



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 eccesso di anidride carbonica,

G. Troiani¹, M. Marrocco¹, T. Pagliaroli², R. Camussi³

¹ ENEA, ² Unicusano, Roma, ³ Università Roma TRE

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Tecnologie per l'impiantistica energetica "low carbon".

Progetto: Polo Tecnologico del SULCIS: Tecnologie e Metodologie "Low Carbon" e Edifici ad energia quasi zero(nZEB)

Parte A1 – Tecnologie per impiantistica energetica "low carbon"

Obiettivo: a.1: Cicli turbogas EGR

Task.2 Studi sulla dinamica di combustione in cicli EGR

Responsabile del Progetto: Franca Rita Picchia, ENEA

Responsabile scientifico per ENEA del Contratto di Ricerca: Guido Troiani

Responsabile scientifico per Università di Roma TRE del Contratto di Ricerca: Prof. Roberto Camussi

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 MISURE DI VELOCITÀ.....	7
2.2 MISURE DI CONCENTRAZIONE.....	10
2.3 MISURE DI TEMPERATURA.....	11
2.4 MISURE DI PRESSIONE.....	14
2.4.1 <i>spazio delle pseudofasi</i>	16
2.4.2 <i>filtraggio wavelet</i>	18
3 CONCLUSIONI.....	19
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	20

Sommario

In questo rapporto viene descritta l'attività sperimentale sul bruciatore ROMULS. Si tratta di un bruciatore in scala di laboratorio attrezzato con una camera di combustione in quarzo per garantire l'accesso ottico, necessario a misure spettroscopiche per la diagnostica dei processi di combustione. La particolarità di questo bruciatore è quella di permettere ad una fiamma premiscelata di aria e metano di bruciare in una atmosfera ricca di anidride carbonica (CO_2), garantita dalla combustione di due fiamme ausiliare premiscelate (fiamme pilota) di aria e propano, tipico dei sistemi EGR (Exhaust Gas Recirculation) per l'abbattimento degli inquinanti prodotti. La camera di combustione in quarzo, inoltre, isola le tre fiamme dall'aria ambiente esterna. In tal modo il sistema che può funzionare in diversi regimi di combustione, in particolare quello stabile detto di "rumore di combustione" e quello di instabilità termoacustica.

Su tale dispositivo il personale ENEA ha effettuato misure di velocità, temperatura e concentrazione di specie radicaliche volte allo studio della dinamica di combustione nei due regimi di funzionamento, stabile e instabile. Inoltre, in collaborazione col personale del Dipartimento di Ingegneria dell'Università Roma TRE, è stata portata a termine una campagna di misure di pressione ed una analisi del segnale ricavato applicando innovative tecniche basate sulla dinamica dei sistemi caotici e filtri wavelet, con lo scopo di individuare osservabili capaci di prevedere l'insorgenza dell'instabilità termoacustica.

1 Introduzione

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 ed acqua) ed individuare le condizioni che possano condurre ad instabilità di tipo termoacustico ed eventualmente prevederle attraverso la definizione di opportuni osservabili. L'instabilità termoacustica è caratterizzata da un accoppiamento in fase del rilascio di calore e della fluttuazione di pressione, generalmente guidata (almeno nel suo incipit) dalle frequenze proprie di risonanza della camera di combustione.

I gas esausti di due fiamme ausiliare, dette pilota, ai lati della miscela fresca entrante nel combustore hanno il compito di creare un ambiente ricco di CO₂, e povero di ossigeno, come quello dei sistemi EGR (Exhaust Gas Recirculation). Nei sistemi EGR i gas combusti ricchi di azoto e anidride carbonica e poveri di ossigeno vengono prelevati e aggiunti (da qui il termine riciccolati) all'aria comburente fresca, ricca di azoto e ossigeno. Questa strategia permette di limitare la produzione e le emissioni in atmosfera degli ossidi di azoto, nocivi all'ambiente e all'uomo. Nel bruciatore ROMULUS l'immissione in camera di combustione dei gas combusti non avviene tramite ricircolo, ma dalla combustione delle due fiamme pilota. La presenza di fiamme pilota, inoltre, rende possibile stabilizzare una fiamma turbolenta fino ad un numero di Reynolds dell'ordine di 10000 a cui corrispondono velocità medie di efflusso di 40-50 m/s.

L'attuale configurazione prevede una fiamma principale alimentata con una portata di metano di 0.032 g/s e di aria pari a 0.56 g/s che garantisce una miscela stechiometrica. Il numero di Reynolds che ne consegue, basato sulla velocità media di uscita (circa 16 m/s) e la sezione del bruciatore (3 x 10 mm²), è pari a 5000. Le fiamme pilota elaborano globalmente una portata costante di propano di 0.011 g/s e variabile di aria tra 0.15 e 0.11 g/s con un relativo rapporto di equivalenza variabile nell'intervallo 1.1 – 1.6. La velocità media di uscita dei gas combusti dalle fiamme pilota è pari a 0.73 m/s, di circa venti volte inferiore alla velocità media del getto principale.

Il bruciatore presenta una camera di combustione le cui pareti sono costruite in quarzo, per permettere l'accesso ottico necessario all'utilizzo di tecniche spettroscopiche per la misura di velocità, concentrazione e temperatura. La distanza tra le pareti della camera di combustione e la fiamma è stato oggetto di approfonditi studi negli ultimi anni. L'obiettivo è quello di rendere tale distanza la minore possibile, in modo da avere una camera di combustione compatta che possa essere simulata numericamente con tecniche di tipo DNS (Direct Numerical Simulation). Ciò comporta diverse complicazioni dal punto di vista misuristico. Il flusso di miscela aria metano è inseminato con micro particelle (allumina) per permettere misure di velocità. Un'attenta gestione della quantità di particelle immesse, in funzione delle portate di miscela reagente permette ora di effettuare misure di velocità (tecnica PIV, Particle Image Velocimetry) per lunghi periodi limitando al minimo l'adesione delle particelle sulle pareti in quarzo. Tale risultato è stato ottenuto con l'esperienza maturata dal personale ENEA nelle ultime annualità del PAR.

La determinazione della concentrazione di specie tramite la misura del segnale di fluorescenza emesso da alcune molecole "target" è stato portato a termine con successo dal personale ENEA. Ciò rende possibile l'individuazione della topologia del fronte di fiamma. L'ottenimento di questo tipo di informazione ha un duplice scopo: da un lato fornisce preziose informazioni riguardo le mutue interazioni tra chimica e turbolenza e dall'altro può essere usata per un confronto diretto con la topologia di fiamma ottenuta dalle simulazioni numeriche.

La misura della temperatura invece è un punto critico. Nella precedente annualità, la temperatura era stata misurata dal personale ENEA con una tecnica detta CARS (coherent anti Stokes Raman spectroscopy), la quale prevede l'utilizzo di tre fasci laser focalizzati in un'unica regione, il punto di misura. La tecnica ha dato risultati eccellenti, ma non è stato possibile utilizzare la camera di combustione in quarzo, per cui la fiamma bruciava libera in atmosfera e non più confinata. Il motivo di tale limitazione risiede nell'alta energia posseduta dal raggio laser nel punto di focalizzazione, capace di fondere il quarzo.

Come alternativa al CARS, in questa annualità, il personale ENEA ha utilizzato la tecnica di Rayleigh, che prevede la misura di temperatura di un fluido anche su una lama di luce laser. Ciò significa che l'energia posseduta dal raggio laser viene distribuita su un'ampia regione, evitando così fenomeni di fusione del quarzo. L'intensità della luce diffusa e misurabile dipende dal numero di molecole presenti nell'unità di volume, la densità, e tramite l'equazione di stato dei gas perfetti si risale alla temperatura. Le zone calde e combuste quindi sono caratterizzate da una forte diminuzione del segnale di Rayleigh rispetto alle zone fredde e incombuste. È una tecnica affetta da una minore accuratezza rispetto al CARS. La diffusione di Rayleigh, al contrario del CARS, si basa su fenomeni di diffusione elastica della radiazione elettromagnetica. Ciò implica che il segnale di eccitazione ha la stessa frequenza del segnale raccolto per la misura. Questa particolarità ha precluso nuovamente l'utilizzo di una camera di combustione di ridotte dimensioni, poiché la luce diffusa dalle pareti di quarzo sovrastava quella della misura.

Le misure effettuate in atmosfera hanno comunque confermato le temperature ottenute l'annualità precedente con la tecnica CARS e in più hanno fornito distribuzioni bidimensionali della temperatura, impossibili da ottenere col CARS.

Nell'attuale annualità del PAR è prevista, anche l'analisi delle fluttuazioni di pressione tramite tecniche che sfruttano concetti di analisi caotica e filtri wavelet alla ricerca di precursori dell'instabilità di combustione. Il bruciatore, provvisto di camera di combustione di ridotte dimensioni, ha evidenziato la possibilità di funzionare sia in regime stabile in cui il rumore di combustione è distribuito su un ampio intervallo di frequenze, sia in regime instabile in cui l'emissione acustica è concentrata attorno ad una o poche frequenze specifiche.

Nel regime stabile il personale ENEA ha effettuato misure di velocità, emissione acustica e fluorescenza del radicale OH. Nel regime instabile di combustione, si è misurata la velocità, l'emissione acustica, la fluorescenza del radicale OH e la temperatura. Tutte le misure hanno evidenziato una profonda modifica della topologia del fronte di fiamma all'insorgere dell'instabilità.

Le misure di pressione per tutte le configurazioni e la relativa analisi caotica e filtraggio wavelet è stato svolto dal gruppo di ricerca del Prof. Roberto Camussi del dipartimento di Ingegneria dell'Università di Roma TRE, col quale si è messa appunto una strategia di analisi per individuare nel segnale di pressione un precursore dell'instabilità.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Misure di velocità

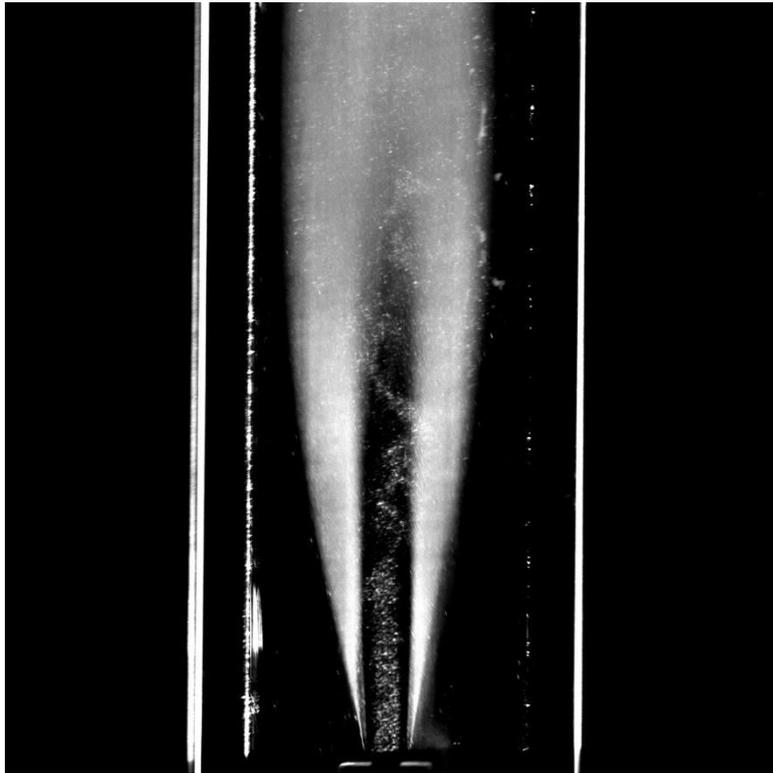


Figura 1 Immagine Mie Scattering delle particelle insemi nanti.

La misura della velocità di un fluido può essere effettuata sfruttando diverse tecniche. In ambienti caratterizzati da elevate temperature tipiche della combustione si ricorre alle misure di tipo spettroscopico. In questo caso particelle fini (dimensioni dell'ordine di pochi micron) e capaci di resistere alle temperature elevate del fronte di fiamma (2000 K), appositamente inserite nel flusso, vengono illuminate con una sorgente laser. La luce diffusa segue le regole della diffusione elastica detta di "Mie". Registrando due immagini in rapida successione del tipo mostrato Figura 1, è possibile ottenere un campo di spostamenti delle particelle. Da qui, noto l'intervallo di tempo tra due immagini successive, si calcola la velocità. Questa tecnica viene chiamata PIV, Particle Image Velocimetry. È chiaro quindi che l'informazione della velocità si ha solo dove c'è presenza di particelle. Date le ridotte dimensioni del dispositivo (il canale del bruciatore ha una sezione rettangolare di 3 mm per 10 mm) il preciso dosaggio di tali particelle risulta essere cruciale: un eccesso di insemi nante andrebbe a depositarsi sulle pareti di quarzo impedendo l'accesso ottico. Questa problematica è stata risolta nell'annualità precedente.

Nella figura è visibile la dispersione delle particelle e un alone più esterno che rappresenta le particelle che hanno aderito alla parete interna della camera di combustione in quarzo. Ciò non preclude comunque la misura della velocità nelle regioni di interesse, dove è presente la fiamma. La dispersione delle particelle segue fedelmente le fluttuazioni di velocità e la sua densità dipende dalla densità del fluido in cui sono immerse. Quando un volume di fluido insemi nante attraversa il fronte di fiamma, questo subisce una drastica espansione (dovuto al repentino incremento di temperatura). Le zone dei reagenti a temperatura ambiente sono caratterizzate, quindi, da una maggiore densità di particelle e quindi una maggiore luminosità, al contrario delle zone combuste ad alta temperatura (circa 2000 K) in cui le particelle diventano appena visibili. Il fronte di fiamma è quindi individuato dal forte gradiente di luminosità (densità di particelle). Ai lati della fiamma sono visibili le tracce verticali ad alta emissività della camera in quarzo.

Nella Figura 2 e anche in Figura 3 sono riportate le misure di velocità ottenute con il metodo PIV. Nella prima figura, sulla sinistra il bruciatore opera in modalità stabile. La distribuzione dei colori rappresenta la velocità assiale i cui valori sono riportati nella legenda. Sulla destra lo stesso bruciatore in condizioni

termoacusticamente instabili. Il numero di Reynolds globale del bruciatore basato su ampiezza trasversale del canale e velocità media è di 5000. Mentre il rapporto di equivalenza tra aria e metano è quello stechiometrico.

L'instabilità termoacustica nasce all'interno delle cavità in cui risiedono le due fiamme pilota. Per questo motivo senza la camera di combustione non si può avere instabilità: vengono a mancare le due cavità, come si può notare nello schema di Figura 4, dove sono visibili anche i fori lasciati dalla fusione del quarzo ad opera dei raggi laser durante le misure CARS.

L'evoluzione del campo di velocità tra le due condizioni di stabilità e instabilità termoacustica è diversa, soprattutto verso l'apice della fiamma, che risulta più allungata, vedi Figura 3.

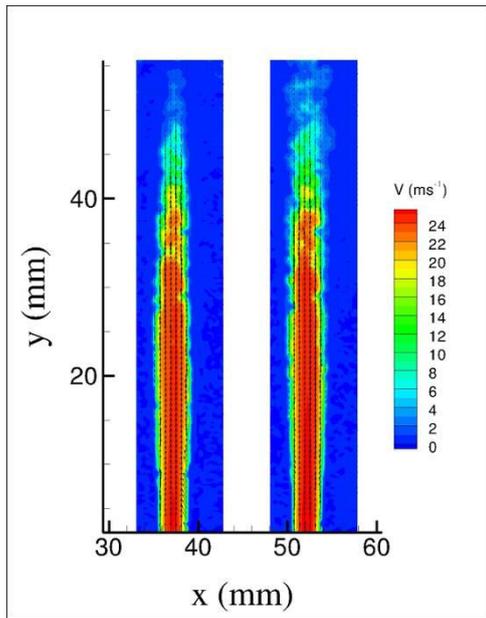


Figura 3 Campi vettoriali PIV e scalare della velocità media assiale (bande di colore).

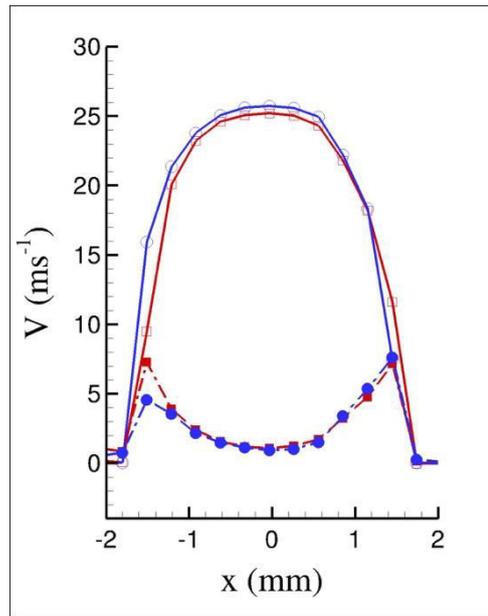


Figura 3 Velocità media (linea continua) e sue fluttuazioni (linea tratto-punto). Rosso, stabile; blu, instabile. Sezione trasversale di campi PIV.

La condizione di instabilità viene raggiunta modificando leggermente la portata d'aria delle fiamme pilota. La Figura 2 mostra come il campo di velocità all'uscita del getto non risenta di tale variazione. Ciò sta ad indicare che l'instabilità termoacustica agisce sulla fiamma modificandone la topologia e che tale evoluzione non è causata da una modulazione della portata dei reagenti.



Figura 4 Immagine del bruciatore.

2.2 Misure di concentrazione

La struttura del fronte di fiamma può essere visualizzata attraverso la misura della concentrazione del radicale OH. Il radicale OH è un prodotto intermedio della combustione la cui concentrazione subisce un brusco aumento all'interno del fronte di fiamma, in una zona detta "inner layer" che risulta essere il cuore pulsante della combustione. In questa zona si ha la repentina costruzione/distruzione di specie radicaliche che guidano la trasformazione dei reagenti in prodotti di combustione. Se le fluttuazioni di velocità o pressione dovessero interferire distruttivamente con tale zona, il processo di combustione verrebbe meno, causando degli spegnimenti locali detti "quenching". Tali spegnimenti sono da evitare in quanto rendono instabile la fiamma e favoriscono l'emissione nell'atmosfera di composti altamente dannosi per la salute (monossido di carbonio, ad esempio).

Per misurare la concentrazione di specie radicaliche si utilizza una tecnica detta di fluorescenza indotta (LIF, Laser Induced Fluorescence) la quale sfrutta la riemissione anelastica di un'onda elettromagnetica emessa da una sorgente coerente, la luce emessa da un laser. In questo caso la sorgente laser eccita il fluido reagente con una lunghezza d'onda pari a 283 nm (nanometri) e le molecole OH diffondono una radiazione caratterizzata da una lunghezza d'onda di 310 nm. Questa lunghezza d'onda è specifica del radicale OH

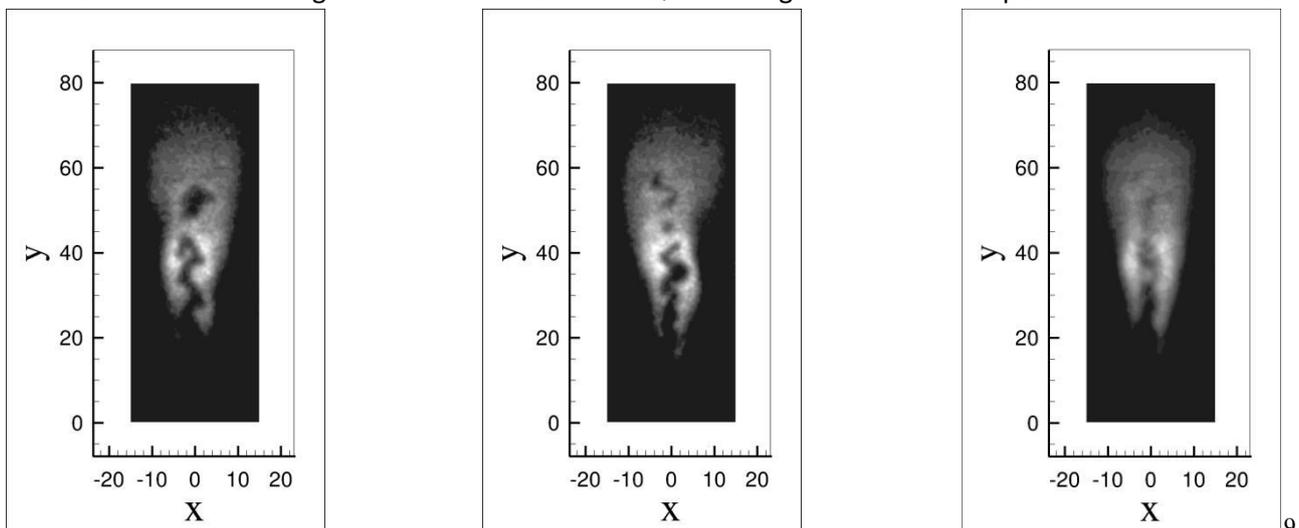


Figura 5 Fluorescenza radicale OH, nel regime di rumore di combustione. Sinistra e centro, immagini istantanee. Destra, immagine mediata su 500 immagini istantanee.

quindi, filtrando le immagini con una lente-filtro passabanda (che esclude tutte le lunghezze d'onda tranne quella a 310 nm), la misura di un eventuale segnale luminoso indica la presenza esclusivamente del radicale OH e di nessuna altra specie chimica.

Nella Figura 5 sono rappresentate degli esempi di misura della concentrazione del radicale OH, nella condizione in cui il bruciatore funzioni in un regime stabile di "rumore di combustione", che prevede una emissione sonora a larga banda della combustione. Le prime due immagini rappresentano configurazioni istantanee della fiamma, mentre la terza, la media su 500 immagini. La netta separazione tra zone scure e chiare intorno all'asse del bruciatore ($X = 0$, $0 < Y < 80$) indica un forte gradiente di concentrazione del radicale OH; è lì che si definisce la posizione del fronte di fiamma, che risulta essere istantaneo in quanto i tempi di vita del radicale OH sono dell'ordine della decina di nanosecondi (ns).

Qualora il bruciatore dovesse operare in condizione di instabilità termoacustica, caratterizzato quindi da uno spettro di pressione in cui sia presente una forte componente tonale attorno ad una frequenza specifica (750 Hz, circa), la struttura topologica istantanea del fronte di fiamma ne risulterebbe profondamente modificata. È quanto emerge dall'osservazione delle immagini (medie e istantanee) riportate in Figura 6. Il tipo di fluttuazioni che subisce la fiamma ora ha un andamento maggiormente simmetrico e più ampio nello spazio. Nel caso precedente di rumore di combustione invece la fiamma risultava più concentrata attorno all'asse e con fluttuazioni antisimmetriche. Se ne deduce che l'azione della forzante acustica nel regime di instabilità abbia un effetto simmetrizzante sull'intera struttura del fronte di fiamma.

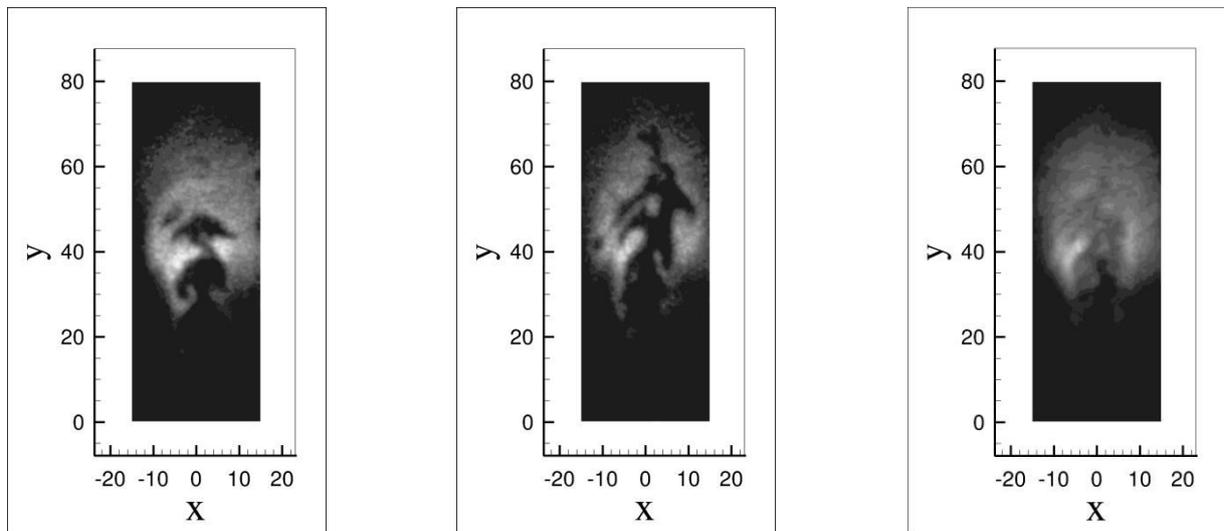


Figura 6 Fluorescenza radicale OH, nel regime di instabilità termoacustica di combustione. Sinistra e centro, immagini istantanee. Destra, immagine mediata su 500 immagini istantanee.

2.3 Misure di temperatura

La misura della temperatura in una fiamma ha una duplice utilità: da un lato fornisce la distribuzione della temperatura nella camera di combustione (non solo nell'intorno del fronte di fiamma), dall'altro, l'elevato gradiente spaziale individua la posizione del fronte di fiamma, in maniera analoga a quanto già fatto con le misure di fluorescenza del radicale OH.

Nell'annualità precedente la temperatura era stata misurata con una tecnica puntuale detta CARS (Coherent Anti-Stokes Raman spectroscopy). Pur presentando elevate accuratèzze (dell'ordine di pochi

Kelvin) tale tecnica non risultava adatta alla misura della temperatura in un bruciatore così piccolo. Infatti, l'estrema vicinanza delle pareti in quarzo della camera di combustione alla zona di massima focalizzazione dei raggi laser, causava la fusione del quarzo. Ciò oltre a danneggiare la camera di combustione rendeva impossibile la misura. In quest'annualità si è adottata una tecnica spettroscopica differente, basata sul fenomeno della diffusione di Rayleigh. A differenza della prima, è una misura che può essere effettuata su un piano, espandendo il raggio laser in una lama di luce, con densità di potenza minori tali da non causare danni al quarzo. È un fenomeno di tipo elastico, quindi non scansiona una specifica molecola. La quantità di fotoni emessi per diffusione dipende dal numero di molecole presenti nell'unità di volume e da un parametro che indica l'intensità dell'interazione molecola-onda elettromagnetica, la sezione d'urto. Ogni molecola, quindi, è caratterizzata da uno specifico valore della sezione d'urto e per ottenere la sezione d'urto media che caratterizza la miscela combustibile si effettua una media pesata con le frazioni molari delle singole specie. In teoria quindi, la differente composizione chimica tra reagenti e prodotti di combustione dovrebbe portare a una variazione della sezione d'urto media attraverso il fronte di fiamma. Nella pratica, la letteratura riporta molteplici studi in cui si è verificato che la variazione della sezione d'urto attraverso il fronte di fiamma non supera un valore massimo del 10%. Ciò sta ad indicare che la variazione di intensità del segnale Raman è principalmente dovuta alla diminuzione del numero di molecole per unità di volume, la densità. Dalla misura di densità, attraverso l'equazione di stato per i gas perfetti, si risale alla misura della temperatura.

La misura della temperatura per effetto Raman ha il notevole vantaggio che può essere effettuata su un piano, per contro presenta una notevole carenza di accuratezza. Possono verificarsi scostamenti dal valore effettivo anche di 100 K. Se lo scopo però, è quello di avere una indicazione della distribuzione delle temperature all'interno di un bruciatore e non conoscere con estrema precisione il valore assoluto della temperatura in un punto, allora risulta essere una tecnica valida. Inoltre, tale inaccuratezza non inficia la definizione della posizione del fronte di fiamma, essendo ottenuta tramite derivazione spaziale. In questo caso, contano le variazioni (gradienti) e non il valore assoluto.

Da notare che, essendo la variazione di intensità proporzionale a quella di densità, la presenza di fiamma (alta temperatura, bassa densità) è caratterizzata da una forte diminuzione del segnale. Passando da 300 K nei reagenti a 2000 K nei prodotti di combustione, l'intensità luminosa diminuisce di circa 7 volte. Inoltre, essendo una la tecnica basata su un fenomeno elastico, la frequenza di eccitazione è pari a quella del segnale raccolto. La lama laser, attraversando le pareti in quarzo della camera di combustione crea una diffusione all'interno del materiale, rendendo di fatto il quarzo un emettitore esso stesso. Ciò in pratica, abbaglia il segnale Rayleigh rendendo impossibile la misura. Nella Figura 7 si può notare come il segnale luminoso catturato sia indistinguibile nelle due immagini. In quella di sinistra, la miscela reagente non è ignita, non si ha fiamma quindi, in quella di destra c'è combustione.

A causa di questo fenomeno le misure di temperatura saranno effettuate senza la camera di combustione.

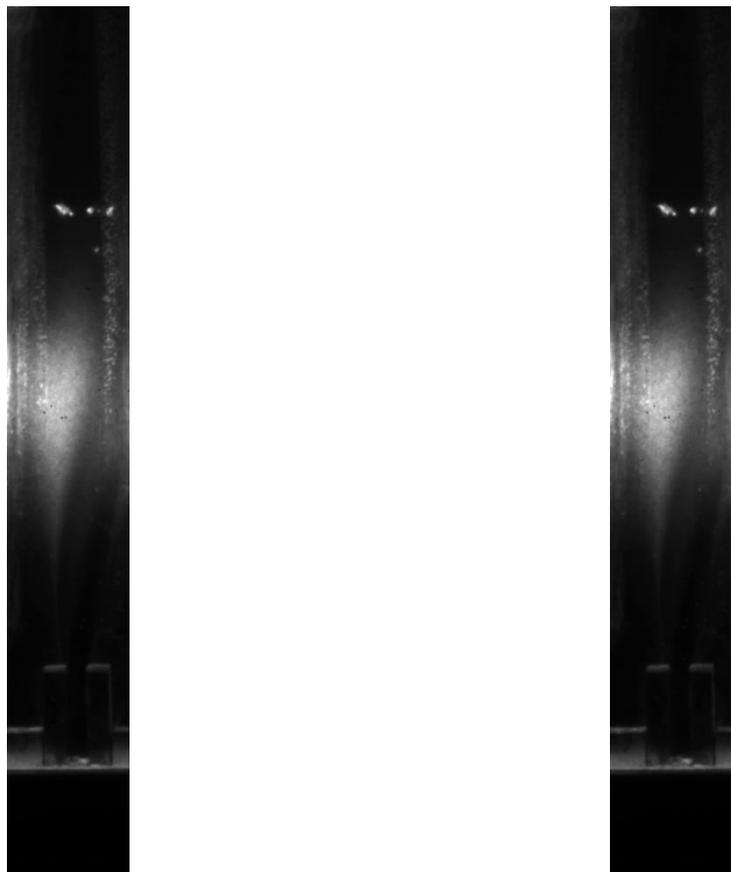


Figura 7 Diffusione di Rayleigh in presenza della camera di combustione in quarzo. Sinistra: Segnale senza fiamma. Destra: Segnale con la fiamma.

Eliminata la camera in quarzo e lasciata la fiamma libera di bruciare in atmosfera, la misura diventa possibile. Senza la camera in quarzo la transizione da rumore di combustione a instabilità termoacustica non risulta più possibile. Come prima verifica della fattibilità del metodo, si è realizzata la misura lungo una linea. Il raggio laser attraversa la fiamma e la sua variazione di luminosità registrata dalla telecamera, rispetto al raggio che attraversa la miscela fredda, fornisce la misura della temperatura.

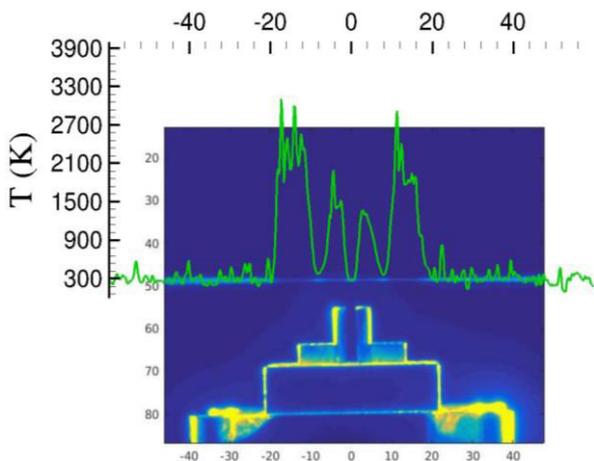


Figura 8 Diffusione di Rayleigh lungo un raggio laser. Andamento della temperatura relativo al raggio laser, linea verde.

Nella Figura 8 è possibile vedere un raggio laser che attraversa orizzontalmente la fiamma (da sinistra verso destra); sovrapposto, in verde, si ha l'andamento della temperatura associata alla variazione di luminosità. La misura è stata tarata con l'aria ambiente a circa 300 K. Lungo l'asse del bruciatore la temperatura dei reagenti freschi è effettivamente di circa 300 K mentre sale a circa 2100 K in prossimità del luogo in cui si trova il fronte di fiamma.

Espandendo il raggio laser in una lama laser si accede all'informazione di temperatura su un piano. Nella

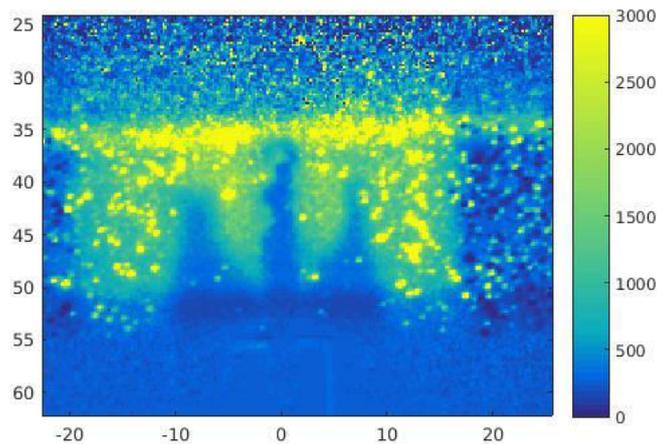


Figura 9 Diffusione di Rayleigh. Distribuzione bidimensionale della temperatura.

Figura 9 è riportato un esempio di misura bidimensionale della temperatura e sono visibili le tracce delle due fiamme pilota che circondano la fiamma principale. Da notare come anche lo scattering di Rayleigh sia capace di fornire informazioni riguardo la topologia del fronte di fiamma. In figura si possono apprezzare le circonvoluzioni del fronte di fiamma sotto l'effetto convettivo del flusso turbolento in uscita dal getto. La traccia di temperatura lasciata dalle fiamme pilota invece risulta sostanzialmente "liscia", senza circonvoluzioni, vista la bassa velocità di uscita della miscela reagente che è dell'ordine di 0.7 m/s, a differenza di quella della fiamma principale che raggiunge anche i 25 m/s.

2.4 Misure di pressione

Le misure di pressione hanno lo scopo di studiare la transizione del bruciatore da un funzionamento stabile a quello instabile. Una fiamma turbolenta stabile è caratterizzata da uno spettro di emissione sonora a larga banda. Quello che accade è che l'energia associata alle fluttuazioni di pressione acustica è distribuita in un intervallo di frequenze molto largo. Da qui il tipico rumore dei bruciatori, una sorta di brusio. In tale regime di funzionamento le varie parti meccaniche di cui è composto il bruciatore non subiscono eccessive sollecitazioni in quanto pressione e rilascio di calore fluttuano in maniera randomica e senza un accoppiamento in fase. La combustione avviene nel migliore dei modi. Qualora si stabilisse una coerenza tra le fluttuazioni di pressione e rilascio di calore si entrerebbe nel regime di funzionamento instabile di un bruciatore. Generalmente, si ha una concentrazione di dell'energia radiante e di pressione attorno a frequenze specifiche che, se coincidenti con quelle delle frequenze proprie dei componenti meccanici, porterebbero l'intero sistema in risonanza con effetti devastanti.

Nasce quindi la necessità di riuscire a prevedere l'insorgenza di tali instabilità individuando degli osservabili che prima di tutti manifestino delle "anomalie" capaci di comunicarci la transizione verso un sistema instabile. Le fluttuazioni di pressione sembrano rispondere a tali requisiti, inoltre sono registrabili con apparecchiature relativamente semplici. È sufficiente uno o più microfoni posti nell'intorno della fiamma

per ottenere informazioni preziose. In particolare, si è notato che la transizione tra un sistema che emette a larga banda ad uno tonale (cioè focalizzato su una o più frequenze) è accompagnato da una sempre più crescente presenza di pacchetti d'onda a frequenze coincidenti con quelle caratteristiche della instabilità finale. La distribuzione nel tempo e nello spazio di tali pacchetti d'onda è ancora oggetto di studio nella comunità scientifica.

Operativamente, si è utilizzata una fiamma premiscelata aria/metano turbolenta ad un numero di Reynolds di 5000 ancorata al bruciatore da una fiamma pilota, anch'essa premiscelata, di aria/propano. Partendo da una condizione stabile, si è incrementata la portata di aria della fiamma pilota fino ad ottenere un funzionamento termoacusticamente instabile. Sono state condotte misure intermedie a portate successivamente crescenti di aria della fiamma pilota. Nella tabella di seguito sono riportate le portate e i rapporti di equivalenza delle varie prove.

Tabella 1 Tabella portate in massa.

	fiamma principale			fiamma pilota		
	Aria g/s	Metano g/s	rapporto equivalenza	Propano g/s	Aria g/s	rapporto equivalenza
1	0,56	0,032	1	0,011	0,15	1,1
2	0,56	0,032	1	0,011	0,14	1,2
3	0,56	0,032	1	0,011	0,13	1,3
4	0,56	0,032	1	0,011	0,12	1,4
5	0,56	0,032	1	0,011	0,11	1,6

Si può notare che i rapporti di equivalenza della fiamma pilota variano dallo stechiometrico (situazione di funzionamento instabile) e tendono a diventare più grassi (riduzione dell'aria comburente) nell'avvicinarsi al punto di funzionamento stabile (ultima riga della tabella). Nella Figura 10 che riporta la densità spettrale di potenza (PSD) delle fluttuazioni di pressione, si può notare l'effetto di focalizzazione dell'energia al variare della portata della fiamma pilota. La variazione delle condizioni di combustione della fiamma pilota instaura un regime instabile all'interno delle cavità in cui brucia la fiamma ed estendono la loro influenza anche alla fiamma principale, come visto dalle analisi dei valori di velocità e distribuzione dell'OH.

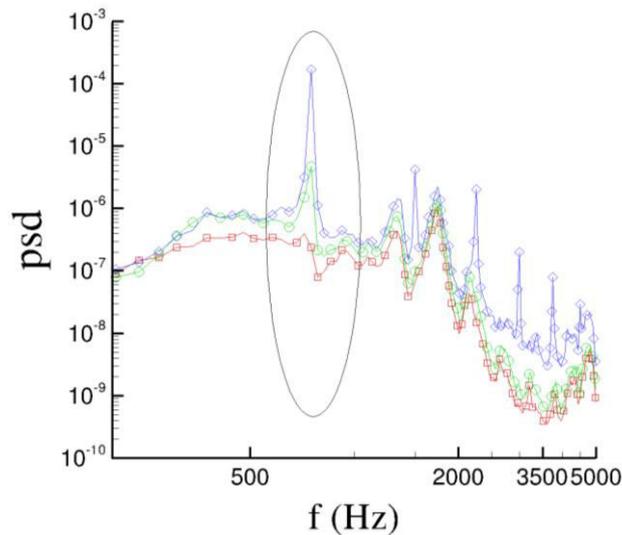


Figura 10 Analisi spettrale del segnale di pressione campionato. In evidenza la comparsa di un picco tonale quando il bruciatore presenta una instabilità di tipo termoacustico. Colori: blu esperimento 1, verde esperimento 2, rosso esperimento 5. I numeri degli esperimenti sono riportati in Tabella 1.

Data la natura randomica dell'insorgenza dei pacchetti d'onda responsabili della transizione all'instabilità, questi vengono filtrati dai processi di media propri della trasformata di Fourier rappresentata nella Figura 10, in cui si può notare il picco di emissione solo nel regime instabile di funzionamento e minimamente in quello di transizione. Bisogna quindi cambiare approccio ed utilizzare tecniche capaci di selezionare eventi randomici o intermittenti come quelle utilizzate nell'analisi dei sistemi caotici.

L'analisi caotica è stata effettuata dal gruppo di lavoro del Prof. Roberto Camussi del Dipartimento di Ingegneria nell'Università Roma TRE e dal Dottor Tiziano Pagliaroli. In particolare sono stati implementati

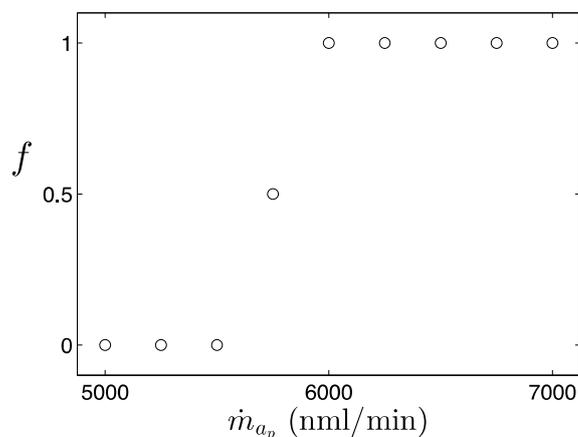


Figura 11 Indice di probabilità.

algoritmi per l'estrazione di informazioni nello spazio delle pseudofasi e per il filtraggio wavelet.

Prima di procedere con l'analisi caotica, risulta utile evidenziare gli effetti macroscopici che la transizione al regime di instabilità termoacustica ha sulle fluttuazioni di pressione. Partendo dalla situazione stabile di rumore di combustione riportata nella riga 5 della Tabella 1, si calcola il valor quadratico medio della fluttuazione di pressione (p_{rms}) e nelle configurazioni sperimentali successive si contano il numero di picchi (N) che superano tale limite rispetto al numero totale di picchi (N_{tot}). Il rapporto $f=N/N_{tot}$ è un indice di probabilità che misura l'insorgenza (o la prossimità) nel sistema di fenomeni di instabilità. Si può notare in Figura 11 come questo indice transisca da un valore nullo ad un valore unitario, che indica che tutti i picchi superano il livello stabilito. È interessante notare che la transizione avviene bruscamente, infatti questo tipo di fenomeno viene detto biforcuto ed esiste un parametro di biforcazione che separa i due regimi di funzionamento.

2.4.1 spazio delle pseudofasi

Nella teoria dei sistemi dinamici lo spazio delle fasi è lo spazio in cui i punti rappresentano univocamente tutti e soli i possibili stati che il sistema può assumere. Le dimensioni che tale spazio può assumere sono finite anche se in sistemi complessi enormemente elevate, tante quante sono i gradi di libertà del sistema.

A titolo di esempio, prendiamo in considerazione un semplice oscillatore armonico, una massa libera di muoversi in linear retta vincolata da una forza elastica (una molla). Tale sistema è descritto dall'equazione

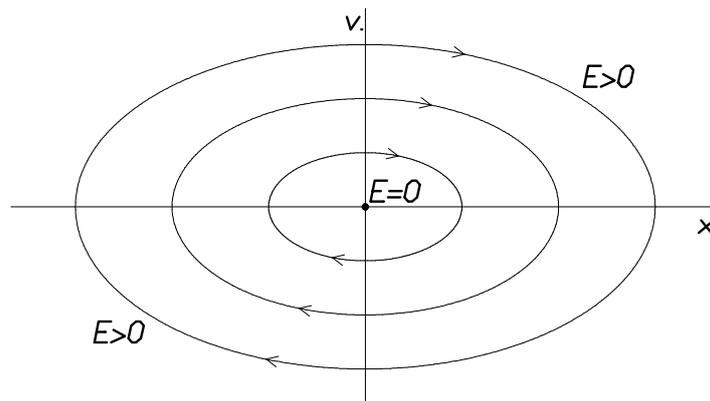


Figura 12 Spazio delle fasi oscillatore armonico.

del moto di Newton nelle variabili di posizione (x) e velocità (v) della massa m.

In questo spazio le traiettorie descritte nella Figura 12 rappresentano le sole e uniche configurazioni (in termini di posizione e velocità) che il sistema può assumere. Essendo il moto di tipo armonico, le traiettorie descritte sono orbite chiuse (attorno alla posizione di riposo $x=0$ e $v=0$) tanto più ampie quanto maggiore è l'energia E associata al sistema che corrisponde a quanto estendiamo inizialmente la molla. Se il sistema dovesse descrivere un moto non ciclico ma caotico, come ad esempio posizione e velocità di una formica che esplora il territorio in cerca di cibo, le orbite non sarebbero chiuse ma composte da segmenti che esplorano lo spazio delle fasi in maniera randomica o casuale. Maggiore è la complessità del sistema, maggiore è il grado di libertà, cioè il numero di variabili indipendenti che lo caratterizzano. In questo caso lo spazio delle fasi assume forme e dimensioni non rappresentabili in uno spazio tridimensionale comprensibile dalla mente umana. L'analisi caotica sopperisce a questa mancanza introducendo degli indicatori comprensibili.

Una ulteriore complicazione nasce quando del sistema che osserviamo non possiamo conoscere (o misurare) tutti i gradi di libertà. È il caso del bruciatore, in cui la sola variabile che misuriamo è la pressione in un solo punto nel tempo, $p(t)$.

Il teorema di Takens, stabilisce che sia possibile ricostruire uno spazio delle fasi alternativo, detto delle pseudo fasi, partendo da un solo segnale temporale $p(t)$ e considerando come pseudo fasi quelle ricostruite da successivi ritardi temporali T in modo da avere uno spazio costruito dal vettore $P[p(t+T), p(t+2T), \dots, P(t+DT)]$, con D un numero appropriato detto dimensione di "embedding". In questo modo il sistema, per complesso che sia, e di cui si ignorano tutte le variabili necessarie alla sua completa descrizione, può essere descritto da un insieme ridotto di dimensioni. La determinazione del tempo di ritardo T e della dimensione di embedding D può essere effettuata sfruttando diversi teoremi presenti in letteratura. La ricostruzione dello spazio delle pseudo fasi per il bruciatore Romulus permette di evidenziare comportamenti di tipo caotico dovuti al rumore di combustione oppure ciclici dovuti all'insorgere delle instabilità di combustione. È possibile inoltre apprezzare la transizione da un sistema all'altro.

Nel caso del bruciatore Romulus la dimensione di embedding risulta essere pari a $D = 10$ e il ritardo ottimo $T = 1.13$ ms. Il segnale di pressione è campionato ad una frequenza di 10 KHz.

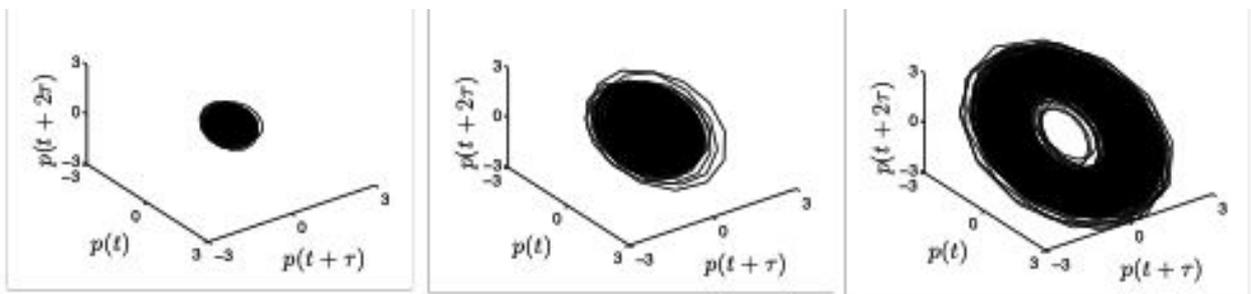


Figura 13 Attrattore nello spazio delle pseudofasi per diverse configurazioni di funzionamento. Sinistra, rumore di combustione riferito al punto 5 della Tabella 1; destra, instabilità di combustione, riferito al punto 1 della tabella; centro, transizione, riferito al punto 3 della tabella.

Con questi valori è possibile ricostruire la dinamica del bruciatore nello spazio delle pseudofasi nei diversi regimi di funzionamento.

Nella Figura 13, sono riportate in un sottospazio tridimensionale gli attrattori che definiscono la dinamica nello spazio delle pseudo fasi. Nel pannello di sinistra, l'attrattore appare rappresentato da un insieme di punti concentrati in una zona ristretta del dominio. In quello di destra, appare chiaro lo stabilirsi di orbite toroidali. Questo sta ad indicare che nel primo caso il rumore di combustione appare come una successione di punti disposti casualmente nello spazio delle pseudo fasi (ciò non è distinguibile ad occhio, ma apparirà chiara dalle analisi delle mappe di ricorrenza), mentre l'instabilità di combustione, caratterizzata da tonali ben definite, evidenzia comportamenti ciclici. Il pannello centrale rappresenta una zona di transizione tra un estremo e l'altro di funzionamento. La sola analisi visiva di questo risultato però restituisce un risultato parziale e non quantificabile. Come detto prima, esistono indicatori obiettivi capaci di sintetizzare caratteristiche geometriche di spazi multidimensionali. Uno di questi è il "recurrence rate" (RR), il quale indica quanto una traiettoria nello spazio delle fasi si ripeta simile a sé stessa. In caso di instabilità di combustione, RR deve esprimere una elevata ricorrenza, al contrario di quanto succede nella situazione di rumore di combustione. Operativamente si riportano su un diagramma temporale bidimensionale quelle coppie di punti che pur appartenendo ad orbite diverse risultano essere ad una distanza minore di un certo valore di riferimento. In termini matematici si ha

$$R_{ij} = \Theta \left(\varepsilon - \|p_i - p_j\| \right), \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, N \quad 1$$

Dove Θ è la funzione a gradino di Heavyside, p la pressione in due istanti i, j diversi e ε un valore soglia che stabilisce se due punti possono essere definiti vicini o meno. In ultimo tutti e soli i punti classificati come ricorrenti vengono rappresentati come punti neri sul grafico. Il risultato è mostrato in Figura 14 dove sono riportati le mappe di ricorrenza di RR relativi ai tre casi già mostrati in Figura 13.

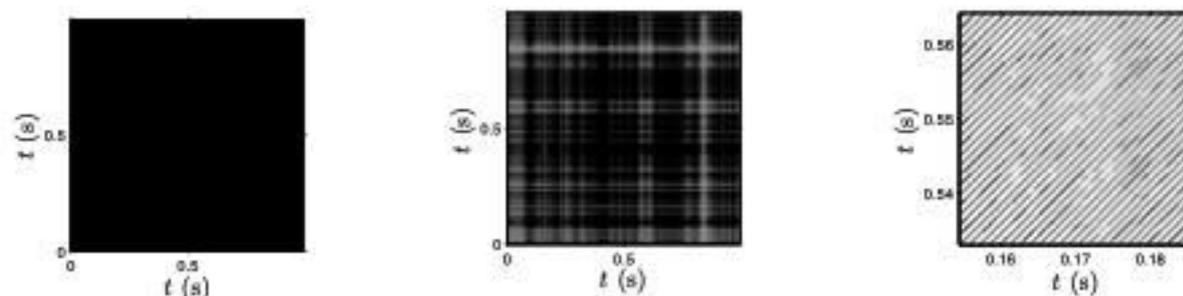


Figura 14 Mappe di ricorrenza per i diagrammi delle pseudofasi per i tre casi riportati in Figura 13.

Nel pannello di sinistra tutti i punti sono ricorrenti e quindi la mappa appare nera. Ciò perché la configurazione di rumore di combustione viene presa come riferimento. La soglia ϵ viene definita come la massima dimensione dell'attrattore, l'insieme di tutti i punti sul diagramma delle pseudofasi. All'approssimarsi dell'instabilità l'attrattore aumenta di dimensioni e si struttura in una configurazione ciclicamente ricorrente. Ciò è visibile nel pannello di destra dove la mappa di ricorrenza è strutturata secondo delle linee diagonali, la cui distanza temporale corrisponde all'inverso della frequenza della tonale evidenziata negli spettri di Figura 10. Nel pannello centrale è riportata la mappa di ricorrenza della configurazione di transizione. Ha una tipica struttura a "scacchiera" che indica una alternanza di zone caotiche (quelle maggiormente nere) ad altre caratterizzate da linee diagonali. Ciò sta ad indicare che il segnale di pressione durante la transizione da rumore di combustione a instabilità di combustione, è caratterizzato da una matrice caotica in cui sono presenti degli "eventi intermittenti" coerenti, i pacchetti d'onda, che si ritengono essere gli elementi che guidano il sistema verso l'instabilità. All'approssimarsi dell'instabilità conclamata, il numero e la frequenza di apparizione di questi pacchetti d'onda aumentano significativamente. Nel prossimo paragrafo verrà descritto il metodo di analisi con cui si intende estrarre tali pacchetti d'onda per analizzarne la forma (andamento temporale) e la frequenza d'occorrenza.

2.4.2 filtraggio wavelet

Da un punto di vista teorico la trasformata wavelet consiste nel correlare il segnale originale con una serie di forme d'onda (mother wavelet) variabili nello spazio e nel tempo. In pratica il segnale viene correlato con una forma d'onda di dimensioni crescenti. L'aumentare di queste dimensioni fa sì che si possano selezionare eventi caratterizzati da tempi caratteristici diversi. Col filtraggio wavelet si può quindi andare alla ricerca di eventi la cui scala temporale caratteristica sia ignota a priori. Una volta che tale filtraggio ha evidenziato gli eventi ricorrenti, essi risultano individuati all'interno del segnale di pressione. In questo modo è possibile costruire delle statistiche basate sulla frequenza di accadimento. La forza di tale tecnica risiede nel fatto che è capace di evidenziare fenomeni rari che verrebbero cancellati dai processi di media di insieme. La media aritmetica della pressione non varierebbe e il suo valor quadratico medio crescerebbe, ma senza indicare la causa di tale crescita.

La Figura 15 mostra i risultati di tale filtraggio. Nel pannello di sinistra sono riportate le prime due configurazioni relative al rumore di combustione, in cui nell'analisi spettrale non appare alcuna tonale, ma un "rumore" a banda larga. In particolare la linea rossa, evidenzia che anche in questo caso sono presenti delle strutture coerenti nella forma di difetti di pressione, come quelli che si realizzano al passaggio di una struttura fluidodinamica vorticoso. L'ampiezza di queste strutture, o pacchetti d'onda, non è tale però da far transire il sistema interamente e permanentemente. Infatti dopo il loro passaggio le fluttuazioni di

pressione ritornano a livelli minimi in breve tempo, e a monte del difetto di pressione le fluttuazioni del segnale sono minime. La curva blu, indica un punto di funzionamento che va nella direzione dell'instabilità; in questo caso le strutture fluidodinamiche che causano il difetto di pressione sono più energetiche e il difetto di pressione è più ampio (vedi dettaglio della figura). Inoltre le fluttuazioni di pressione innescate permangono più a lungo e cominciano a risentirsi a monte. Si evidenzia che la struttura riportata in figura rappresenta una media di molte strutture analoghe, quindi l'eventuale presenza di significative fluttuazioni di pressione a monte e valle della struttura principale evidenziano la permanenza di fluttuazioni tra una struttura e l'altra. Ciò vuol dire che il sistema si sta avviando ad una situazione di instabilità, in cui i disturbi introdotti dai singoli pacchetti d'onda non si dissipano tra un pacchetto e il suo successivo. Nel pannello di destra invece, l'instabilità si conclama e il filtraggio wavelet restituisce non più pacchetti d'onda ma semplici fluttuazioni armoniche.

Risulta quindi che il tempo di decadimento delle fluttuazioni di pressione introdotte nel sistema dal passaggio di un pacchetto d'onda assume la connotazione di precursore dell'instabilità, in quanto può essere osservato prima che l'instabilità si sia conclamata. Inoltre, l'estrazione di tale precursore non può essere effettuata con le classiche analisi di tipo spettrale; in più, l'analisi caotica ne evidenzia l'esistenza, ma solo il filtraggio wavelet è in grado di quantificare tale oggetto.

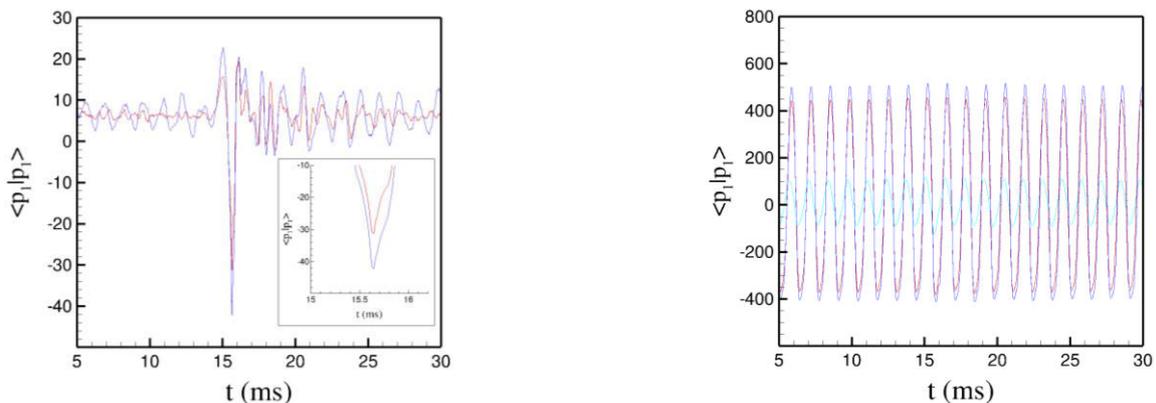


Figura 15 Filtraggio wavelet. In riferimento alla Tabella 1, sinistra linea rossa e blu, configurazioni 5 e 4, rispettivamente. Destra, linee ciano, rosso e blu, configurazioni 3, 2, 1, rispettivamente.

3 Conclusioni

Il lavoro svolto in questa annualità e riassunto in questo documento, si pone l'obiettivo di analizzare l'insorgenza di instabilità di tipo termoacustiche in un bruciatore premiscelato in un ambiente ricco di anidride carbonica ad elevata temperatura. Si è evidenziato come le forzanti termoacustiche abbiano origine dalle fiamme pilota ai lati del bruciatore principale il cui compito è, da un lato ancorare la fiamma

all'uscita del getto e dall'altro creare un ambiente nella camera di combustione ricco di anidride carbonica ed inerti ad alta temperatura, tipico dei sistemi EGR. Il forzamento termoacustico provoca inoltre profonde modifiche al campo di velocità e alla struttura topologica del fronte di fiamma principale. Inoltre, particolare attenzione è stata rivolta alla ricerca dei cosiddetti precursori dell'instabilità, cioè degli osservabili che potessero in qualche modo segnalare in anticipo e in maniera univoca l'insorgere delle instabilità.

Il personale ENEA si è occupato della misura dei campi di velocità e dell'applicazioni di tecniche spettroscopiche per la misura della temperatura e la visualizzazione della struttura del fronte di fiamma.

Il personale del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Roma TRE coordinato dal Prof Roberto Camussi, ha effettuato le misure di pressione applicando tecniche proprie dell'analisi caotica dei sistemi complessi ed il filtraggio wavelet.

4 Riferimenti bibliografici

1. T. Pagliaroli, R. Hernandez-Rivera, G. Troiani, L. Gefen, E. Giacomazzi, A. Hernandez-Guerrero, "Wavelet-based reconstruction of intermittent events in the transition of combustion-noise to thermoacoustic instability", 2018, 37th International Symposium on Combustion, Dublin, Ireland.
2. R. Hernandez, G. Troiani, T. Pagliaroli, R. Hernandez-Guerrero, "Chaotic analysis of the thermoacoustic instabilities of a trapped vortex combustor", 2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference.
3. T. Pagliaroli, M. Mancinelli, G. Troiani, U. Iemma, R. Camussi, "Fourier and wavelet analyses of intermittent and resonant pressure components in a slot burner", *Journal of Sound and Vibration* 413 (2018), 205-224.
4. V. Nair, G. Thampi, R. I. Sujith, "Intermittency route to thermoacoustic instability in turbulent combustors", *Journal of Fluid Mechanics* 756 (2014), p. 470-487.
5. 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.
6. N. Suraj, T. Lieuwen, "Acoustic detection of blowout in premixed flames", *Journal of Propulsion and Power*, 21.1(2005), p. 32-39.
7. 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.
8. S. Kartheekyan, S. R. Chakravarthy. "An experimental investigation of an acoustically excited laminar premixed flame." *Combustion and flame* 146 (3) (2006), p. 513-529.
9. T. Pagliaroli, R. Camussi, "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures, "Journal of Sound and Vibration" 341 (2015), p. 116-137.