioni reagenti, con presenza di fiamma. E' evidente il salto di densità dovuto alla presenza del fronte di fiamma che separa zone fredde (incombusti) ad alta densità da zone calde (prodotti di combustione) a bassa densità. Il rapporto tra le due densità è di circa 1:6 e risulta evidente dalla differente intensità luminosa resa dalle particelle. Maggiore densità, corrente fredda, massima illuminazione contro bassa densità, corrente calda e minima illuminazione.

## 1.5 Misure di pressione

Sempre di concerto con il personale del DING si è effettuata una campagna di misure delle fluttuazioni di pressione generate dal bruciatore in entrambe le configurazioni: camera di combustione di grandi e piccole dimensioni, rispettivamente.

Riguardo la prima configurazione (camera di dimensioni maggiori), l'analisi con microfoni ha rilevato assenza di tonali specifiche e quindi di regime di "combustion instability". Lo spettro del livello di pressione sonora riportato in Figura 7, pannello di sinistra, evidenzia una distribuzione dell'energia sonora su un ampio intervallo di frequenze. Le motivazioni risiedono nel fatto che il combustore è stato progettato per non avere, a freddo (senza la presenza di fiamma), tonali specifiche che avrebbero potuto influire sull'efficienza della linea di alimentazione e determinare così una portata in massa fluttuante. La situazione cambia radicalmente qualora si inserisca la camera in quarzo di volume ridotto. Si vengono a creare in questo modo due volumi molto piccoli in corrispondenza delle due fiamme pilota che, per alcune portate specifiche di miscela reagente, presentano un picco nell'emissività acustica centrato intorno ai 2 KHz, come si può notare dal pannello di destra della Figura 7.

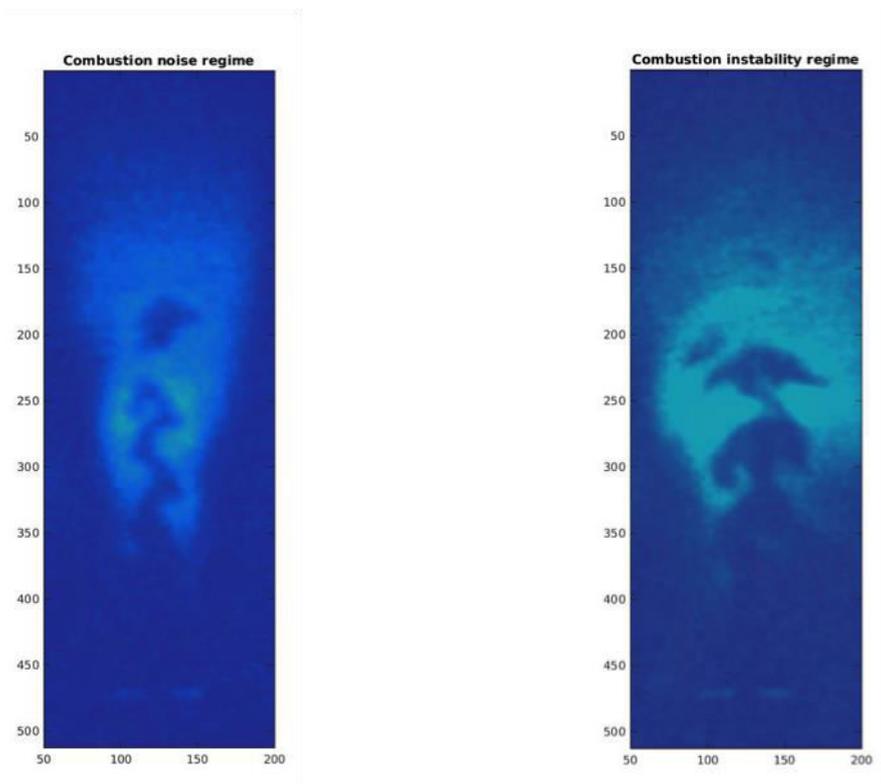


**Figura 7 Spettri pressione sonora. Sinistra, bruciatore con volume grande della camera di combustione. Si evidenzia una distribuzione a banda larga delle fluttuazioni e l'assenza di tonali. Destra, bruciatore con camera di combustione piccola. E' evidente la focalizzazione dell'energia intorno ad un picco ben distinto.**

Questa situazione sembra forzare l'intera fiamma ad oscillare in maniera diversa rispetto al caso di solo "combustion noise".

La transizione da un regime di *combustion noise* ad uno di instabilità termoacustica è stato ottenuto modificando la portata di miscela della sola fiamma pilota.

Immagini LIF del radicale OH evidenziano la differente struttura topologica del fronte di fiamma nelle diverse condizioni.



**Figura 8 Laser Induced Fluorescence (LIF) del radicale OH per evidenziare la posizione del fronte di fiamma. Sinistra, regime di "combustion noise". Destra, regime di "combustion instability".**

Nel pannello di sinistra della Figura 8 il fronte di fiamma istantaneo in regime di "combustion noise", individuato dal forte gradiente di concentrazione del radicale OH, risulta caratterizzato da una oscillazione asimmetrica probabilmente forzata da una instabilità di Kelvin Helmholtz con strutture vorticosi rilasciate a destra e sinistra del getto in modo alternato. Nel caso di "combustion instability", quando cioè esiste una forzante di tipo tonale, il pannello di destra evidenzia una situazione mutata con un rilascio di strutture

vorticoso simmetriche tipiche anche degli effetti di galleggiamento, che comunque sono da escludersi visto la notevole velocità di efflusso del getto. Sono quindi da ritenersi effetti dovuti alla forzante acustica, la quale sarà oggetto di studio approfondito nella prossima annualità del progetto.

Nel prossimo paragrafo si descriveranno brevemente i risultati preliminari ottenuti dall'analisi caotica per il sistema con camera di combustione di ridotte dimensioni nei due regimi di funzionamento: stabile e instabile.

## 1.6 Analisi caotica

Analisi tipiche dello studio dei sistemi caotici sono state implementate dal personale del DING.

Con la finalità di identificare dal punto di vista statistico l'intermittenza delle fluttuazioni di pressione generate dalla combustione, è stato applicato un metodo di auto-condizionamento dei segnali basato sulla trasformata *wavelet* (tecnica in cui il personale del DING e in particolare il Prof. Camussi e il Dott. Pagliaroli sono ormai esperti riconosciuti in ambito internazionale). L'identificazione delle strutture intermittenze è basata sull'idea che il passaggio di tali strutture coerenti ad una certa scala caratteristica  $r$  (in questo caso la scala  $r$  è una scala temporale) e ad un istante  $t$  induca un incremento dell'energia associata a quella scala. Il metodo di auto-condizionamento permette di ottenere la firma media associata agli eventi ad alta coerenza ed energia.

In questa sezione viene descritta l'analisi dei dati relativa ai segnali di pressione ed energia radiante per il caso con camera in quarzo di ridotte dimensioni, per la quale sono stati individuati due regimi di funzionamento: uno stabile (detto di *combustion noise*) e l'altro instabile. Dell'intero database acquisito l'attenzione è stata focalizzata su due sole condizioni:

- Condizione di risonanza termoacustica del bruciatore
- Condizione stabile di *combustion noise*

Nella condizione di risonanza termoacustica, si è osservato un accoppiamento tra fluttuazione di pressione e processo di combustione. Per completezza di seguito si riportano i campi medi di concentrazione del radicale OH misurati nei due casi in esame.

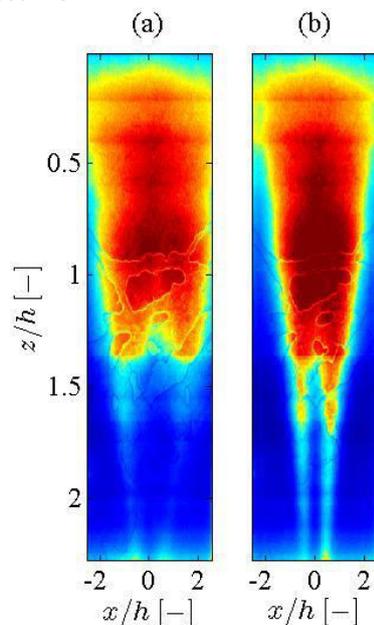
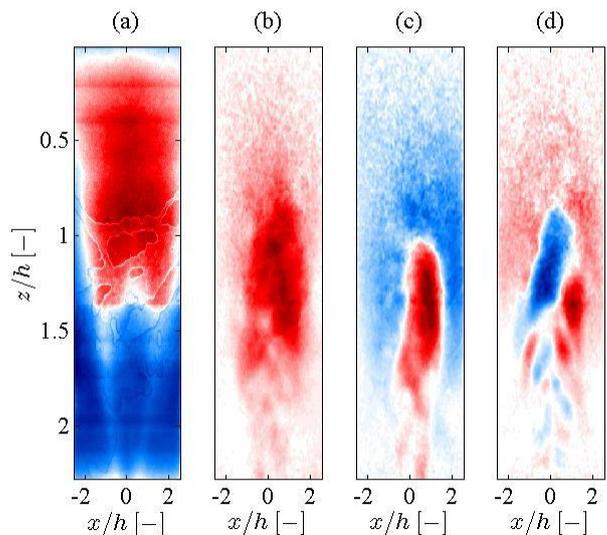
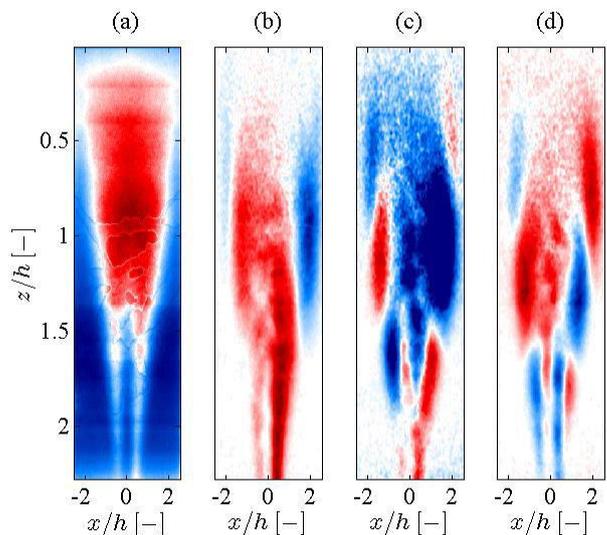


Figura 9 campo medio di concentrazione del OH nel caso di risonanza del bruciatore (a) e nel caso di combustione stabile (b).

Con la finalità di approfondire maggiormente quest’ultimo aspetto è stata applicata una tecnica di analisi chiamata proper orthogonal decomposition (POD) ai campi OH. La tecnica permette di decomporre le realizzazioni istantanee in modi propri. Tipicamente i modi più energetici sono rappresentativi di dinamiche coerenti di larga scala. In Figura 10 è mostrato il campo medio di concentrazione del OH e i primi tre modi calcolati nel caso in cui è presente la risonanza acustica del bruciatore. La Figura 11 invece si riferisce al caso in cui la combustione risulta stabile. Confrontando i risultati ottenuti nei due casi risulta evidente che si ha un accoppiamento della dinamica del radicale OH e le fluttuazioni di pressione, i modi fondamentali infatti sono notevolmente diversi in termini di morfologia. Quest’ultima caratteristica è un chiaro indicatore di dinamiche differenti.



**Figura 10 Campo medio di concentrazione dello OH e i primi tre modi POD calcolati nel caso in cui sia presente la risonanza acustica del bruciatore.**



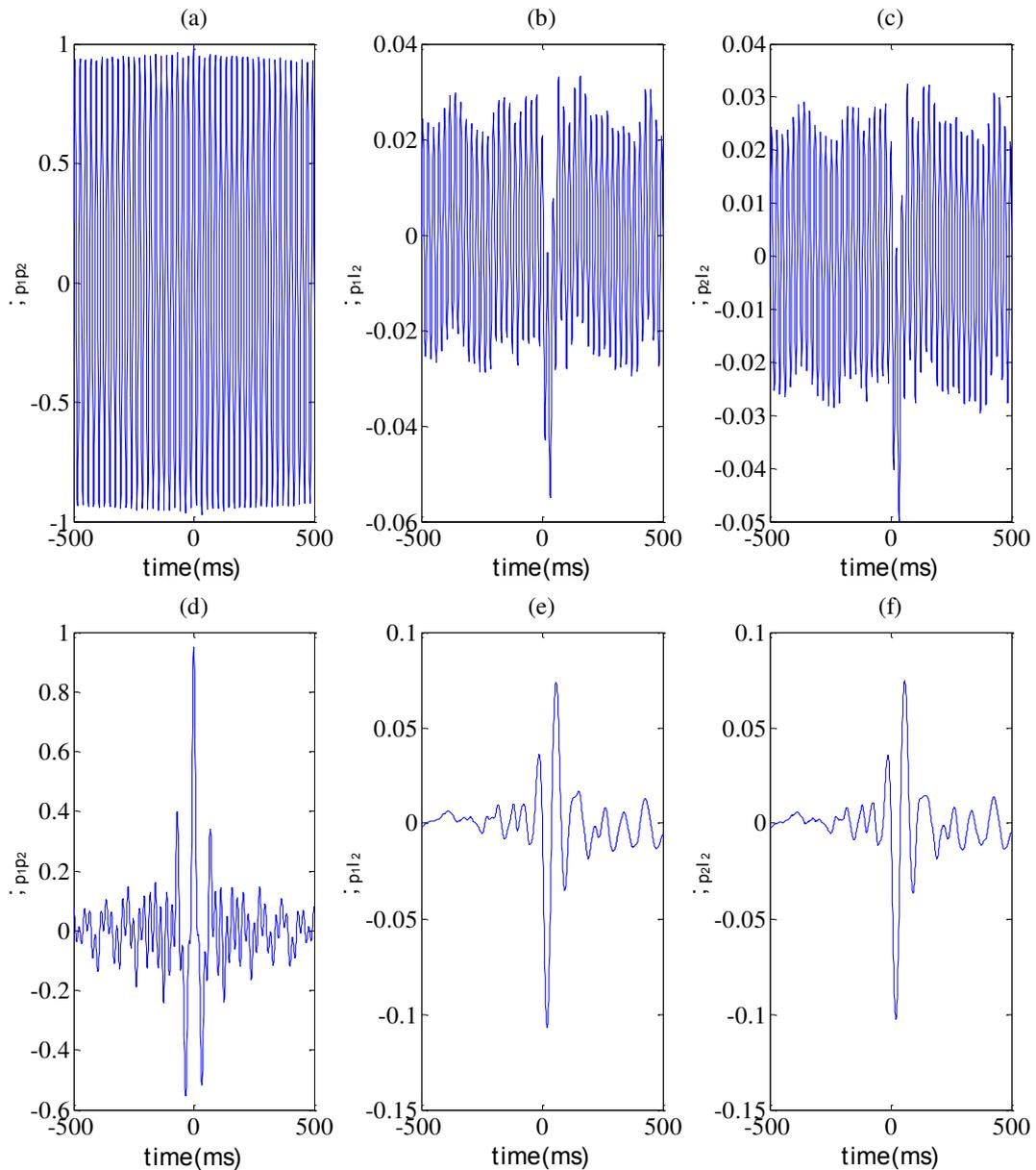
**Figura 11 Campo medio di concentrazione dello OH e i primi tre modi POD calcolati nel caso di assenza di risonanza acustica.**

In Figura 9 si può osservare che la condizione di risonanza è caratterizzata da una fiamma in condizione di lift-off (non connessa con l’uscita del bruciatore) con una zona di reazione maggiormente estesa (v. Figura 9 a) rispetto alla condizione stabile (v. Figura 9 b). Nelle due condizioni sono state acquisite le fluttuazioni di pressione con una coppia di microfoni posti in prossimità dell’uscita della camera di combustione e un

sistema ODC a due canali per la misura dell'energia radiante emessa per chemiluminescenza dalla fiamma. I valori delle funzioni di cross-correlazioni tra i segnali acquisiti, riportate in Figura 12, mostrano le seguenti caratteristiche:

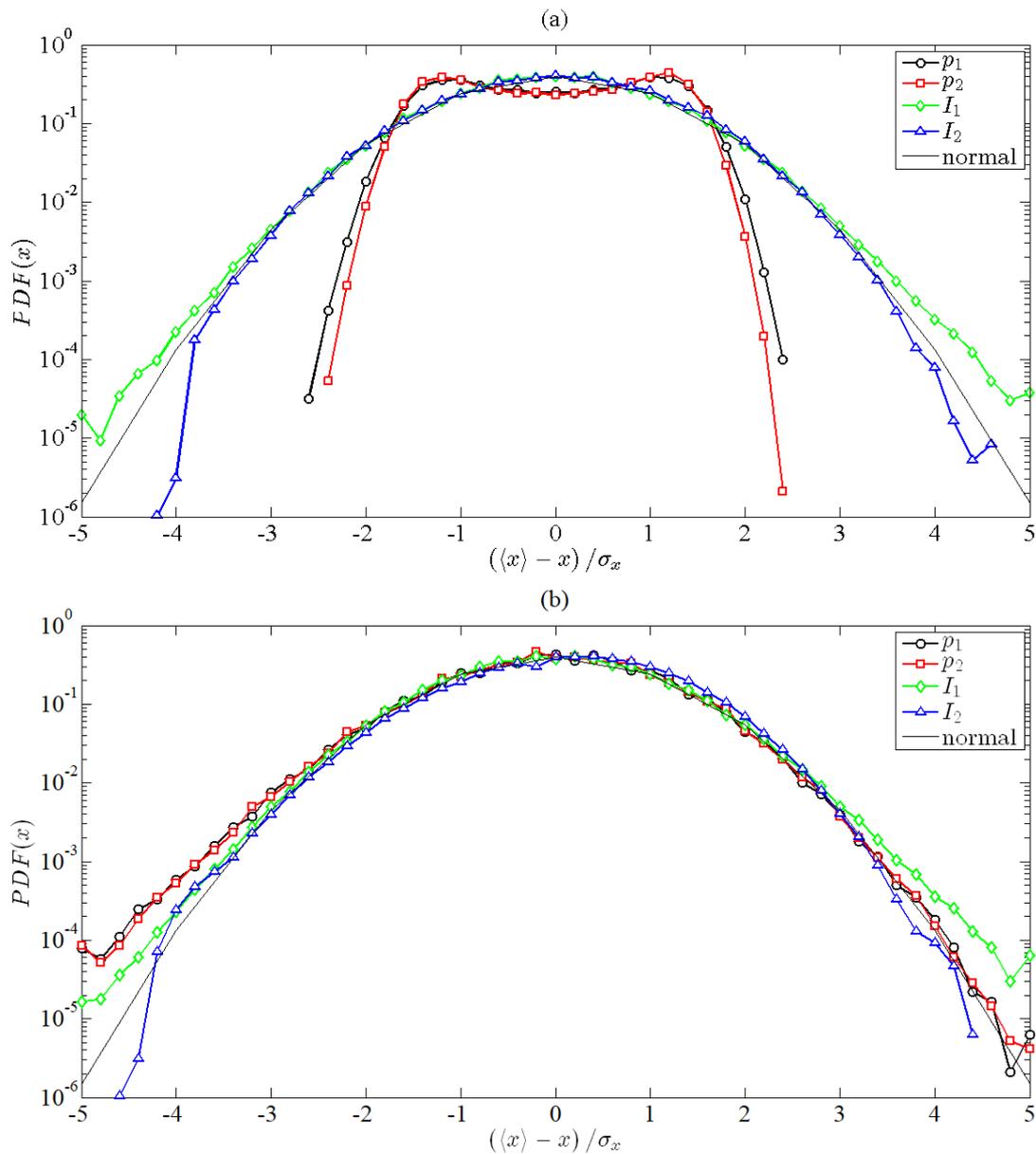
- I microfoni 1 e 2 hanno un valore del coefficiente di cross-correlazione prossimo a 1 nei due casi studio (pannelli a, d).
- In condizione di risonanza il coefficiente di cross-correlazione tra energia radiante e ODC assume un valore trascurabile(pannelli b, c).
- In condizione di combustione stabile il coefficiente di cross-correlazione tra energia radiante e ODC assume un valore significativo (pannelli e, f).

Da questa analisi preliminare segue che l'attenzione può essere concentrata solo su uno dei due microfoni e che siamo in una condizione di accoppiamento acustica-combustione di tipo anomalo in quanto i due segnali: energia radiante e fluttuazioni di pressione non sono correlati come mostrato in Figura 12 (b e c).



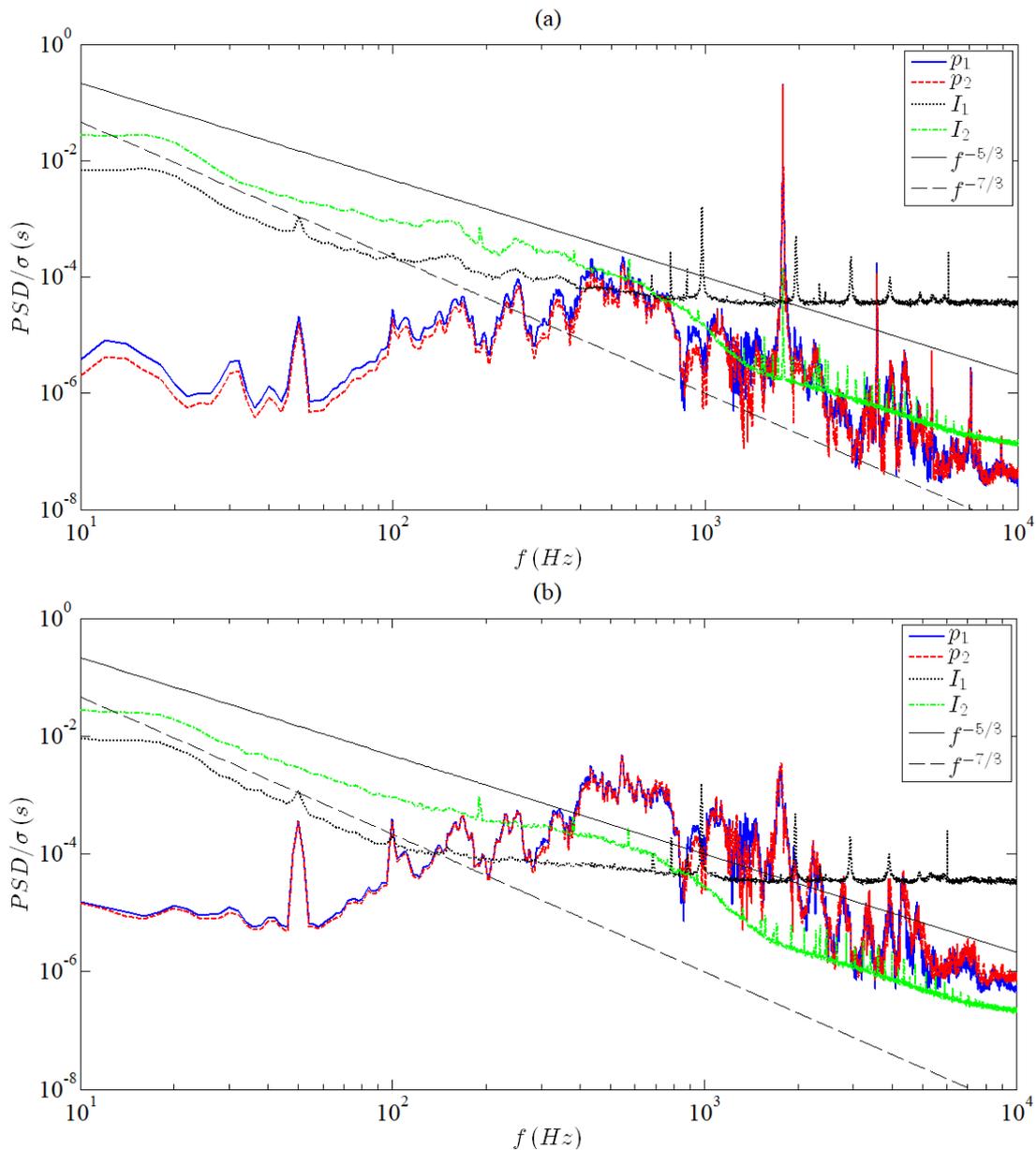
**Figura 12** cross-correlazione tra i segnali di fluttuazione di pressione acquisiti dai due microfoni ( $p_1$  e  $p_2$ ) e il segnale di emissione luminosa spontanea campionato dall'ODC ( $l_2$ ). Cross-correlazioni calcolate nelle due condizioni: condizione di risonanza del bruciatore (a, b, c) e condizione stabile (d, e, f).

In Figura 13 viene mostrato un confronto tra la distribuzione di probabilità (Probability Density Function, PDF) dei segnali nelle due condizioni. Si nota in Figura 13 come le fluttuazioni di pressione abbiano una PDF di tipo bimodale (doppio picco distinto, linee rossa e nera), tipica delle condizioni di risonanza, mentre quella riferita all'energia radiante sia di tipo gaussiano e non bimodale, ad indicare l'assenza di un accoppiamento. Coerentemente, per il regime di combustione stabile, tutte le PDF di tutti i tipi di segnali (pressione sonora ed energia radiante) non sono di tipo bimodale. E' interessante notare uno scostamento dalla gaussiana di riferimento (linea nera) per gli eventi negativi più rari (oltre le 3-sigma), come traccia di eventi energetici di tipo intermittente, la cui natura sarà discussa nel seguito.



**Figura 13** Probability Density Dunction (PDF) calcolate per i segnali di fluttuazione di pressione acquisiti dai due microfoni ( $p_1$  e  $p_2$ ) e il segnale di emissione luminosa spontanea campionato dall'ODC ( $I_2$ ). PDF calcolata nelle due condizioni: condizione di risonanza del bruciatore (a) e condizione stabile (b).

Nel caso risonante, l'analisi spettrale, i cui risultati sono osservabili in Figura 14 a, mostra un significativo accoppiamento. Infatti, per una frequenza poco inferiore a 2 kHz si osserva che tutti i segnali mostrano una componente armonica. Nel caso dei microfoni, la componente armonica è dominante mentre per l'ODC a dominare è un *hump* a bassa frequenza e a largo spettro (compreso in un intervallo di frequenze tra 100 e 1000 Hz) rispetto al picco di energia centrato sui 2 kHz. Per questa ragione si può dedurre che l'accoppiamento esista nel dominio di Fourier, ma non sia molto forte.



**Figura 14 Power Spectral Density normalizzata (PSD) calcolate per i segnali di fluttuazione di pressione acquisiti dai due microfoni ( $p_1$  e  $p_2$ ) e il segnale di emissione luminosa spontanea campionato dall'ODC ( $I_2$ ). PSD calcolate nelle due condizioni: condizione di risonanza del bruciatore (a) e condizione stabile (b).**

A valle della pre-qualificazione dei segnali mediante tecniche di analisi classiche è stata eseguita un'analisi caotica dei segnali. In particolare:

- *Denosing* (apposito filtro basato sulla media mobile) del segnale (Figura 15 a)
- Calcolo dell'autocorrelazione e della macroscala temporale (Figura 15 b)
- Calcolo della dimensione di incorporamento dell'attrattore attraverso la procedura dei falsi vicini (Figura 15 d)
- Calcolo della divergenza delle traiettorie nello spazio delle pseudo fasi in scala logaritmica (Figura 15 e)
- Calcolo dell'attrattore nello spazio delle pseudo fasi (Figura 15 c, f)

La procedura descritta è stata seguita sia nel caso di combustione in condizione di risonanza (v. Figura 15) che nel caso di combustione stabile (v. Figura 16).

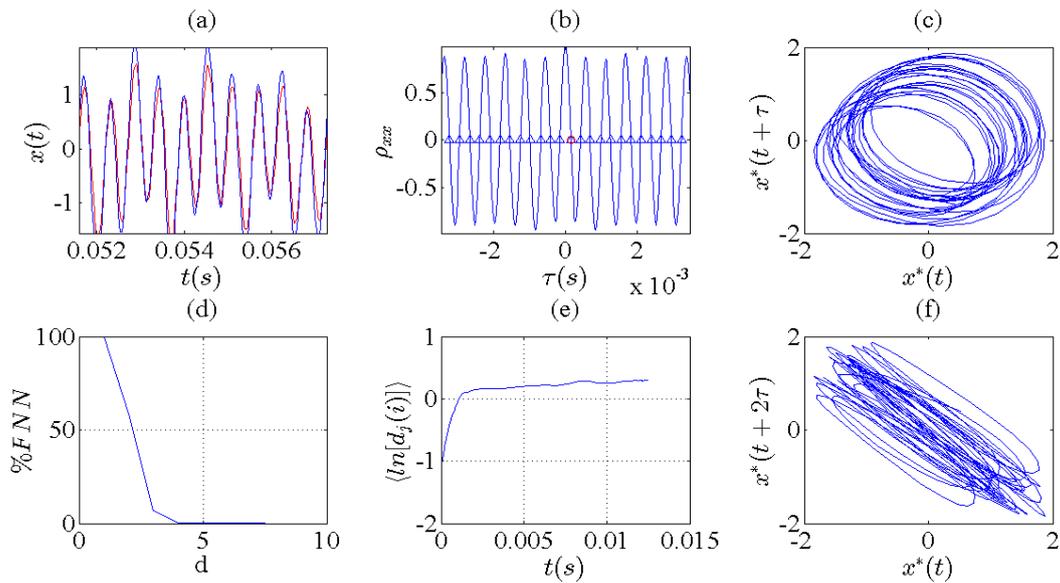


Figura 15 segnale di pressione analizzato (a), autocorrelazione del segnale e calcolo del primo attraversamento dell'asse temporale dei ritardi (b); sezione di Poincaré nel piano delle pseudo-fasi (c); percentuale dei falsi vicini calcolata per diverse dimensioni d'incorporamento (d); evoluzione temporale della divergenza logaritmica delle traiettorie (e); altra sezione di Poincaré nel piano delle pseudo-fasi (f). I grafici sono stati ottenuti per il caso in condizione di risonanza.

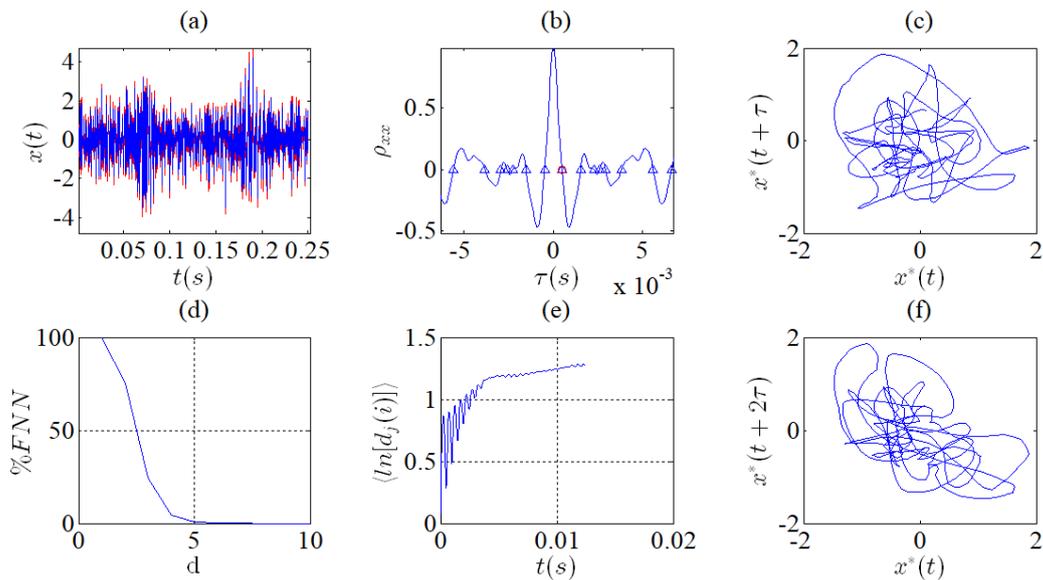


Figura 16 segnale di pressione analizzato (a), autocorrelazione del segnale e calcolo del primo attraversamento dell'asse temporale dei ritardi (b); sezione di Poincaré nel piano delle pseudo-fasi (c); percentuale d ei falsi vicini calcolata per diverse dimensioni d'incorporamento (d); evoluzione temporale della divergenza logaritmica delle traiettorie (e); altra sezione di Poincaré nel piano delle pseudo-fasi (f). I grafici sono stati ottenuti per il caso in condizione stabile.

In Figura 17 è stato inserito un confronto tra i risultati ottenuti mediante analisi caotica. La pendenza del tratto lineare della divergenza delle traiettorie nello spazio delle pseudo fasi in scala logaritmica, mostrato in Figura 17 a equivale al valore del massimo esponente di Lyapunov che caratterizza l'evoluzione del sistema preso in esame. Si nota che nei due casi il coefficiente angolare del tratto rettilineo e quindi

l'esponente, non è soggetto a importanti variazioni; ciò ad indicare che la natura caotica del fenomeno non è variata da una condizione all'altra. Lo stesso risultato si ottiene per la dimensione d'incorporamento dell'attrattore, che dalla Figura 17 b si evince essere pari a 5 in entrambi i casi. La morfologia degli attrattori nello spazio delle pseudofasi è diversa (v. Figura 17 c): nel caso in risonanza l'attrattore è di tipo circolare (linea rossa), un toro  $T^1$ , mentre nel caso stabile (linea blu) l'attrattore risulta essere "strano". L'attrattore è definito "strano" nel momento in cui la sua misura (misura di Hausdorff) è di tipo "frattale", cioè non intera .

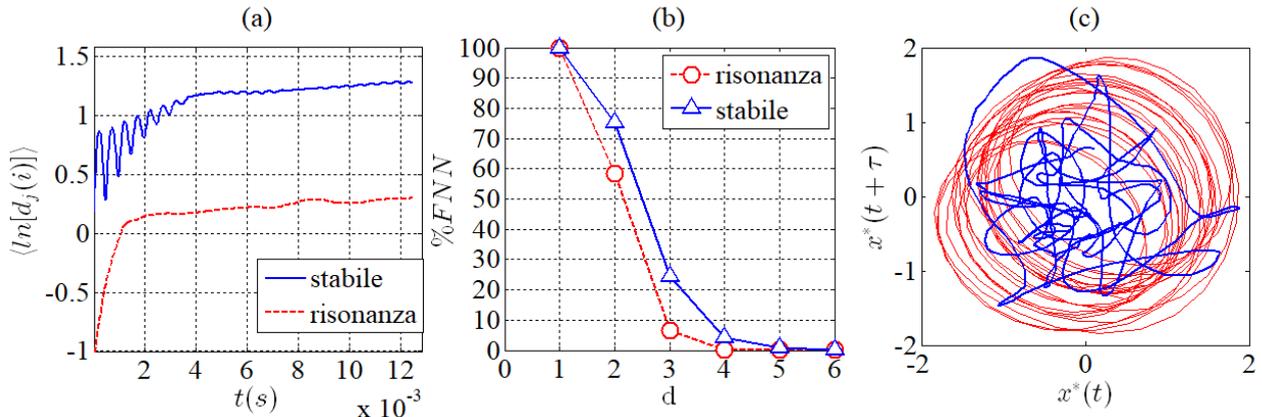


Figura 17 confronto dei risultati ottenuti mediante analisi caotica: deviazione delle traiettorie (a), percentuale dei falsi vicini in funzione della dimensione d'incorporamento (b), attrattori in una sezione dello spazio delle pseudofasi (c).

Infine sono state calcolate le mappe di ricorrenza nei due casi.

Le mappe di ricorrenza sono uno strumento statistico utile per qualificare e quantificare la ricorrenza delle traiettorie che descrivono l'evoluzione del sistema nello spazio delle fasi.

Nel caso instabile la mappa di ricorrenza presenta una struttura diagonale canonica per questo tipo di condizione come si può vedere in Figura 18 a. Ciò sta a indicare una evoluzione ciclica del sistema, tipica dei sistemi in instabilità conclamata, in cui è predominante una forzante armonica ben precisa, come evidenziato dall'analisi spettrale in cui si evidenzia la presenza di picchi di energia concentrati attorno ad una specifica frequenza. La distanza temporale tra una diagonale e l'altra corrisponde alla frequenza di oscillazione del sistema. Nel caso di combustione stabile la mappa presenta delle isole di segmenti diagonali al di fuori della diagonale principale che congiungono zone con una distribuzione caotica delle ricorrenze. Questa distribuzione è invece tipica di un sistema che oscilla tra due distinti stati, uno caotico e l'altro ordinato, impulsivo e a maggior contenuto energetico (v. Figura 18 b).

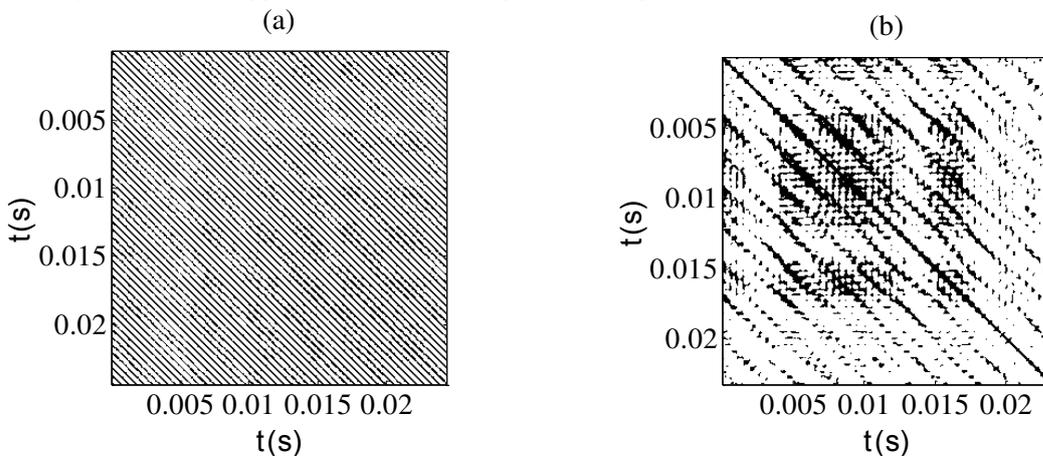


Figura 18 mappe di ricorrenza nel caso instabile (a) e nel caso stabile (b).

Quest'ultimo risultato ci ha spinto ad applicare un auto-condizionamento wavelet sui segnali mediante metodo del LIM.

## 1.7 Analisi wavelet

Con la finalità di identificare dal punto di vista statistico questi eventi, è stato applicato un metodo di auto-condizionamento dei segnali (LIM, Local Intermittency Measure), basato sulla trasformata wavelet che permette l'identificazione delle strutture coerenti ad alta energia nei segnali mediante una rappresentazione tempo-frequenza.

La trasformata wavelet è ottenuta mediante proiezione del segnale su una base compatta,  $\Psi(t)$ , localizzata nel tempo. Formalmente la trasformata di un segnale di fluttuazione di pressione  $p'(t)$  alla scala  $r$  è data dalla seguente espressione.

$$w(r,t) = C_{\Psi}^{-1/2} r^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^* \left( \frac{t-\tau}{r} \right) p(\tau) d\tau$$

Dove  $C_{\Psi}$  è un coefficiente legato al valore medio  $\langle \Psi^2(t) \rangle$ .

Il metodo d'identificazione degli eventi impiegato nella presente attività, il LIM, è definito come segue:

$$LIM(r,t) = \frac{w(r,t)^2}{\langle w(r,t)^2 \rangle_t}$$

Dove l'operatore  $\langle \bullet \rangle$  indica una media temporale.

L'identificazione delle strutture coerenti è basata sull'idea che il passaggio di strutture coerenti ad una certa scala caratteristica  $r$  e ad un istante  $t_i$  induca un incremento dell'energia a quella scala. Pertanto, applicando un'opportuna soglia pari a "S" al LIM, al passaggio di una struttura coerente la condizione  $LIM(r,t_i) > S$  sarà verificata. Il metodo di auto-condizionamento permette di ottenere la firma media associata agli eventi ad alta coerenza ed energia, che però non vengono rilevati dalla classica analisi spettrale, vista la loro natura intermittente.

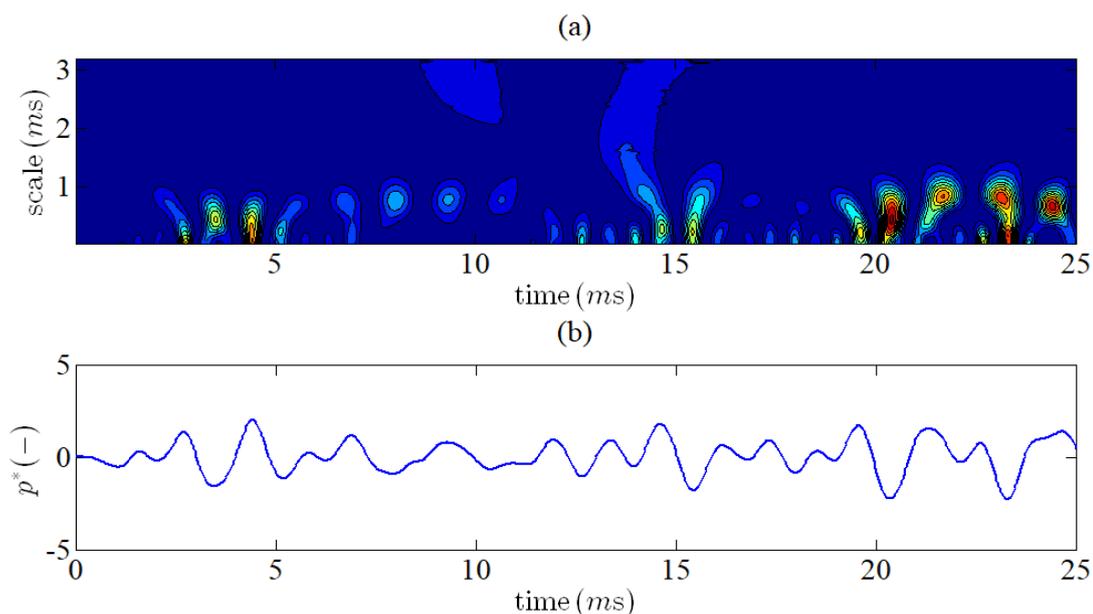
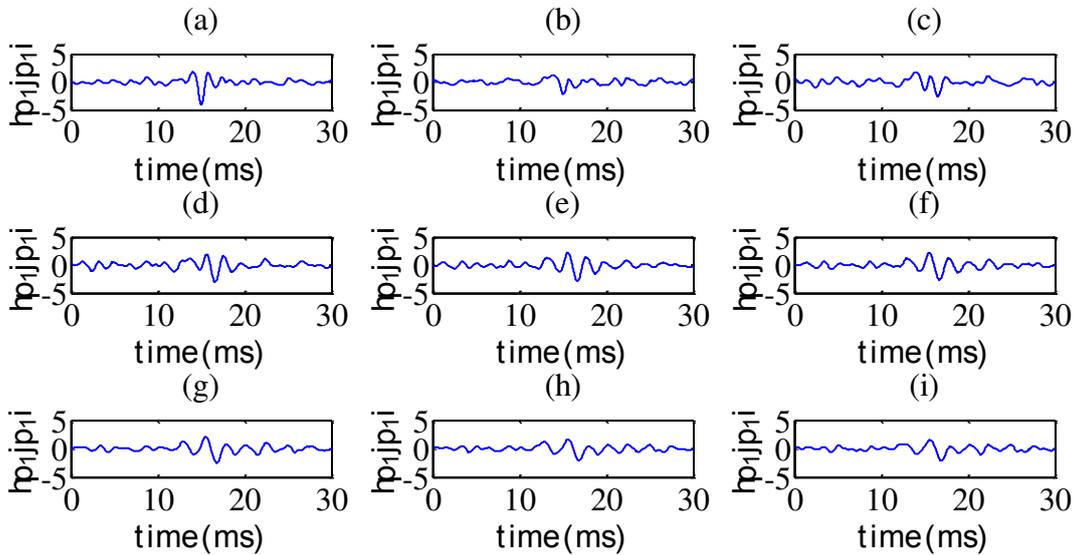


Figura 19 LIM calcolato nel piano tempo-scala temporale (a). Sottoinsieme del segnale di pressione adimensionalizzato sul quale è stato calcolato il LIM.

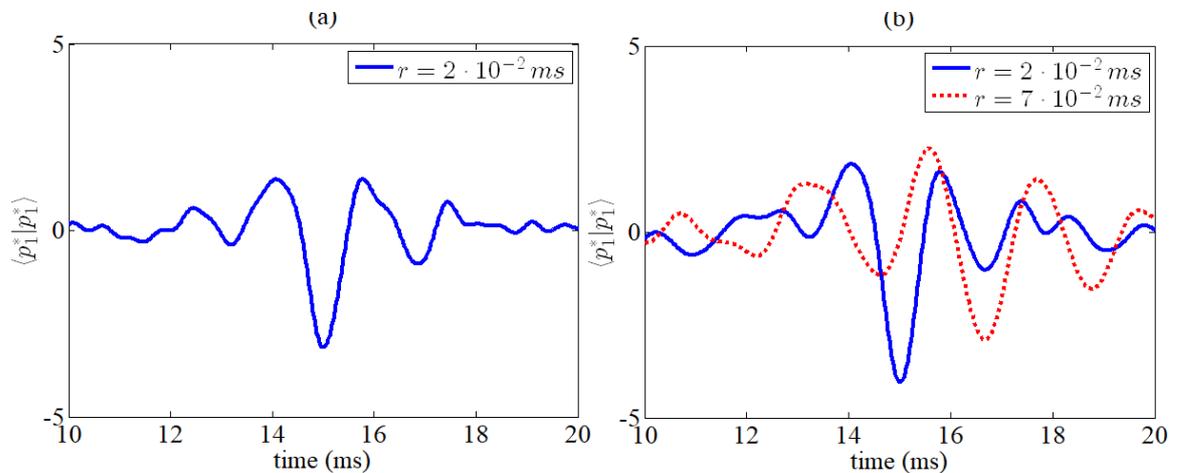
In Figura 19a il LIM calcolato per il segnale presenta numerosi *bump* energetici. Tali *bump* sono indicativi della presenza di eventi energetici coerenti ed intermittenti.

Utilizzando il LIM, il segnale è stato auto-condizionato a diverse scale temporali per ottenere delle medie d'insieme rappresentative, dal punto di vista statistico, delle firme energetiche contenute nel segnale. A titolo di esempio in Figura 20 sono mostrate tutte le firme calcolate in un opportuno intervallo di scale.



**Figura 20** Calcolo del segnale auto-condizionato analizzando il LIM a diverse scale temporali. I risultati sono stati ottenuti incrementando la scala temporale del LIM analizzato da  $2.5 \times 10^{-4}$  s (a) fino a  $2.5 \times 10^{-3}$  s (i) (con passo  $2.5 \times 10^{-4}$  s).

Al termine di questa procedura abbiamo confrontato le firme medie contenute nei segnali di pressione per le due condizioni in studio. I risultati sono stati davvero incoraggianti e d'interesse scientifico non trascurabile. Nel caso instabile la firma media si presenta solo come un drop in pressione (v. Figura 21 a). Tipicamente questi drop sono le tracce dell'idrodinamica ovvero del passaggio di scale fluidodinamiche. Nel caso stabile abbiamo trovato oltre a questi drop (linea blu) dei *wavepacket* (linea rossa tratteggiata, v. Figura 21 b) che riteniamo essere dei fenomeni che guidano la transizione da stabile ad instabile. I *wavepacket* possono essere considerati come un treno d'onda fortemente localizzato dal punto di vista temporale che si ripete uguale a se stesso nel tempo.



**Figura 21** auto-condizionamento wavelet calcolato per i segnali di fluttuazione di pressione acquisiti dal microfono 1 ( $p_1$ ) nelle due condizioni: regime di risonanza del bruciatore (a) e condizione stabile (b).

## 2 Conclusioni

L'analisi svolta sul bruciatore ROMULUS nella configurazione con la finestra in quarzo di grandi dimensioni ha permesso di fornire i dati necessari in termini di campi di velocità, posizione del fronte di fiamma e distribuzione di temperatura per la simulazione numerica dello stesso dispositivo con la tecnica della Large Eddy Simulation.

Inoltre è stata evidenziata l'assenza di regimi di instabilità di combustione del tipo termoacustico.

Un lavoro di messa a punto del sistema di iniezione per le misure di velocità ha permesso inoltre l'utilizzo della camera di combustione originale di ridotte dimensioni.

In questa configurazione sono stati evidenziati due regimi di funzionamento fortemente dipendenti dalla quantità di combustibile che alimenta le fiamme pilota. I due regimi evidenziati sono di tipo stabile e instabile, sempre dal punto di vista termoacustico. La transizione da un regime all'altro interagisce con il processo di combustione come evidenziato dalle analisi spettrali, di concentrazione dei radicali OH, dell'analisi caotica e mediante l'utilizzo della decomposizione wavelet, la quale ha evidenziato la presenza di strutture spazio temporali dette wavepacket.

In particolare, la conclusione di quest'ultima analisi è che i *wavepacket* possano rappresentare dei precursori del fenomeno dell'instabilità termoacustica. Infatti, è plausibile ritenere che tali strutture posseggano l'energia necessaria per accoppiare in fase le fluttuazioni di pressione con il rilascio di calore. Tale condizione è noto essere quella per cui l'instabilità termoacustica si conglomera. Sotto determinate condizioni, la presenza sempre più massiccia di questi precursori è tale da rendere il sistema totalmente instabile.

## 3 Riferimenti bibliografici

1. V. Nair, G. Thampi, R. I. Sujith, "Intermittency route to thermoacoustic instability in turbulent combustors", *Journal of Fluid Mechanics* 756 (2014), p. 470-487.
2. M. Mancinelli, T. Pagliaroli, A. Di Marco, R. Camussi, T. Castelain, "Wavelet decomposition of hydrodynamic and acoustic pressures in the near field of the jet", *Journal of Fluid Mechanics* 813 (2017), p. 716,749.
3. N. Suraj, T. Lieuwen, "Acoustic detection of blowout in premixed flames", *Journal of Propulsion and Power*, 21.1(2005), p. 32-39.
4. 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), p. 1-8.
5. S. Kartheekyan, S. R. Chakravarthy. "An experimental investigation of an acoustically excited laminar premixed flame." *Combustion and flame* 146.3 (2006), p. 513-529.
6. T. Pagliaroli, R. Camussi, A. Di Marco, C. Stringola, E. Giulietti, E. Giacomazzi, "COMBUSTION ACOUSTIC COUPLING IN TRAPPED VORTEX COMBUSTOR", 9th MCS, Rhodes, Greece.
7. T. Pagliaroli, R. Camussi, "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures." *Journal of Sound and Vibration* 341 (2015), p. 116-137.