



Ricerca di Sistema elettrico

EFFETTI DELL'AGGIUNTA DI IDROGENO NEI PROCESSI DI COMBUSTIONE IN UN BRUCIATORE IN SCALA DI LABORATORIO

G. Troiani, M. Marrocco, D. Zola, S. Scaglione, A. Gentili, C.
Stringola, E. Giulietti, A. Assettati, R. Camussi, E. Martellini, T.
Pagliaroli.

*EFFETTI DELL'AGGIUNTA DI IDROGENO NEI PROCESSI DI COMBUSTIONE IN UN BRUCIATORE IN
SCALA DI LABORATORIO*

G. Troiani, M. Marrocco, D. Zola, S. Scaglione, A. Gentili, C. Stringola, E. Giulietti, A. Assettati
ENEA C.R. Casaccia
R. Camussi, E. Martellini
Univeristà Roma Tre
T. Pagliaroli.
Università degli studi Niccoló Cusano

Dicembre 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità
Progetto: Tema 1.2 – Sistemi di accumulo, compresi power to gas, e relative interfacce con le reti
Work package: “Power to Gas” (P2G)
Linea di attività: Integrazione P2G/sistemi generazione elettrica innovativi: fuel-flexibility – realizzazione e test sezione H2-AGATUR e
sperimentazione ROMULUS
Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA
Responsabile del Work package: Eugenio Giacomazzi, ENEA

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	7
2.1 APPARATO SPERIMENTALE E TIPOLOGIA DI ALIMENTAZIONE	7
2.2 ANALISI DELLA FLUORESCENZA.....	9
2.3 FILTRAGGIO WAVELET	14
2.4 ANALISI CAOTICA	20
3 CONCLUSIONI.....	24
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	25

Sommario

Nel laboratorio IPSE di ENEA Casaccia, è stato messo a punto un bruciatore (chiamato ROMULUS) su scala da laboratorio (da 1 a 10 KW di potenza) alimentato con una miscela di metano/aria con l'aggiunta di idrogeno in percentuali variabili. Lo scopo è quello di analizzare la variazione delle caratteristiche di combustione di combustibili fossili addizionati con idrogeno. Questo in vista dell'utilizzo di combustibili provenienti dallo stoccaggio chimico del surplus energetico prodotto da fonti rinnovabili: tecnologie Power-to-Gas.

Il bruciatore in esame, alimentato con metano puro e sotto opportune condizioni di funzionamento, è in grado di operare in regime di instabilità termoacustica. In tale regime, l'accoppiamento di fluttuazioni di pressione e rilascio di calore genera una concentrazione dell'emissione sonora attorno ad una o più frequenze particolari. Al contrario, nel regime stabile di combustione, detto *rumore di combustione*, le fluttuazioni sono caratterizzate da una emissione a banda larga, distribuita cioè su un ampio intervallo di frequenze

L'influenza dell'idrogeno su tali comportamenti e la ricerca di precursori dell'instabilità, cioè riuscire a determinare con sufficiente anticipo l'insorgenza di tale instabilità attraverso la definizione di alcuni indicatori facilmente misurabili, è attualmente oggetto di studio nella comunità scientifica della combustione ed è lo scopo del presente studio.

In particolare sono state effettuate misure di pressione, tramite microfoni, e di emissione spontanea, chemiluminescenza, registrate con fotodiodi. I segnali così acquisiti, sono analizzati tramite tecniche tipiche dell'analisi caotica e filtri wavelet per misurare il grado di ricorrenza, il quale può fornire un indice sintetico capace di individuare la transizione da rumore di combustione, equivalente ad un funzionamento stabile ed ottimo di un bruciatore, a quello di instabilità termoacustica, regime critico che può portare malfunzionamenti nei dispositivi e aumentare le emissioni di inquinanti nell'atmosfera.

Questo tipo di transizione è stata inoltre riscontrata attraverso le variazioni di topologia del fronte di fiamma ottenute tramite la misura della fluorescenza indotta (LIF) sul radicale OH, capace di individuare la posizione istantanea del fronte di fiamma.

1 Introduzione

La sempre maggiore richiesta di riduzione di emissioni inquinanti prodotte dai processi di combustione e la necessità di convertire l'eccesso di energia proveniente dalle fonti rinnovabili, ha attratto l'attenzione della ricerca su vettori energetici gassosi come l'idrogeno e idrocarburi arricchiti con idrogeno. Se da un lato la combustione dell'idrogeno o di miscele di idrogeno e idrocarburi può effettivamente portare ad una riduzione della anidride carbonica emessa in atmosfera, dall'altro, l'eccesso di concentrazione di idrogeno porta sicuramente ad un innalzamento delle temperature di combustione con conseguente produzione per via termica dei nocivi ossidi di azoto. Quest'ultimo inconveniente può essere evitato, bruciando queste miscele reagenti in grande eccesso d'aria, o combustione magra. Infatti, l'aggiunta di idrogeno permette una estensione dei limiti di infiammabilità rispetto a quelli ottenibili dalle miscele con solo idrocarburi. In questa situazione però, l'estrema diffusività in massa della molecola di idrogeno, dovuta alle sue piccole dimensioni, rispetto ai più pesanti idrocarburi e all'ossigeno, si traduce in un numero di Lewis (definito come il rapporto tra la diffusione termica e quella in massa) minore dell'unità, il quale è stato dimostrato, sia teoricamente che sperimentalmente, avere un enorme impatto sui regimi di combustione.

Miscele reagenti caratterizzate da un numero di Lewis minore dell'unità hanno come conseguenza l'insorgenza di diversi tipi di instabilità: quella termodiffusiva, caratterizzata dalla formazione di strutture di piccola scala e di grande curvatura, dell'ordine di pochi spessori di fiamma (spessore termico), che assumo l'aspetto di piccole corrugazioni affusolate che si protendono verso i prodotti di combustione; l'instabilità idrodinamica, simile nella forma delle corrugazioni del fronte di fiamma a quella termodiffusiva, ma di dimensioni maggiori (10-20 spessori di fiamma) e con un risvolto anche sul campo fluidodinamico in cui la fiamma è immersa. Tutte e due i tipi di instabilità, da un lato tendono ad aumentare i regimi di combustione (causati da un aumento geometrico dell'estensione della superficie del fronte di fiamma), dall'altro, la particolare forma rastremata delle corrugazioni del fronte (verso i prodotti di combustione) causa una migrazione del combustibile più leggero che, in caso di miscela magra, porta ad un ulteriore smagrimento della miscela riducendo progressivamente l'attività di combustione, fino all'estrema conseguenza di spegnimenti localizzati, laddove le curvature sono più elevate.

Quindi, il primo effetto ha un importante e positivo risvolto ingegneristico, nel senso che l'instabilità aumenta la quantità di combustibile convertito in energia termica nell'unità di tempo e quindi la richiesta di energia da parte dell'utilizzatore può essere soddisfatta in macchine termiche più compatte. Il secondo effetto, invece, causa un aumento degli incombusti rilasciati nell'atmosfera.

Altro tipo di instabilità, in cui l'aggiunta di idrogeno può essere di fondamentale importanza, è quella di tipo termoacustico, in cui una eventuale interferenza costruttiva tra il rilascio di calore e le onde di pressione generate dalle fluttuazioni del rilascio di calore della combustione, ma modulate dalla geometria della camera di combustione, possa portare il sistema combustione-combustore ad avere oscillazioni della temperatura e della pressione interna alla camera, tali da danneggiare la macchina termica stessa o inficiare i processi di combustione, sempre tramite spegnimenti localizzati o globali. L'energia di queste oscillazioni è concentrata attorno ad alcune frequenze isolate. Al contrario, nel regime stabile di combustione, detto *rumore di combustione*, le fluttuazioni sono caratterizzate da una emissione a banda larga, distribuita cioè su un ampio intervallo di frequenze

In particolare le onde di pressione nella camera di combustione perturbano la fiamma e allo stesso tempo la fiamma agisce sull'acustica della camera. Quando le fluttuazioni di pressione e quelle di rilascio di calore sono in fase il loro integrale spazio-temporale è positivo ed è definito *guadagno*. Se il guadagno è maggiore delle perdite acustiche (rappresentate dal membro di destra della disequazione) allora l'energia acustica cresce e il sistema entra in un'instabilità termoacustica. Matematicamente questo viene rappresentato dal criterio di Rayleigh

$$\int p(x, t) q(x, t) dx^3 dt > \int p(x, t) \mathbf{u}(x, t) \cdot \mathbf{n} dS dt$$

Dove p e q sono le fluttuazioni di pressione, integrate per un tempo sufficientemente lungo nel volume dx^3 . Il vettore $u(x,t)$ viene proiettato invece sulla superficie dS e, quando moltiplicato per le fluttuazioni di pressione, rappresenta le perdite di energia acustiche del sistema.

Nel lavoro riportato in questo rapporto ci si è concentrati sull'analisi dell'insorgenza delle instabilità termoacustiche utilizzando un bruciatore, denominato ROMULUS, e sviluppato precedentemente. La fiamma, in questo dispositivo, viene stabilizzata all'efflusso della miscela reagente da un foro rettangolare di sezione 3x10 mm, realizzando quello che viene definito *slot burner* in cui la fiamma ha caratteristiche di periodicità statistica lungo la direzione maggiore del foro. In altre parole, la fiamma media viene replicata uguale a sé stessa lungo questa direzione, almeno nella zona centrale del bruciatore dove effetti di bordo sono da escludere. In aggiunta alla fiamma principale, sono realizzate due fiamme pilota il cui scopo è quello di creare dei punti di innesco caldi per la miscela reagente, in modo da mantenere la fiamma principale ancorata all'uscita del getto e non essere spazzata via dalla velocità di efflusso della miscela. Completa il dispositivo un tubo a sezione rettangolare in quarzo che isola la fiamma principale e le due fiamme pilota dall'atmosfera esterna, oltre che a garantire un accesso ottico per le misure di tipo spettroscopico. In questa configurazione, le due fiamme pilota si trovano a bruciare confinate tra le pareti in quarzo della camera di combustione e la fiamma principale. Questo fa sì che in certi regimi di efflusso, dati dalla somma della portata in massa del combustibile (propano) e del comburente, si instauri un regime di instabilità termoacustica con la tipica emissione di un fischio udibile ad una frequenza di circa 700 Hz.

Si dimostrerà che questa instabilità si ripercuote anche sulla fiamma principale, modificandone la struttura topologica, in particolare quanto il tenore di idrogeno è maggiore. Questi effetti saranno rilevati tramite l'analisi dei campi di concentrazione del radicale OH, tra i principali intermedi di combustione, la cui maggior velocità di creazione è localizzata all'interno del fronte di fiamma. La concentrazione di tale molecola è misurata tramite la fluorescenza rilasciata a valle di una eccitazione energetica fornita da una luce laser nella banda degli UV, più precisamente a 283 nm.

Inoltre, nel regime instabile si è detto che il sistema possiede delle frequenze tipiche di oscillazione, rilevabili sia acusticamente sia attraverso l'emissione spontanea dovuta ad effetti chemiluminescenti. Tali frequenze diventano via via predominanti man mano che si procede da un regime stabile detto di rumore di combustione, ad uno termoacusticamente instabile.

Saranno quindi misurate sia l'emissione luminosa, con un fotodiodo, sia il livello di pressione sonora, con un microfono, tutti posti nelle vicinanze della camera di combustione, partendo da una miscela di aria e metano con aggiunte crescenti di idrogeno.

Un'analisi basata sui concetti della teoria del caos misurerà le ricorrenze di alcuni comportamenti statistici della fiamma, sia attraverso i microfoni che l'emissione luminosa, il cui scopo finale è l'estrazione di indici sintetici capaci di definire quanto un sistema è lontano dalla situazione di instabilità.

L'ultima tecnica di analisi, basata su filtraggi di tipo wavelet, evidenzierà le scale temporali in cui l'energia luminosa o di pressione è maggiormente concentrata.

Questo tipo di analisi differisce da quella classica spettrale nel dominio di Fourier, in quanto la trasformata di Fourier, eliminando la dipendenza dal tempo, è più adatta a segnali di tipo statisticamente stazionario e non riesce ad estrarre fenomeni transitori di breve durata eventualmente presenti nei segnali e di cui la transizione all'instabilità termoacustica sembra essere così ricca.

Per comprendere meglio la differenza tra trasformata di Fourier e wavelet, possiamo pensare ad un pentagramma con una serie di note, come in uno spartito musicale in cui allo scorrere del tempo le note di diversa tonalità si susseguono. La trasformata di Fourier non fa altro che selezionare ogni rigo del pentagramma e contare la quantità totale delle note dello stesso tipo. Il coefficiente di Fourier così definito, rappresenta l'energia del segnale a una determinata frequenza ed è solo, quindi, funzione della frequenza: $c(f)$. La trasformata wavelet invece è capace di evidenziare, sempre su ogni rigo, l'eventuale raggruppamento, in un intervallo ristretto di tempo, di note simili e riportare su un diagramma, detto spettrogramma, l'andamento nel tempo di questa concentrazione di note; questo per ogni rigo del

pentagramma. In questo caso il coefficiente wavelet rappresenterà l'energia del segnale ad una certa scala temporale al variare del tempo, $w(r, t)$. Per questo motivo, la trasformata wavelet è più indicata nell'analisi di segnali con una forte componente intermittente, in cui oscillazioni transienti appaiono in maniera più o meno caotica.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Nella linea di attività WP3-LA25 "Integrazione P2G/sistemi generazione elettrica innovativi: fuel-flexibility – realizzazione e test sezione H2-AGATUR e sperimentazione ROMULUS" è previsto che saranno condotte analisi delle possibili instabilità di combustione derivanti dalla variabilità di composizione del combustibile attraverso attività sperimentali sul bruciatore ROMULUS. L'indagine sperimentale utilizzerà sistemi di diagnostica laser (LIF, Laser Induced Fluorescence) e di monitoraggio ottico e acustico (ODC -fotodiodi, microfoni). I segnali sperimentali saranno analizzati con metodologie basate su filtraggio wavelet o analisi caotica.

Questa sezione sarà quindi organizzata in questo modo: *i)* descrizione dell'apparato sperimentale e delle linee di alimentazione del combustibile e comburente; *ii)* analisi della concentrazione del radicale OH per la definizione della topologia del fronte di fiamma; *iii)* Introduzione ai concetti del filtraggio wavelet e dell'analisi caotica. La comparazione dei risultati ottenuti con le diverse tecniche verrà affrontato nelle conclusioni.

2.1 Apparato sperimentale e tipologia di alimentazione

Nell'immagine riportata in nella Figura 1 è visibile il bruciatore Romulus nel suo insieme: la camera di combustione in quarzo, lo *slot* rettangolare (di misura 10 x 3 mm) da cui esce la miscela reagente e a cui è ancorata la fiamma principale e le due fiamme pilota caratterizzate da due griglie di fori circolari da cui esce la miscela reagente e che manterrà la fiamma ancorata all'uscita dello *slot*.

E' possibile notare le due cavità in cui bruciano le fiamme pilota delimitate dalle griglie forate, dalle pareti in

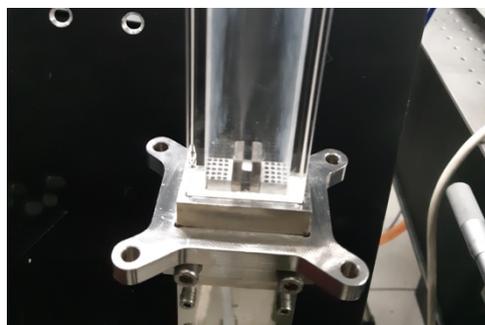


Figura 1 Immagine d'insieme del bruciatore.

acciaio del bruciatore principale (*slot*) e dalle pareti della camera in quarzo.

Il corpo del bruciatore è in acciaio inossidabile ricavato dal pieno. Al suo interno sono presenti dei canali per l'adduzione della miscela combustibile della fiamma principale e delle due pilota.



Figura 2 Immagine della fiamma principale e delle due fiamme pilota. Nella foto è stata rimossa temporaneamente la camera di combustione in quarzo.

Nella Figura 2 è ripreso il bruciatore in funzione. Sono ben visibili la fiamma principale e le due fiamme pilota ai lati.

Le quantità di gas per realizzare la combustione nei vari regimi sono gestite attraverso dei flussimetri in massa capaci di mantenere costante la quantità di gas impostato. Sono presenti cinque flussimetri in totale: due per l'aria comburente della fiamma principale e della pilota, uno per il metano della fiamma principale, uno per il propano della fiamma pilota ed infine uno per l'idrogeno che verrà miscelato con il metano.

Nella **Error! Reference source not found.** sono riportati i parametri principali per due fiamme esemplificative. Nel resto del documento saranno inseriti i parametri delle fiamme realizzate ed analizzate.

Tabella 1 Parametri caratteristici delle fiamme realizzate. Le portate sono espresse in millilitri normali al minuto.

Metano	Aria	Propano	Aria Pilota	Idrogeno	T ad	ϕ	R.S. miscela	X % H2	ϕ Pilota	Le eff	Vel Bulk (m/s)	Re	Vel Pilot (m/s)
1550	14810	330	7000	0	2230	1,0	0,058	0	1,1	1,11	9,2	4226	1,3
1250	14890	330	7000	1250	2261	1,0	0,052	50	1,1	0,93	9,1	4203	1,3

In funzione del numero di Reynolds della fiamma, del rapporto di equivalenza ϕ , e della frazione molare di idrogeno (X), vengono calcolate le portate di combustibile e comburente della fiamma principale. Il numero di Reynolds è definito come il prodotto della velocità del fluido per una lunghezza caratteristica che in questo caso è il raggio idraulico dello slot rettangolare di misura 10 x 3 mm. La frazione molare dell'idrogeno nella miscela metano idrogeno è definita come

$$X_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2} + n_{CH_4}}$$

dove n_i è il numero di moli del i -esimo combustibile. Analogamente viene definita la frazione molare del metano, definita come complemento a uno di quella dell'idrogeno, $X_{CH_4} = 1 - X_{H_2}$.

In maniera analoga sono definite le portate di combustibile (propano) e comburente (aria) delle due fiamme pilota.

Da notare che il rapporto di equivalenza stechiometrico, che indica la quantità esatta di ossigeno necessario per ossidare tutto il combustibile, varia al variare della frazione molare di idrogeno seguendo la seguente relazione:

$$\phi_{st} = \frac{W_{CH_4} + X_{H_2} (W_{H_2} - W_{CH_4})}{(W_{O_2} + 3.762 W_{N_2})(2 - 1.5 X_{H_2})}$$

Le successive configurazioni analizzate avranno come riferimento un numero di Reynolds di circa 5000 e 10000. In tali regimi si è verificato che il rapporto di equivalenza minimo affinché si abbia la presenza di

fiamma in camera di combustione sia di circa 0.5 per tutti i tenori di idrogeno realizzati: da metano puro fino ad idrogeno puro. Il limite opposto, cioè il rapporto di equivalenza massimo ottenibile non è stato indagato, in quanto superiore a 1.5-2, corrispondente a miscele molto grasse che non sono di interesse applicativo, visto l'elevato tenore di incombusti emessi in atmosfera.

2.2 Analisi della fluorescenza

La struttura del fronte di fiamma può essere visualizzata attraverso la misura della concentrazione del radicale OH. Le specie radicaliche sono quelle molecole che presentano un elettrone non appaiato, secondo il principio di Pauli. Tale elettrone non accoppiato, rende la specie radicalica estremamente reattiva, capace di sottrarre un elettrone ad altre molecole vicine o a altri radicali.

Il radicale OH è uno dei prodotti intermedi della combustione la cui concentrazione subisce un brusco aumento all'interno dello spessore termico 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 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 Tabella 2 sono riportati i parametri fondamentali delle fiamme utilizzate per l'analisi della fluorescenza del radicale OH al fine di evidenziare la topologia del fronte di fiamma. Il radicale OH possiede un andamento asimmetrico rispetto al fronte di fiamma: è praticamente assente nella miscela incombusta e cresce repentinamente all'interno del fronte di fiamma, soprattutto nella zona ristretta del *inner layer* dove il suo gradiente è massimo, per poi rimanere sostanzialmente costante nella zona dei prodotti di combustione. In tal modo è possibile stabilire la posizione del fronte di fiamma, seguendo le zone a massimo gradiente.

Tabella 2 Parametri fiamme per l'analisi della fluorescenza.

	Metano	Aria	Propano	Aria Pilota	Idrogeno	T ad	ϕ	R.S. miscela	X % H2	ϕ Pilota	Le eff	Vel Bulk (m/s)	Re	Vel Pilot (m/s)	
1	1550	14810	330	7000	0	2230	1,0	0,058	0	1,1	1,11	9,2	4226	1,3	S
2	1250	14890	330	7000	1250	2261	1,0	0,052	50	1,1	0,93	9,1	4203	1,3	S
3	954	15140	330	7000	0	1666	0,6	0,058	0	1,1	1,05	9,2	4226	1,3	S
4	766	15190	330	7000	766	1698	0,6	0,052	50	1,1	0,76	9,2	4211	1,3	S
5	400	15290	330	7000	2259	1750	0,6	0,041	85	1,1	0,59	9,1	4183	1,3	S
6	797	30580	330	7000	4517	1750	0,6	0,041	85	1,1	0,59	18,2	8367	1,3	S
7	0	30797	330	7000	7761	1810	0,6	0,029	100	1,1	0,51	18,1	8306	1,3	i

Nella Tabella 2, la prima colonna identifica le diverse fiamme, mentre l'ultima indica con una "s" le fiamme stabili e con un "i" le fiamme instabili, con una emissione sonora nel campo dell'udibile: un fischio.

Le prime due fiamme hanno un rapporto di equivalenza della fiamma principale sostanzialmente stechiometrico ed un numero di Reynolds di circa 5000. La prima brucia metano puro, mentre la seconda ha un numero di moli di idrogeno pari a quello del metano. In questo intervalli di parametri il numero di Lewis si mantiene attorno a valori 0.9-1.1.

Le fiamme 3, 4, 5 posseggono lo stesso numero di Reynolds, ma il rapporto di equivalenza scende a 0.6 per studiare l'effetto dell'idrogeno su fiamme magre. Il numero di Lewis è di poco superiore ad 1 per la fiamma 3 di puro metano, uguale a 0.8 per la fiamma 4 con una percentuale

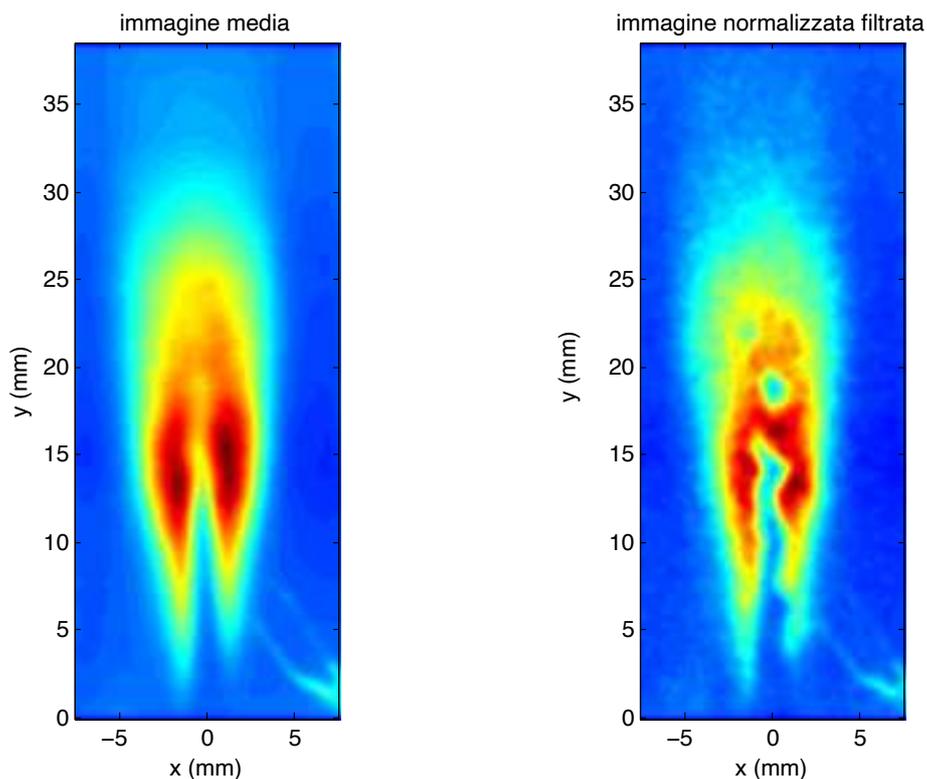


Figura 3 Fiamma esperimento 1. Sinistra, fiamma media. Destra, fiamma istantanea.

di idrogeno del 50%, per scendere fino ad un valore intorno a 0.55 per la fiamma 5 con una percentuale di idrogeno del 85%. Nelle fiamme 6, 7 il numero di Reynolds è stato raddoppiato per aumentare le corrugazioni del fronte di fiamma. La fiamma 6 è caratterizzata da una grande quantità in volume di idrogeno, pari al 85% della frazione molare e il rapporto di equivalenza si mantiene basso, ad un valore sempre pari a 0.6. Quando il tenore di idrogeno sale al 100% come nella fiamma 7, cioè fiamma di puro idrogeno (assenza di metano), le condizioni sono tali che la fiamma transisce in un regime di instabilità termoacustica con l'emissione di un fischio udibile. In tutte le altre configurazioni la fiamma si mantiene in un regime stabile, detto rumore di combustione, in cui l'emissione sonora è a banda larga e quello che si percepisce è una sorta di brusio. Da notare la temperatura di combustione, detta anche temperatura adiabatica di fiamma (T_{ad} , nella settima colonna della Tabella 2), che cresce notevolmente con l'aumento del tenore di idrogeno.

Nella Figura 3 (esperimento 1) e Figura 4 (esperimento 2) sono rappresentate le immagini medie, ottenute mediando 100 immagini istantanee, sulla sinistra e una immagine rappresentativa istantanea sulla destra. Da notare che le immagini istantanee sono indicate con il titolo "immagine normalizzata filtrata" ad indicare un filtraggio spaziale dell'immagine per eliminare rumore ad alta frequenza ed una normalizzazione col valore massimo della fluorescenza in modo che i valori dell'immagine oscillino tra 0 e 1. Il parametro principale che varia è il tenore di idrogeno, nullo nella prima figura e del 50% nella seconda. Entrambe gli esperimenti sono stati condotti ad un rapporto di equivalenza sostanzialmente unitario, cioè

stechiometrico. È possibile osservare la variazione della concentrazione del radicale OH da nullo nei reagenti (colore blu, in figura) fino ad un massimo, nei prodotti di combustione (colore rosso). Il fronte di fiamma istantaneo è riconoscibile nelle figure di destra in corrispondenza della repentina variazione spaziale della concentrazione, con una variazione repentina nello spazio dei colori verde-giallo-rosso, ad indicare un forte gradiente spaziale. L'aggiunta di idrogeno ha una notevole influenza sulla altezza di fiamma media che viene ridotta nella miscela idrogeno-metano. Anche la fiamma istantanea risulta più corta e corrugata.

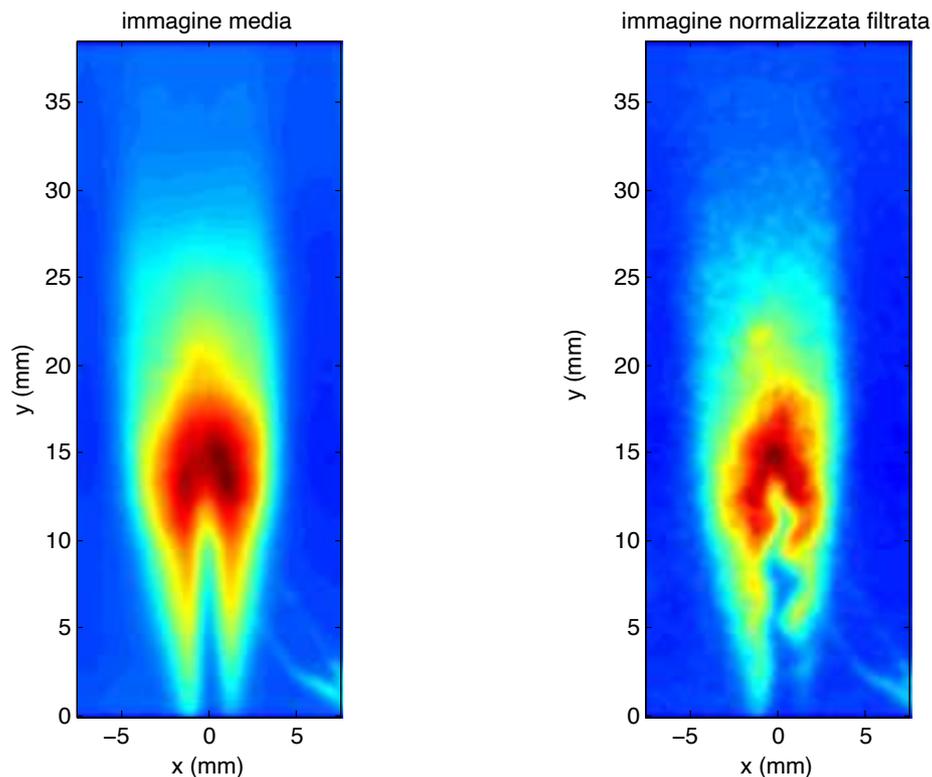


Figura 4 Fiamma esperimento 2. Sinistra, fiamma media. Destra, fiamma istantanea.

Le fiamme medie relative gli esperimenti 3, 4, 5 sono rappresentate nella Figura 5. Nella prima fiamma il tenore di idrogeno è nullo per salire al 50% e al 80% nelle altre due fiamme. L'elevato eccesso d'aria (rapporto di equivalenza pari a 0.6) rallenta notevolmente la velocità di propagazione del fronte di fiamma. Questo effetto rende la fiamma non più conica, ma cilindrica. Anche in questo caso l'aumento del tenore di idrogeno tende a modificare la struttura della fiamma, sia istantanea (Figura 6) che media, soprattutto quando il tenore di idrogeno è considerevole, come nell'ultimo caso con 85% di idrogeno in volume.

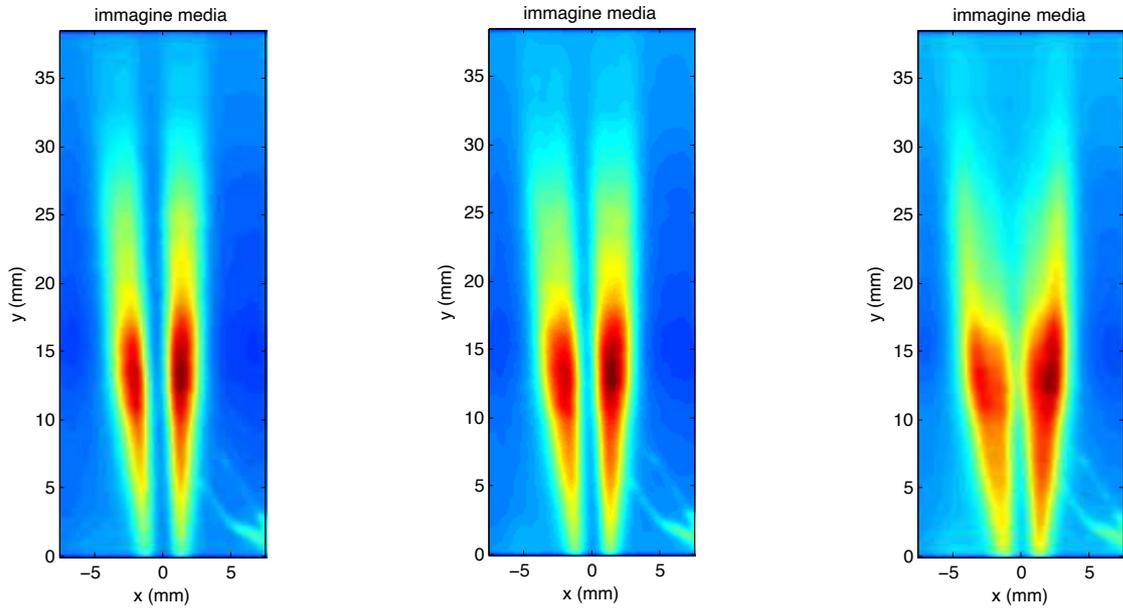


Figura 5 Fiamme medie relative agli esperimenti 3, 4, 5 da sinistra verso destra. Rapporto di equivalenza magro pari a 0.6 e tenore crescente di idrogeno, da sinistra verso destra, metano puro, 50% e 85% di idrogeno.

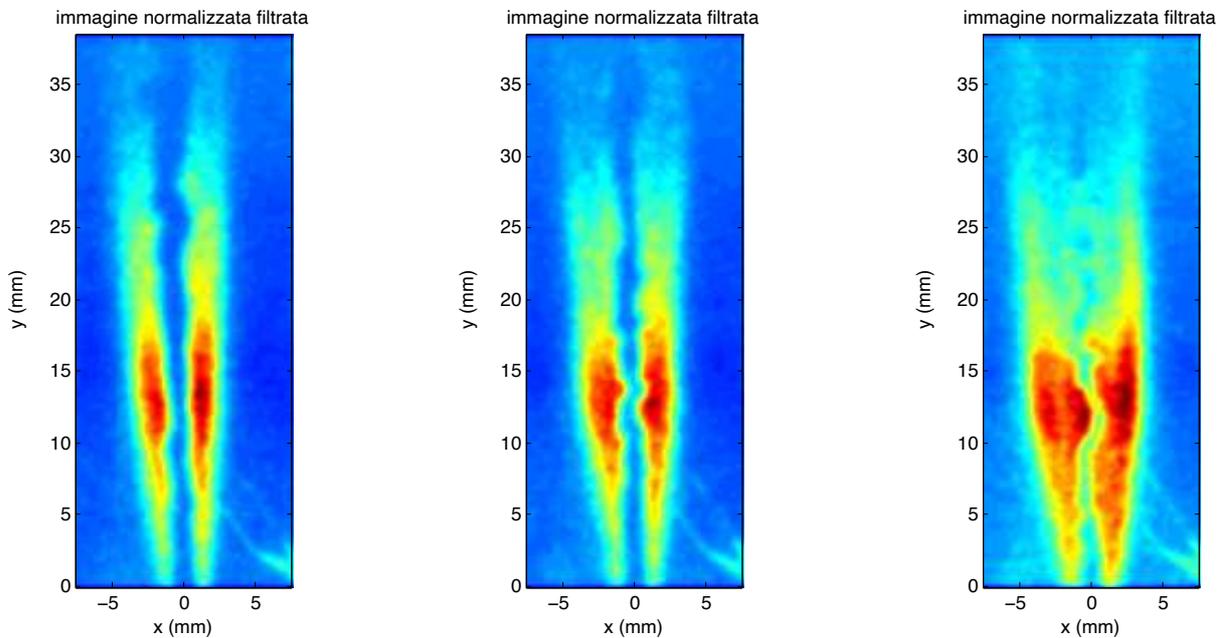


Figura 6 Fiamme istantanee relative agli esperimenti 3, 4, 5 da sinistra verso destra. Rapporto di equivalenza magro pari a 0.6 e tenore crescente di idrogeno, da sinistra verso destra, metano puro, 50% e 85% di idrogeno.

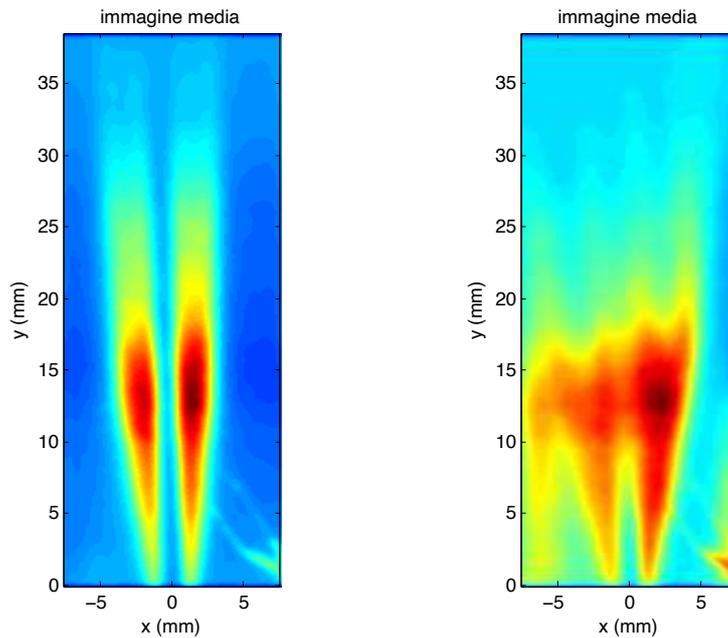


Figura 7 Fiamme medie relative agli esperimenti 6,7 da sinistra verso destra. Rapporto di equivalenza magro pari a 0.6 e tenore crescente di idrogeno, da sinistra verso destra, 85% e 100% di idrogeno. Il numero di Reynolds è stato raddoppiato rispetto alle fiamme precedenti, vedi Tabella 2 per maggiori dettagli.

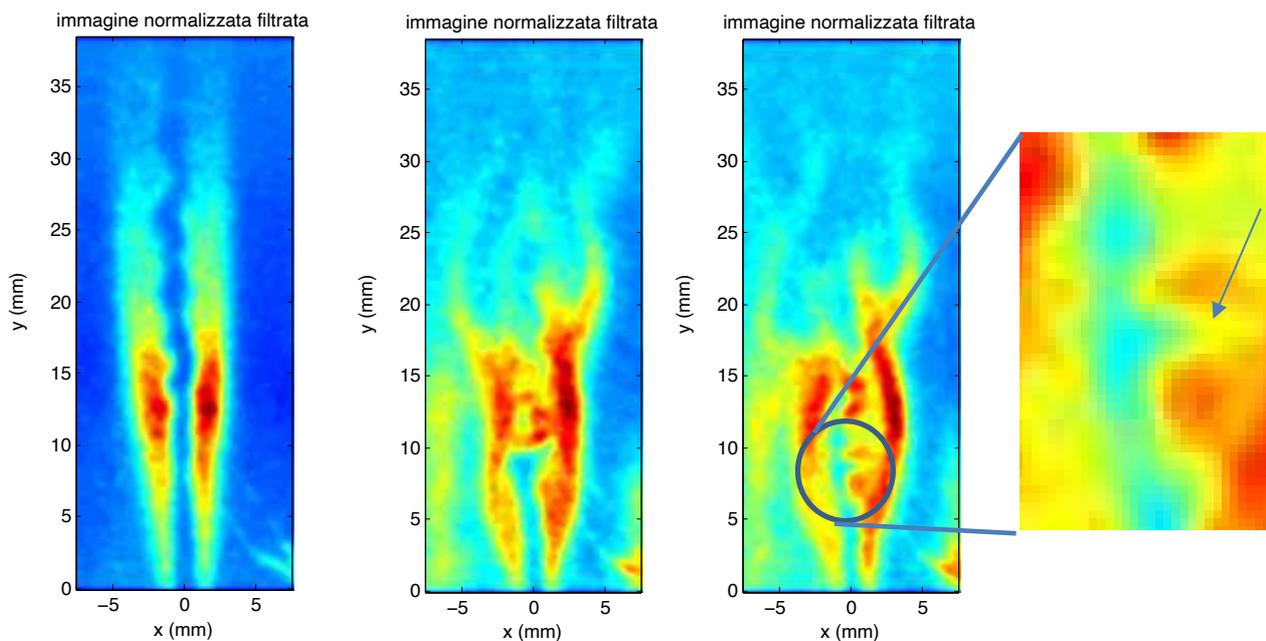


Figura 8 Sinistra fiamma istantanea dell'esperimento 6. Seconda e terza fiamma, due diversi istanti dell'esperimento 7. Nell'ultima immagine è visibile uno spegnimento localizzato, indicato dalla freccia che rappresenta un ingrandimento di quello cerchiato nella immagine precedente.

Negli esperimenti 6 e 7 il numero di Reynolds viene raddoppiato per ottenere fiamme più turbolente e quindi con una maggiore corrugazione del fronte di fiamma. Il rapporto di equivalenza rimane magro pari a 0.6, e il tenore di idrogeno è rispettivamente del 85% e 100%. L'emissione di un fischio udibile (nelle sezioni 2.3 e successive verranno analizzate le frequenze di queste emissioni sonore) indica che la fiamma di puro idrogeno è transita in un regime di instabilità termoacustica. La Figura 7 mostra chiaramente come la struttura media del fronte di fiamma sia profondamente modificata dall'aumento del tenore di idrogeno, ma evidenti segni dell'instabilità termoacustica non sembrano esserci. Per riscontrare l'effetto dell'instabilità termoacustica bisogna riferirsi alle immagini istantanee del fronte di fiamma e della distribuzione del radicale OH, come in Figura 8. In questa figura, si nota nei due pannelli centrali, riferiti all'esperimento 7, che la distribuzione del radicale OH assume una forma ondeggiante e simmetrica rispetto all'asse del bruciatore, come se l'instabilità termoacustica agisse come una forzante sulla dinamica del fronte di fiamma. Questa particolare simmetria non è visibile in assenza di forzante termoacustica, come nel primo pannello della Figura 8, relativo all'esperimento 6. Un ulteriore effetto della presenza massiccia dell'idrogeno può essere riscontrato nell'ultimo pannello della figura. In questo caso gli effetti di diffusione preferenziale dovuti al basso valore del numero di Lewis della miscela ($Le = 0.5$, vedi Tabella 2) si riflettono in un esempio di spegnimento localizzato in prossimità di un elevato valore di curvatura del fronte. In figura la zona di spegnimento localizzato, evidenziata da una freccia, mostra una minore concentrazione del radical OH (livelli di colore giallo), mentre ai lati la concentrazione sale a livelli maggiori, testimoniato dal colore rosso in figura.

2.3 Filtraggio wavelet

Come già introdotto nella sezione di introduzione, la trasformata wavelet permette l'identificazione delle strutture coerenti nei segnali mediante una rappresentazione tempo frequenza detta scalogramma. La trasformata wavelet è ottenuta mediante proiezione del segnale sulla una base compatta, $\Psi(t)$, i.e. localizzata nel tempo. Saranno quindi analizzati i segnali di pressione ed emissione luminosa spontanea (chemiluminescenza). Formalmente la trasformata di un segnale di fluttuazione di pressione $p(t)$ alla scala τ è data dalla seguente espressione.

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

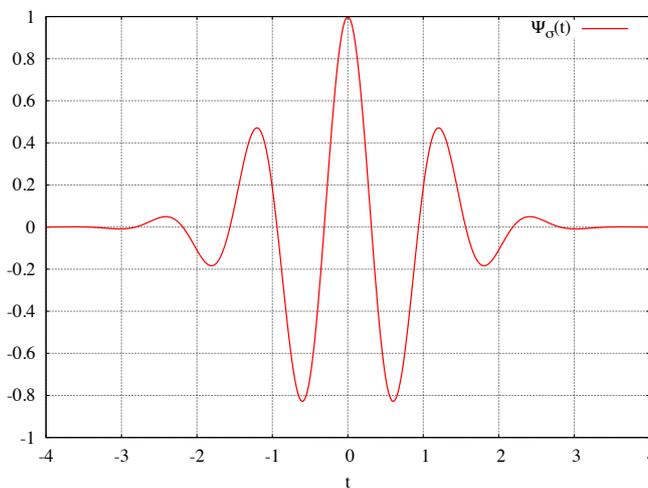


Figura 9 Mother wavelet di tipo Morlet.

Dove C_{Ψ} è un coefficiente legato al valore medio $\Psi(t)$ detta *mother wavelet*. In particolare la mother wavelet può essere scelta tra diverse forme per meglio adattarsi alla natura del segnale. In questo caso, essendo la transizione all'instabilità termoacustica guidata dalla presenza sempre più massiccia di particolari strutture dette *wave pocket* che assumono la forma di sinusoidi modulate da una gaussiana, la mother wavelet più indicata è quella detta di *Morlet* (definita infatti come la modulazione di una sinusoide con una gaussiana) rappresentata nella Figura 9. La forma madre, o mother wavelet, può essere dilatata o contratta nel tempo dal parametro r e traslata temporalmente lungo il segnale tramite la variabile τ .

Tabella 3 Parametri fiamme per l'analisi wavelet. In queste configurazioni le portate di combustibile e comburente nella fiamma pilota sono tali che il sistema risulta nel regime stabile di rumore di combustione.

exp	Metano	Aria	Propano	Aria Pilota	Idrogeno	T ad	Phi	R.S. miscela	X % H2	Phi Pilota	Le eff	Vel Bulk (m/s)	Re	Vel Pilot (m/s)
0	1550	14810	330	7000	0	2230	1,0	0,058	0	1,1	1,11	9,2	4226	1,3
20	1470	14830	330	7000	370	2240	1,0	0,057	20	1,1	1,03	9,2	4220	1,3
40	1340	14860	330	7000	890	2250	1,0	0,054	40	1,1	0,99	9,1	4208	1,3
50	1250	14890	330	7000	1250	2261	1,0	0,052	50	1,1	0,93	9,1	4203	1,3
60	1140	14920	330	7000	1710	2280	1,0	0,05	60	1,1	0,89	9,1	4194	1,3

Tabella 4 Parametri fiamme per l'analisi wavelet. In queste configurazioni le portate di combustibile e comburente nella fiamma pilota sono tali che il sistema risulta nel regime termoacusticamente instabile.

exp	Metano	Aria	Propano	Aria Pilota	Idrogeno	T ad	Phi	R.S. miscela	X % H2	Phi Pilota	Le eff	Vel Bulk (m/s)	Re	Vel Pilot (m/s)
0	1550	14810	450	10700	0	2230	1,0	0,058	0	1,0	1,11	9,2	4226	2,0
20	1470	14830	450	10700	370	2240	1,0	0,057	20	1,0	1,03	9,2	4220	2,0
40	1340	14860	450	10700	890	2250	1,0	0,054	40	1,0	0,99	9,1	4208	2,0
50	1250	14890	450	10700	1250	2261	1,0	0,052	50	1,0	0,93	9,1	4203	2,0
60	1140	14920	450	10700	1710	2280	1,0	0,05	60	1,0	0,89	9,1	4194	2,0

Nella Tabella 3 e sono riportati i parametri principali delle fiamme utilizzate per l'analisi wavelet. I parametri fissi sono il numero di Reynolds, e il rapporto di equivalenza che indica fiamme stechiometriche. Sono state variate le portate di aria, metano e idrogeno in funzione della frazione molare di idrogeno X_{H_2} nella miscela aria metano, in modo da ottenere variazioni che partono da puro metano ($X_{H_2} = 0\%$) fino ad arrivare a $X_{H_2} = 60\%$.

Nella Tabella 4, invece, le portate di combustibile e comburente della fiamma pilota sono state modificate in modo da far transire il sistema nel regime di instabilità termoacustica, con una emissione tonale nel campo dell'udibile: un fischio.

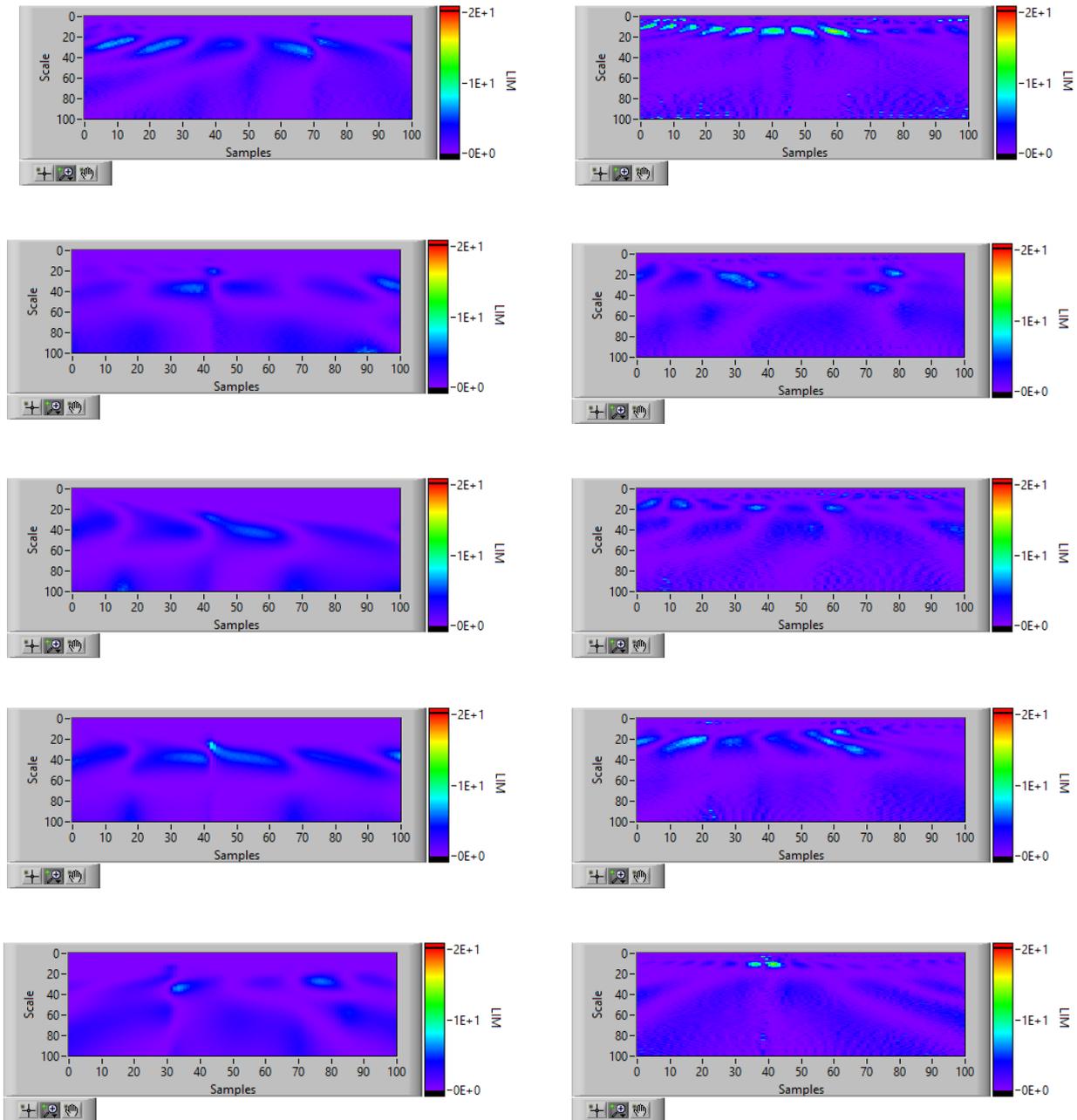


Figura 10 Scalogramma per le diverse configurazioni stabili elencate in Tabella 3. Prima colonna, segnale di chemiluminescenza nella banda del vicino infrarosso (900-2750 nm); seconda colonna, segnale di pressione. In ascissa è riportato il tempo di campionamento espresso in campioni, in ordinata la scala r del coefficiente wavelet $w(r,t)$, mentre i colori indicano il modulo di $w(r,t)$ normalizzato con la sua varianza.

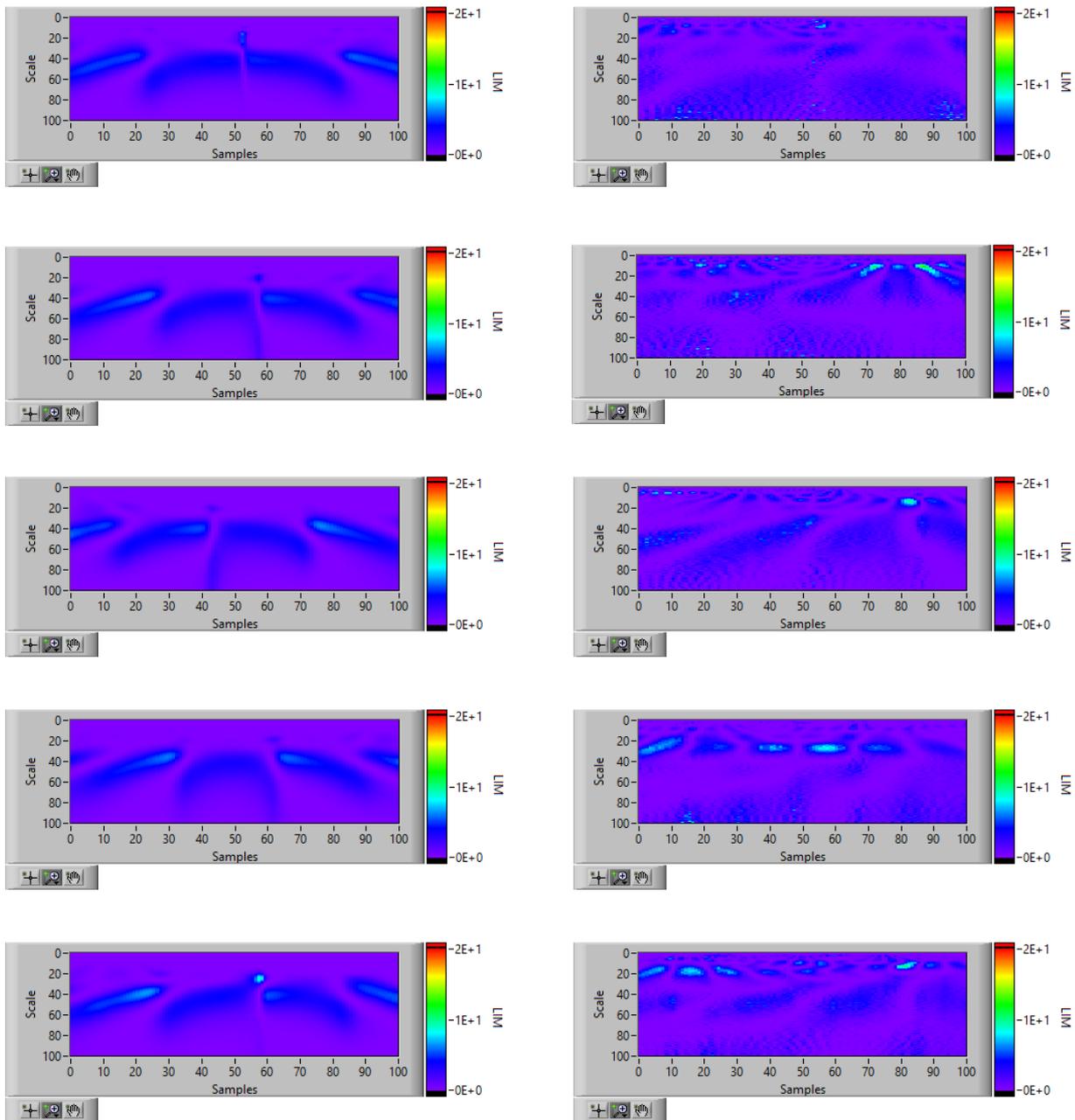


Figura 11 Scalogramma per le diverse configurazioni termoacusticamente instabili elencate in Tabella 4. Prima colonna, segnale di chemiluminescenza nella banda del vicino infrarosso (900-2750 nm); seconda colonna, segnale di pressione. In ascissa è riportato il tempo di campionamento espresso in campioni, in ordinata la scala r del coefficiente wavelet $w(r,t)$, mentre i colori indicano il modulo di $w(r,t)$ normalizzato con la sua varianza.

Gli scalogramma di Figura 10 e Figura 11 rappresentano l'eccesso di energia rispetto al contenuto energetico medio per ogni scala temporale r , indicata in ordinata, al variare del tempo indicato in campioni (*Samples*, in ascissa). Il segnale è stato campionato ad una frequenza di 40 KHz, per cui 100 campioni corrispondono a 2.5 ms. Nelle figure, sia quelle relative alle configurazioni stabili sia quelle instabili, è possibile notare delle concentrazioni massime di energia a scale piccole dell'ordine 20 campioni che corrispondono a 0.5 ms, ma anche presenza di zone ad alta energia nelle scale comprese tra gli 80 e 40 campioni, anche se di magnitudo minore. Si ricorda che la magnitudo del segnale è ottenuta come rapporto tra il modulo del segnale $w(r, t)$ rispetto alla sua varianza alla stessa scala r . Questa dispersione di energia in un intervallo di scale così ampio è compatibile con la dispersione in frequenza sia dell'energia radiante che di quella di pressione tipica del rumore di combustione. Anche nella situazione di instabilità termoacustica,

dove l'energia dei segnali si concentra attorno a frequenze per determinate, la dispersione di energia alle diverse scale persiste. E' da notare inoltre, l'accoppiamento tra i segnali di pressione e di energia radiante, evidenziato dalla corrispondenza delle zone di accumulo di energia nello scalogramma dei due osservabili. L'analisi spettrale, riportata nella Figura 12 e nella Figura 13, conferma l'accoppiamento dei segnali, la presenza di una zona energetica a banda larga tipica del rumore di combustione e l'insorgenza di picchi di energia a frequenze ben definite, intorno ai 400 Hz (nelle situazioni stabili ricche di idrogeno) e 800 Hz (nelle situazioni termoacusticamente instabili), frequenza che dipende anche dalla geometria della camera di combustione, in particolare delle cavità in cui bruciano le due fiamme pilota.

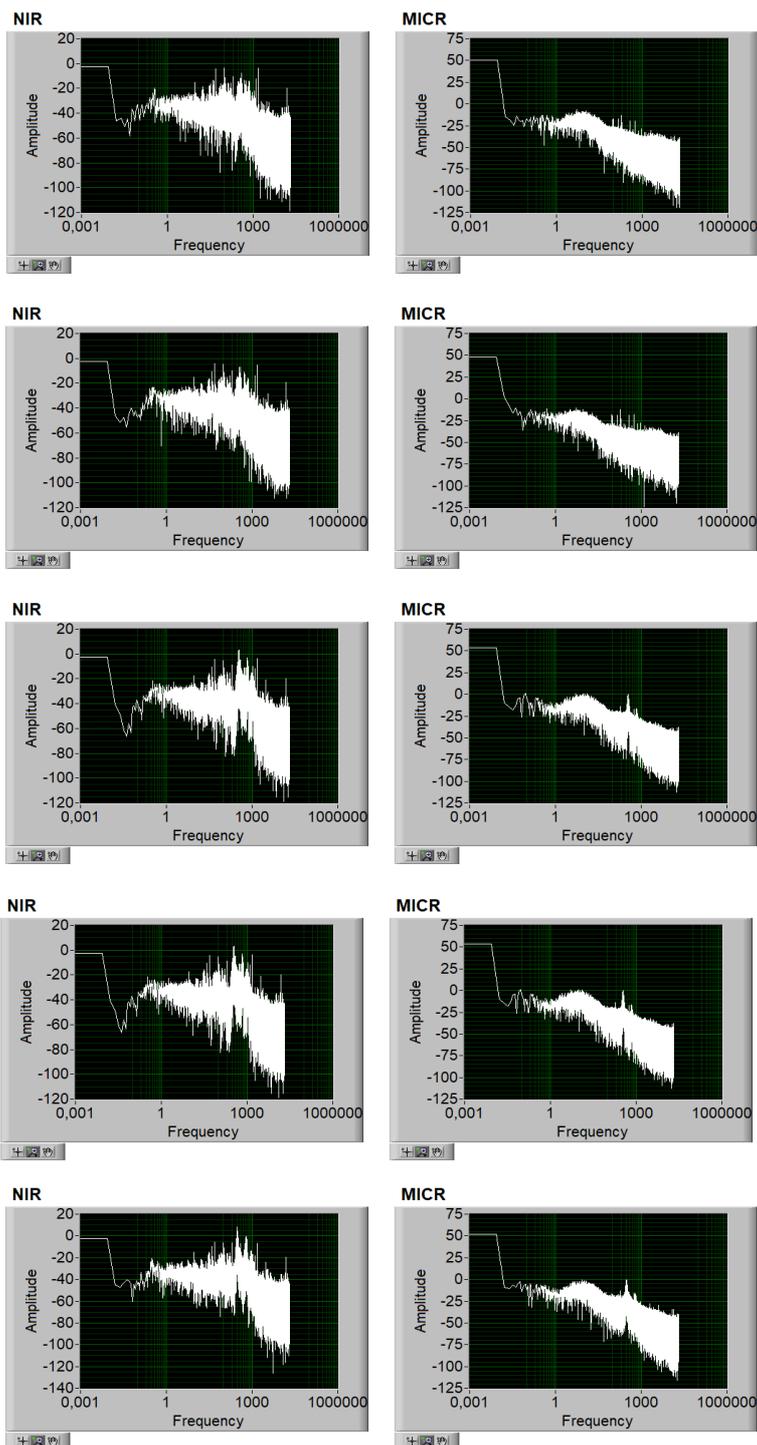


Figura 12 Analisi spettrale fiamme stabili nel regime di rumore di combustione, elencate in Tabella 3. Nella colonna di sinistra sono riportate le emissioni luminose nella banda del vicino infrarosso (900-2750 nm). In quella di destra il segnale registrato dal microfono.

Risulta evidente, inoltre l'effetto dell'aggiunta di idrogeno, soprattutto nelle fiamme stabili, in cui ai tenori del 40% e 60% di idrogeno, lo spettro dell'energia acustica mostra un picco di emissione sonora ad indicare un effetto destabilizzante dell'idrogeno, probabilmente dovuto ad un aumento del rilascio di calore (misurata attraverso l'energia radiante emessa dalla fiamma), il quale favorisce l'accoppiamento costruttivo con l'energia di pressione.

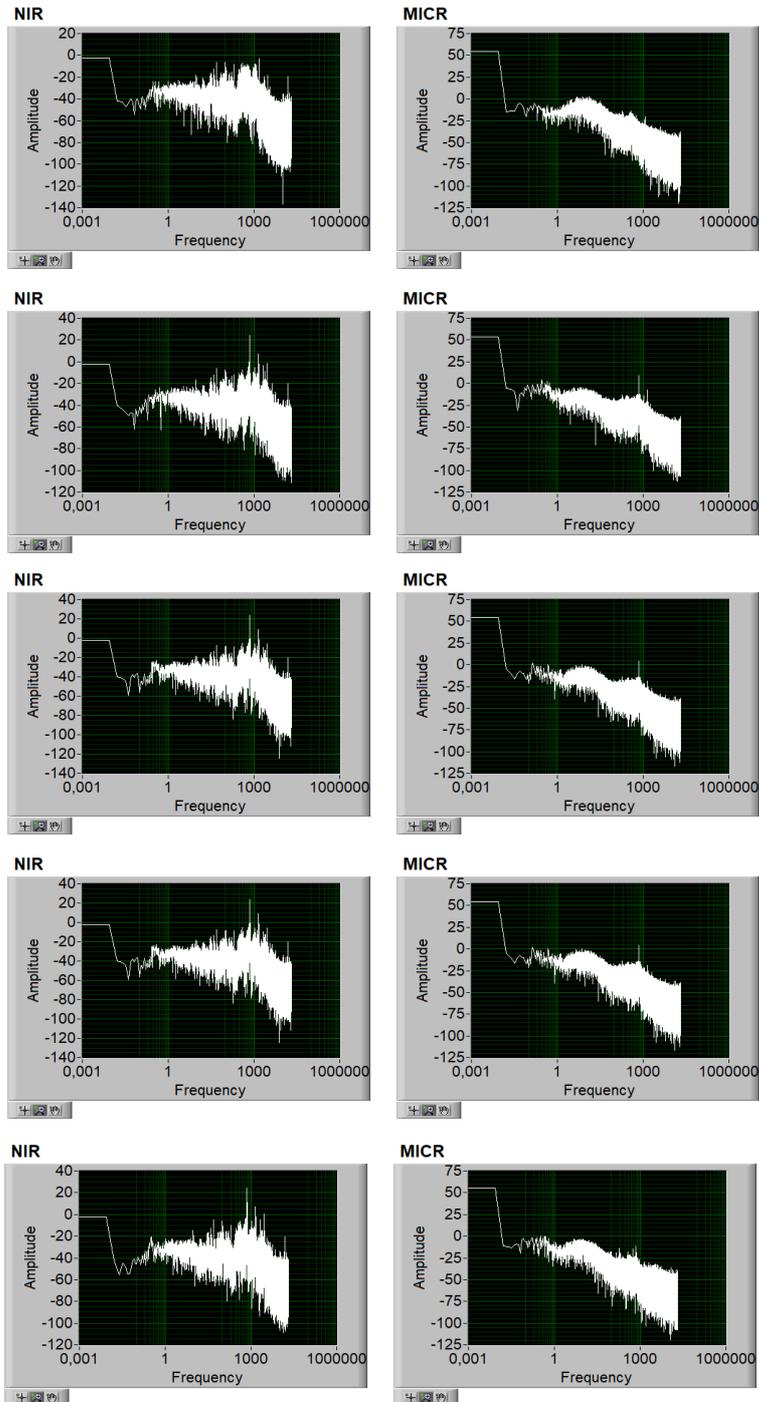


Figura 13 Analisi spettrale fiamme instabili nel regime di instabilità termoacustica, elencate in Tabella 4. Nella colonna di sinistra sono riportate le emissioni luminose nella banda del vicino infrarosso (900-2750 nm). In quella di destra il segnale registrato dal microfono.

2.4 Analisi caotica

In questa sezione sarà affrontata l'analisi dei segnali di pressione e energia radiante mediante tecniche ispirate all'analisi caotica.

L'evoluzione di un sistema complesso rappresentato dall'interazione tra più variabili che ne descrivono lo stato istante per istante, può essere rappresentato su un diagramma multidimensionale (lo spazio delle fasi), in cui il numero di dimensioni dipende dal numero di variabili coinvolte. La registrazione di un segnale unico, implica la proiezione dell'effetto di tutte le variabili che regolano il funzionamento del sistema su di una sola: la pressione o l'emissione luminosa, in questo caso. Sfruttando il teorema di Takens (1980), un segnale unidimensionale nel tempo, $x(t)$, può essere usato per ricostruire le componenti di uno spazio multidimensionale $y(t)$ in cui le variabili sono rappresentate dal singolo segnale $x(t)$ ritardate ad intervalli di tempo successivi e crescenti, in particolare

$$y(t) = (x(t), x(t + \tau_{opt}), \dots, x(t + (d_0 - 1) \tau_{opt})),$$

in cui τ_{opt} è detto tempo di ritardo ottimo e rappresenta la quantità con cui il segnale deve essere ritardato; questa procedura viene ripetuta tante volte quante sono le dimensioni del sistema ed è un numero intero detto *dimensione di incorporamento* d_0 . Il tempo di ritardo ottimo e la dimensione di incorporamento vengono calcolate con opportune tecniche che determinano la prima dalla distanza temporale oltre alla quale l'informazione contenuta nel segnale non si propaga più; la seconda (d_0) viene calcolata considerando la ricostruzione dello spazio delle fasi con il τ_{opt} appena calcolato ed un numero di primo tentativo di dimensione di incorporamento d_0 . A questo punto vengono calcolate le distanze tra punti adiacenti nello spazio delle fasi, e tale operazione viene reiterata con dimensioni d_0 crescenti; quando le distanze tra punti adiacenti non dipendono più dal valore di d_0 , allora si è trovata la minima dimensione che permette una adeguata rappresentazione del fenomeno e viene chiamata dimensione di incorporamento. Ottenuto in questo modo una ricostruzione dello spazio delle fasi, detto in questo caso delle pseudo-fasi, perché ricostruito da un segnale monodimensionale ignorando totalmente la dimensione effettiva del sistema, è possibile calcolare le ricorrenze nelle traiettorie che rappresentano l'evoluzione del sistema. Preso quindi ogni punto nello spazio delle fasi si lascia evolvere il sistema e si calcola il tempo necessario al sistema per ritornare in uno stato prossimo a quello di partenza. Quando ciò accade, l'elemento della matrice (inizialmente costituita da tutti zeri) individuato dalle coordinate corrispondenti al tempo di partenza e al tempo di ritorno, viene indicata con un "1". Alla fine del processo l'attribuzione di un colore nero a tutti gli "1" e del bianco al resto, da luogo a quello che si chiama mappa di ricorrenza binaria (o *Recurrence Plot*), in cui gli elementi neri indicano i tempi di ricorrenza del segnale. L'insieme dei punti neri forma delle figure di ricorrenza in funzione del tipo di dinamica a cui è sottoposta il sistema in evoluzione.

Nella Figura 14 e nella Figura 15 sono riportate le mappe di ricorrenza per l'energia radiante (sinistra) e la pressione (destra) di due configurazioni stabili e instabili, rispettivamente, a due tenori di idrogeno differenti (prima riga, metano puro; seconda riga, 60% di idrogeno). Le configurazioni instabili mostrano una densità di punti ricorrenti (rappresentati dai punti neri) piuttosto bassa, in cui i punti neri sono distribuiti abbastanza omogeneamente nello spazio della figura. Solo nel caso con idrogeno nella miscela, i punti ricorrenti formano delle figure geometriche che si ripetono uguali a sé stesse, come una scacchiera. Questo rappresenta dei pattern di ricorrenza che indicano che anche nel regime di rumore di combustione, esistono delle modalità di funzionamento che hanno una coerenza limitata nel tempo. Si consideri che l'estensione della mappa di ricorrenza è di 1000 campioni che corrisponde ad un tempo di 25 ms. Anche in questo caso le mappe di ricorrenza della pressione e dell'energia radiante hanno delle caratteristiche comuni, ad indicare che esiste una mutua influenza tra rilascio di calore e fluttuazione di pressione.

Quando il sistema entra in instabilità termoacustica, l'accoppiamento tra rilascio di calore e fluttuazione di pressione è preponderante ed oscilla attorno a frequenze ben definite, che sono rappresentate dalle

diagonali nere nelle mappe di ricorrenza. A prima vista, sembrerebbe, che solamente l'energia radiante sia soggetta a questa dinamica, ma ad un'osservazione più attenta anche la pressione presenta delle ricorrenze longitudinali. Per entrambe gli osservabili le distanze tra una diagonale e l'altra corrispondono ad una frequenza di circa 800 Hz, che corrisponde al picco di energia negli spettri di Figura 13.

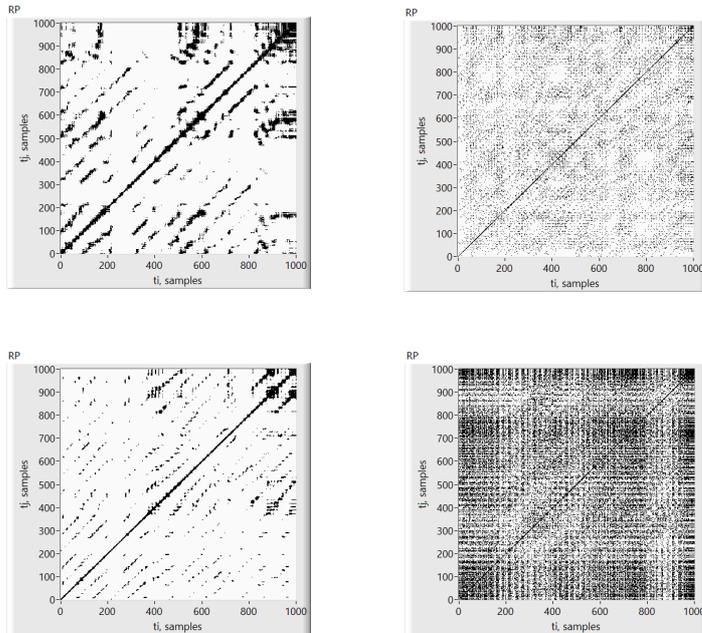


Figura 14 Recurrence plot fiamme stabili riportate in Tabella 3: prima riga, 0% idrogeno; seconda riga 60% di idrogeno. Prima colonna energia radiante, seconda colonna pressione.

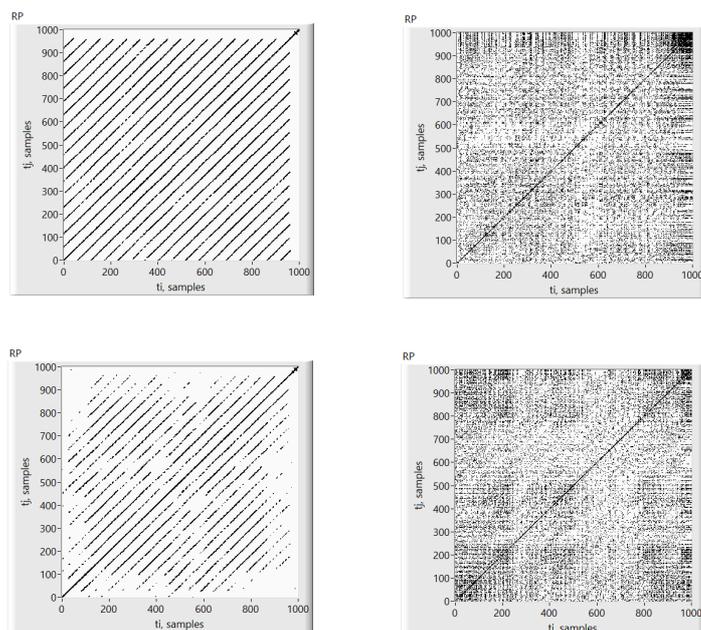


Figura 15 Recurrence plot fiamme instabili riportate in Tabella 4: prima riga, 0% idrogeno; seconda riga 60% di idrogeno. Prima colonna energia radiante, seconda colonna pressione.

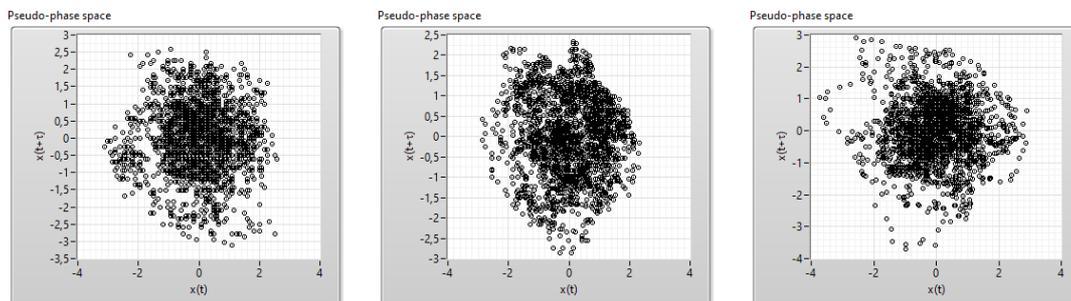


Figura 16 Spazio delle pseudo fasi per le configurazioni stabili 0% (metano puro), 50% e 60% di idrogeno, da sinistra verso destra. Segnale di pressione.

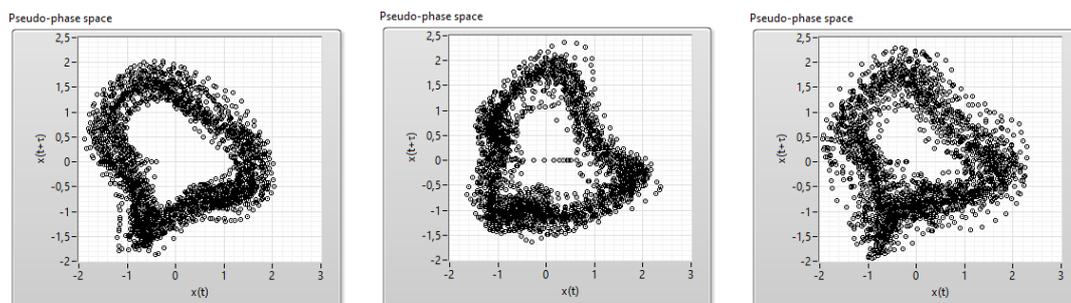


Figura 17 Spazio delle pseudo fasi per le configurazioni instabili 0% (metano puro), 50% e 60% di idrogeno, da sinistra verso destra. Segnale di pressione.

Nella Figura 16 e nella Figura 17 sono rappresentate le configurazioni spaziali delle proiezioni bidimensionali dello spazio delle pseudofasi per i segnali di pressione. Nella prima figura, sono rappresentati gli esperimenti con fiamme stabili con contenuto crescente di idrogeno: metano puro, ossia 0% di idrogeno, 50% e 60% di idrogeno. Nella seconda figura invece le fiamme sono instabili dal punto di vista termoacustico con gli stessi tenori di idrogeno della prima figura. Le fiamme stabili mostrano traiettorie nello spazio delle pseudofasi di tipo non ordinato, anche se l’aggiunta di idrogeno tende a creare alcune orbite circolari, a conferma di un effetto destabilizzante dell’idrogeno nella miscela aria metano.

Le traiettorie delle fiamme instabili invece mostrano chiaramente orbite circolari con elevata ricorrenza, tipiche di oscillazioni periodiche ben precise.

Dalle mappe di ricorrenza, ottenute dall’analisi dello spazio delle pseudo-fasi, possono essere estratti degli indici sintetici basati sulla densità e disposizione delle ricorrenze. Il Recurrence Rate, ad esempio, indica la densità di punti neri nella matrice altrimenti bianca. Più è alta la densità più il sistema si trova in uno stato caotico con poca coerenza: infatti quando il sistema è in instabilità termoacustica (oscillando su frequenze stabilite) i punti neri di ricorrenza si dispongono su sottili diagonali adiacenti e separate da strisce bianche, abbassando drasticamente la densità di punti neri.

Operativamente, la quantificazione dei *Recurrence Plot* (RP) prevede delle misure lungo diagonali. Con questo metodo tutte le diagonali parallele alla diagonale principale sono analizzate separatamente. In particolare, la diagonale principale della matrice di ricorrenza è definita come la linea che attraversa la matrice dall’angolo in basso a sinistra a quello in alto a destra. La distanza di un qualsiasi diagonale dalla diagonale principale è chiamata τ , quindi per $\tau=0$ la diagonale è la diagonale principale, per $\tau>0$ le diagonali

sono quelle sopra la principale, per $\tau < 0$ le diagonali sono quelle sotto la principale. I risultati ottenuti per ogni singola diagonale vengono ordinati in un unico vettore lungo quanto la somma di tutte le diagonali. La dipendenza dalla distanza τ viene quindi persa, dando luogo ad indici a singolo valore.

Come primo passo si calcola il numero di diagonali nere $P_\tau(l)$ di lunghezza l su ogni diagonale

$$P_\tau(l) = \sum_{i,j}^{N_1-\tau} (1 - R_{i-1,j-1})(1 - R_{i+l,j+l}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k} R_{i+k,j+k}$$

Dove R è la matrice di ricorrenza. Segue poi il calcolo degli indici citati sintetici:

- τ -Recurrence Rate index RR_τ

Misura la densità di punti neri per ogni linea diagonale

$$RR_\tau = \frac{1}{N_1 - \tau} \sum_{l=1}^{N_1-\tau} l P_\tau(l)$$

- τ -average diagonal line length index L_τ

Misura la lunghezza media delle strutture diagonali nere trovata sulla linea diagonale in analisi

$$L_\tau = \frac{\sum_{l=l_{min}}^{N_1-\tau} l P_\tau(l)}{\sum_{l=1}^{N_1-\tau} P_\tau(l)}$$

Nella Figura 18 sono riportati i due indici sintetici descritti in precedenza: il Recurrence Rate e la lunghezza media dei tratti diagonali, che indicano parziale oscillazione ciclica. Quest'ultimo indice quindi indica il tempo medio in cui un sistema oscilla in maniera periodica, quindi è un forte indice per l'individuazione delle instabilità termoacustiche. Si nota che in tutte e due i casi il regime termoacustico è nettamente separato dai valori degli indicatori tipici del rumore di combustione.

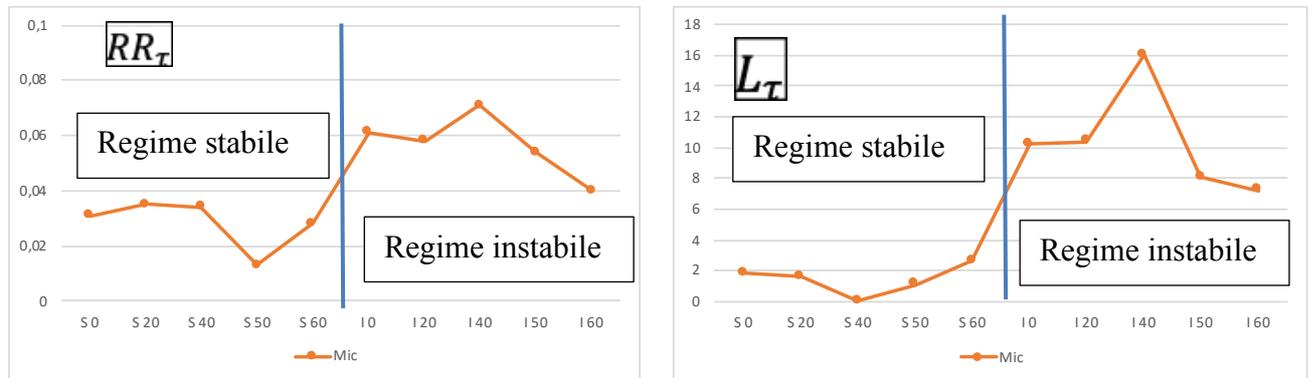


Figura 18 Rappresentazione del Recurrence Rate e della lunghezza media dei tratti diagonali per le varie configurazioni spaziali (vedi Tabella 3 e Tabella 4).

3 Conclusioni

In questo lavoro sono stati analizzati gli effetti delle instabilità termoacustiche su di un bruciatore denominato ROMULUS che elabora una miscela di aria e metano con contributi crescenti di idrogeno. Sono state discusse le proprietà di diffusione in massa dell'idrogeno che portano una notevole instabilità alla struttura di fiamma attraverso quella che è definita diffusione preferenziale.

La misura della distribuzione del radicale OH tracciato dalla sua emissione stimolata (LIF, Laser Induced Fluorescence) ha evidenziato sostanziali modifiche topologiche del fronte di fiamma indotte sia dall'insorgenza dell'instabilità termoacustica, sia dalla diffusione preferenziale dell'idrogeno, rispetto al metano e all'ossigeno, soprattutto in regime magro, con grande eccesso d'aria. E' stata infatti, evidenziata la presenza di spengimenti locali allorquando il tenore di idrogeno diventa significativo.

I risultati dei segnali di pressione ed emissione luminosa spontanea (chemiluminescenza) sono stati analizzati mediante tecniche di tipo caotico e filtraggi wavelet.

La decomposizione wavelet del segnale ha evidenziato l'accoppiamento dei due tipi di segnali e la concentrazione di energia a piccole scale con delle ricorrenze di tipo periodico, quando il regime di combustione è affetto dall'instabilità termoacustica. Tale accoppiamento è confermato, nel regime di instabilità, anche dall'analisi spettrale con coefficienti di Fourier, la quale per contro non riesce a evidenziare la concentrazione di energia di tipo caotico quando il sistema si trova nel regime stabile di rumore di combustione.

L'analisi caotica, infine da un lato ha confermato la diversa dinamica del sistema in regime instabile, e dall'altro ha fornito degli indici sintetici, formati cioè da un singolo numero, che distinguono chiaramente il regime stabile di rumore di combustione, da quello di instabilità termoacustica.

4 Riferimenti bibliografici

- T. Pagliaroli, G. Troiani (2020). Wavelet intermittent blowout detection in thermoacoustic instability of trapped vortex combustor. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1589, No. 1, p. 012005).
- P. E. Lapenna, G. Troiani, R. Lamioni, F. Creta (2020). Mitigation of Darrieus–Landau instability effects on turbulent premixed flames *Proceedings of the Combustion Institute* Vol. 22
- T. Pagliaroli, G. Troiani (2020). Wavelet and recurrence analysis for lean blowout detection: An application to a trapped vortex combustor in thermoacoustic instability. *Physical Review Fluids* 5 (7), 073201.
- G. Troiani, M. Marrocco (2020). Fractal Analysis of Fluorescence Images to Assess Robustness of Reference-surface Positioning in Flame Fronts. *Combustion Science and Technology*, 1-16.
- R. Hernandez-Rivera, G. Troiani, T. Pagliaroli, A. Hernandez-Guerrero (2019). Detection of the thermoacoustic combustion instabilities of a slot burner based on a diagonal-wise recurrence quantification. *Physics of Fluids* 31 (12), 124105
- 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.
- 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.
- 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.
- V. Nair, G. Thampi, R. I. Sujith, “Intermittency route to thermoacoustic instability in turbulent combustors”, *Journal of Fluid Mechanics* 756 (2014), p. 470-487.
- 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.
- N. Suraj, T. Lieuwen, "Acoustic detection of blowout in premixed flames", *Journal of Propulsion and Power*, 21.1(2005), p. 32-39.
- 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.
- S. Kartheekyan, S. R. Chakravarthy. "An experimental investigation of an acoustically excited laminar premixed flame." *Combustion and flame* 146 (3) (2006), p. 513-529.
- T. Pagliaroli, R. Camussi, "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures, “*Journal of Sound and Vibration*” 341 (2015), p. 116-137.