



Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi numerica e sperimentale dell'instabilità in bruciatori di ultima generazione: monitoraggio della combustione ed identificazione delle instabilità

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

ANALISI NUMERICA E SPERIMENTALE DELL'INSTABILITÀ IN BRUCIATORI DI ULTIMA GENERAZIONE:  
MONITORAGGIO DELLA COMBUSTIONE ED IDENTIFICAZIONE DELLE INSTABILITÀ

R. Camussi , T. Pagliaroli, L. Burghignoli (Università di Roma 3)  
G. Troiani (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA  
Piano Annuale di Realizzazione 2015  
Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio  
Progetto: Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'uso di combustibili fossili  
Obiettivo: Monitoraggio della combustione ed identificazione delle instabilità  
Responsabile del Progetto: F.R. Picchia ENEA

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

Responsabile scientifico ENEA: Guido Troiani

Responsabile scientifico Università di Roma 3: Prof. Roberto Camussi

## Indice

SOMMARIO.....	4
1   RISULTATI OTTENUTI.....	5
1.1    DIAGNOSTICA DEI PROCESSI DI COMBUSTIONE IN COMBUSTORI PER TURBOGAS DI MEDIA SCALA .....	5
2   CONCLUSIONI.....	11
3   RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	11

## Sommario

Nel presente documento sono riportate le attività relative al contratto di collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria (nel seguito DING) dell'Università Roma Tre (resp. Prof. R. Camussi) inquadrato nel obiettivo C.5: *Monitoraggio della combustione ed identificazione delle instabilità* del PAR2015 - Progetto B.2.

La ricerca si è focalizzata sull'implementazione di tecniche di analisi dati basate sulla teoria dei sistemi dinamici caotici. Queste ultime metodologie avanzate di analisi dei segnali sono state applicate a serie temporali di pressione ed energia radiante che sono state campionate su bruciatori in condizione d'instabilità.

Le tecniche di analisi caotica, i risultati ottenuti hanno messo in evidenza che gli indici calcolati possiedono un contenuto informativo di chiaro interesse scientifico ed ingegneristico nell'ambito della diagnostica dell'instabilità.

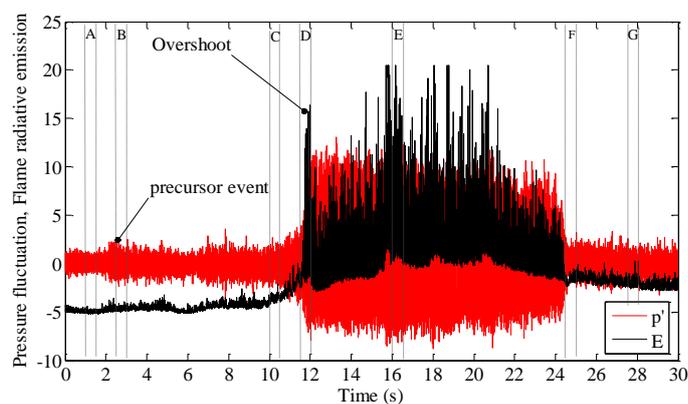
## 1 Risultati ottenuti

### 1.1 Diagnostica dei processi di combustione in combustori per turbogas di media scala

Il *database* utilizzato per le misure consta di segnali di pressione ed energia radiante acquisiti su un bruciatore LRPM (Liquid Rapid PreMixer) da 250 kW alimentato ad aria e olio combustibile situato presso i laboratori di combustione della città di Savona, e per questo denominato nel seguito “database Savona”.

Il *database* “Savona” è considerato particolarmente significativo per testare gli algoritmi di diagnostica dell’instabilità termoacustica. Questa caratteristica è legata all’evidente condizione d’instabilità raggiunta, grazie all’esercizio dell’impianto in condizioni che differiscono dal suo range di funzionamento. Campionare segnali, per un tempo statisticamente significativo, su impianti in condizioni d’instabilità è un’attività piuttosto rara a causa dell’elevata probabilità di danneggiamento dello stesso. Per tale ragione, il database “Savona” rappresenta una risorsa preziosa per la fase di *testing in pseudo-realtime* degli algoritmi di diagnostica. Per completezza, le serie temporali di pressione e di energia radiante campionate mediante l’impiego di un trasduttore di pressione e un ODC sono riportate in Figura 1. Nel presente grafico si possono osservare 7 fasi di funzionamento dell’impianto alle quali sono associate delle rispettive finestre temporali:

- A. funzionamento stabile
- B. funzionamento stabile con presenza di fenomeni precursori
- C. transizione verso l’instabilità
- D. ingresso nel regime instabile (*Overshoot*)
- E. instabilità conclamata
- F. uscita dal regime instabile
- G. funzionamento stabile



**Figura 1 storia temporale del segnale di pressione e di energia radiante acquisiti in una fase di transizione del combustore denominato comunemente “Savona”.**

In passato è stato definito un criterio d’instabilità valido dal punto di vista operativo. Tale criterio è stato derivato dai modelli matematici che descrivono le sorgenti acustiche nei processi di combustione. Nello specifico, la convoluzione tra fluttuazione nel rilascio di calore e fluttuazione di pressione è termine sorgente dell’equazione delle onde scritta in condizioni reattive. Sulla base di questo modello matematico è

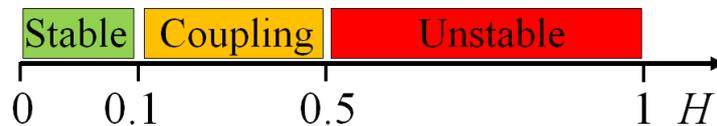
definito l'indice di Rayleigh. Poiché, l'indice di Rayleigh è di difficile misura diretta, è stato definito un indice noto come pseudo-Rayleigh e denominato H:

$$H(t) = \left| \frac{1}{T\sigma_E\sigma_p} \int_0^T \int_V p'(t)E'(t-\tau)dVd\tau \right|$$

dove p' è il segnale di fluttuazione della pressione, E' è il segnale di fluttuazione dell'energia radiante, T è il periodo delle oscillazioni (ovvero la grandezza della finestra temporale),  $\sigma_E$  è la deviazione standard dell'energia radiante,  $\sigma_p$  è la deviazione standard del segnale di pressione,  $\tau$  è il tempo variabile all'interno della finestra temporale del segnale mentre V è il volume del combustore. L'indice d'instabilità H, che altro non è che un coefficiente di cross-correlazione è dipendente dal tempo t, e perciò permette una diagnostica real-time. Definire in tal senso un indice d'instabilità ha diversi vantaggi, tra i quali il principale è il suo range di definizione.

$$H(t) \in [0,1]$$

In seguito si vedrà che è possibile identificare 3 intervalli di H ai quali si possono far corrispondere 3 regimi di funzionamento dell'impianto: "stabile", che è caratterizzato da basse fluttuazioni delle variabili di stato; "accoppiamento", che è caratterizzato da rilevanti fluttuazioni delle variabili di stato alle medesime frequenze; ed infine un intervallo "instabile" identificato da importanti fluttuazioni delle variabili di stato alla medesima frequenza.



Si evince da simulazioni numeriche che per valori prossimi alla zero, la condizione è stabile mentre per valori superiori a 0.5 l'instabilità è conclamata, come si può osservare in Figura 2 nella quale l'indice è sovrapposto alla time history del segnale.

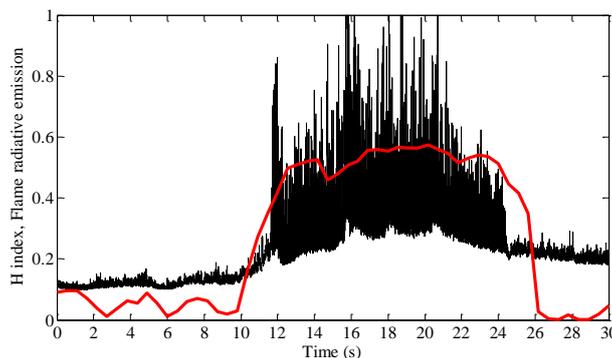
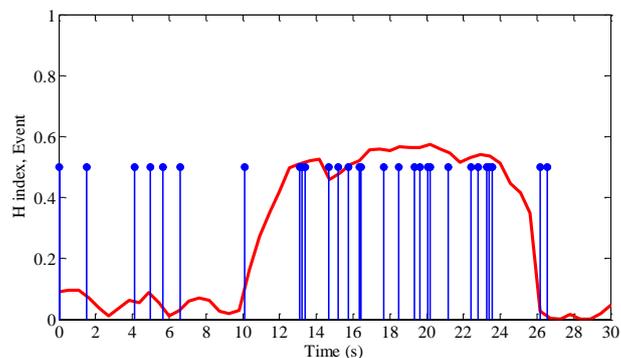


Figura 2: Rappresentazione dell'indice d'instabilità sovrapposto al segnale di pressione

Sebbene l'indice H sia molto sensibile, non è in grado di predire la presenza di fenomeni precursori dell'instabilità. Perciò, in passato, è stato necessario implementare una diversa tecnica per mettere in evidenza i precursori dell'instabilità. La tecnica, basata sulla trasformata wavelet, è risultata molto efficace, come si può notare in figura 4, dove si può vedere che il pattern d'instabilità è stato identificato anche all'esterno della finestra temporale relativa alla condizione instabilità. Il pattern di instabilità in realtà

evidenzia un accoppiamento tra energia radiante e pressione, ma non riesce a stabilire se si tratta di un effettivo precursore di instabilità o di instabilità conclamata. Nella figura 4 sono evidenziate in blu le finestre temporali in cui si ha un tale accoppiamento, esse sono presenti su quasi tutto il campione registrato. Un ulteriore svantaggio di tale tecnica è inoltre il lungo tempo di calcolo, pertanto non può essere impiegata nell'ambito della diagnostica real-time.



**Figura 4: Rappresentazione dell'indice d'instabilità sovrapposto ai tempi di riferimento  $t_i$  del pattern d'instabilità.**

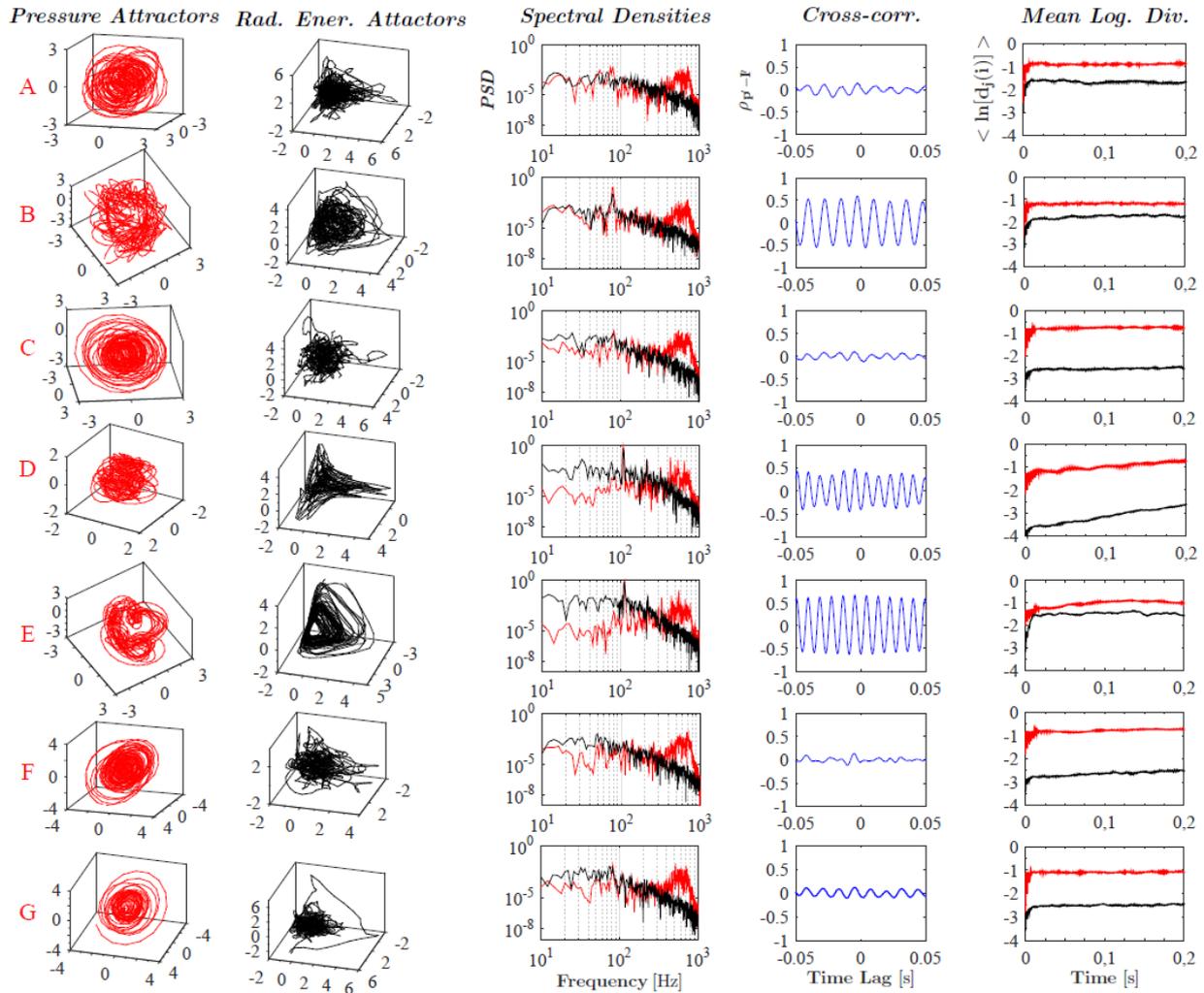
Poiché l'indice H non è in grado di evidenziare i precursori mentre la tecnica basata sulla trasformata wavelet ha tempi di calcolo lunghi, nell'ambito di questa attività è stata ricercata una valida alternativa alle due tecniche precedentemente investigate. Nello specifico, trattandosi di processi multi-variabile e non lineari abbiamo applicato delle strategie di *post-processing* dei dati basate sulla teoria del caos. L'analisi mediante l'impiego di tecniche di analisi caotica è stato applicato alle serie temporali relative a questo *database*. Nello specifico, alla coppia di segnali: pressione-energia radiante. I segnali sono acquisiti durante un transitorio del combustore in esame.

Nella storia temporale dei segnali, sono state messe in evidenza delle finestre temporali corrispondenti a 0.5 s, che corrispondono ad alcune fasi chiave del processo di combustione. Le finestre sono state contrassegnate con le lettere: A, B, C, D, E, F e G. I riferimenti temporali, i valori assunti dal Largest Lyapunov Exponent (LLE) [1**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**] e dal coefficiente di cross-correlazione ( $H = \rho_{p'-l'}$ ) sono riportati in Tabella 1. I valori assunti da LLE indicano la tendenza delle orbite a divergere nello spazio delle pseudo-fasi. Maggiore è il suo valore, più il processo ha una natura caotica ovvero sensibile alle condizioni iniziali. Per quanto riguarda la finestra temporale D notiamo che si ha un forte incremento sia del LLE che  $\rho_{p'-l'}$ . Tale risultato indica che in condizione d'instabilità, non solo si ha un forte accoppiamento tra acustica e processo di combustione, ma anche che si verifica una transizione di tipo caotico del processo. Quest'ultimo risultato, totalmente inaspettato, indica che il transitorio da una condizione di stabilità del processo ad una d'instabilità avviene attraverso una divergenza caotica del processo. Nello specifico, si manifestano non-linearità significative nella dinamica di processo che è sorgente dell'energia radiante, non-linearità che divengono trascurabili quando l'instabilità del processo diviene conclamata (finestra E).

**Tabella 1 Valori assunti dal massimo coefficiente Lyapunov e dal coefficiente di cross-correlazione per le diverse finestre temporali investigate. Ultima colonna, indice di sincronizzazione.**

Reference	Time window	LLE <sub>P</sub>	LLE <sub>I</sub>	$\rho_{P'-I'}$	$E(I' P')$
A	$t \in [1, 1.5]s$	0.083	-0.504	0.1156	0.4574
B	$t \in [2.5, 3]s$	0.078	0.807	0.5589	0.5407
C	$t \in [10, 10.5]s$	1.197	0.509	0.0766	0.2375
D	$t \in [11.5, 12]s$	2.757	5.300	0.3916	0.7624
E	$t \in [16, 16.5]s$	1.781	0.328	0.6546	0.4913
F	$t \in [24.5, 25]s$	0.740	1.509	0.0723	0.2509
G	$t \in [27.5, 28]s$	0.113	0.384	0.1143	0.2688

Quanto finora detto è confermato dalla topologia degli attrattori rappresentati nello spazio delle pseudo-fasi (v. Figura 3 ). In Figura 3 possiamo notare come nella fase D l'attrattore inerente alla pressione, che nella fase precedente era rappresentativo di una periodicità, collassi in una nuvola di punti non strutturata a supporto della precedente affermazione, nella quale si evidenziava una transizione al caos durante l'innescò dell'instabilità. La rappresentazione delle traiettorie assunte dall'energia radiante nello spazio delle pseudo-fasi, durante fase di transizione (fase D), dà luogo ad un attrattore strano che si evolve in un ciclo limite nella fase d'instabilità conclamata (fase E). L'energia radiante nella condizione di stabilità presenta sempre traiettorie molto irregolari dovute alla natura broad-band del segnale che, attraverso una transizione caotica, diviene un ciclo limite nella condizione d'instabilità.



**Figura 3** andamento degli attrattori nello spazio delle pseudo-fasi del segnale di pressione (rosso) e dell'energia radiante (nero).

Quanto finora detto, ovvero che la transizione stabile-instabile prevede una transizione di tipo caotico è stata ulteriormente verificata attraverso l'implementazione di un indice di sincronizzazione caotica [1] che viene brevemente descritto nel seguito.

Dato un elemento di una serie temporale  $x(k)$ , la sua dimensione d'incorporamento  $d$  e la scala integrale della serie  $\tau$ , possiamo definire un punto nello spazio delle pseudo-fasi  $\mathbf{x}(k) = [x(k), x(k + \tau), \dots, x(k + (d - 1)\tau)]$ . Chiamiamo  $x[r_k(i)]$  i punti vicini a  $\mathbf{x}(k)$  che sono di numero pari a  $R$ . Possiamo così definire la distanza media euclidea tra  $\mathbf{x}(k)$  e sui vicini come:

$$D_k^R(\mathbf{X}) = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \{\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}[r_k(i)]\}^2 \quad (1)$$

Ovvero il raggio medio della nuvola di punti intorno a  $\mathbf{x}(k)$ .

Allo stesso modo possiamo determinare per un'altra variabile di stato i punti vicini a  $\mathbf{y}(k)$  indicando il loro l'indice temporale come  $s_k(i) = 1 \dots R$

In questo modo si può trovare la distanza media dei mutui vicini

$$D_k^R(\mathbf{X}|\mathbf{Y}) = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \{\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}[s_k(i)]\}^2 \quad (2)$$

Quando si ha una forte sincronizzazione si ottiene che le due distanze sono le stesse.

$$D_k^R(\mathbf{X}) \approx D_k^R(\mathbf{X}|\mathbf{Y}).$$

Se le due dinamiche sono disaccoppiate invece si verifica che

$$D_k^R(\mathbf{X}) \ll D_k^R(\mathbf{X}|\mathbf{Y}).$$

Dunque l'interdipendenza tra due sistemi può essere definita come la somiglianza tra due nuvole di punti: i vicini e i mutui vicini. Sulla base di quanto detto può essere definito un indice d'inter-dipendenza caotica

$$S(\mathbf{X}|\mathbf{Y}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{D_k^R(\mathbf{X})}{D_k^R(\mathbf{X}|\mathbf{Y})} \quad (3)$$

dove N è il numero dei vettori di stato pari a  $L - (d - 1)\tau$  con L dimensione del numero dei campioni

Due variabili di stato sono perfettamente sincronizzate se

$$S(\mathbf{Y}|\mathbf{X}) \approx S(\mathbf{X}|\mathbf{Y}) \approx 1.$$

Mentre non si ha alcuna sincronizzazione se

$$S(\mathbf{Y}|\mathbf{X}) \approx S(\mathbf{X}|\mathbf{Y}) \approx 0.$$

Inoltre se si verifica la condizione

$$S(\mathbf{Y}|\mathbf{X}) > S(\mathbf{X}|\mathbf{Y}),$$

Significa che X influenza Y. Ovvero siamo in grado di stabilire una direzionalità. In Tabella 1 (ultima colonna) sono riportati i valori assunti dall'indice di sincronizzazione. Si osserva un forte incremento dell'indice di sincronizzazione nella fase D che conferma quanto detto in precedenza. L'instabilità ha un innesco di natura caotica.

Quanto finora esposto è stato testato anche in termini di diagnostica *real-time*. I tempi di elaborazione dell'indice di sincronizzazione sono più alti di quelli richiesti, ma di un ordine di grandezza compatibile con i tempi d'intervento su un impianto. In Figura 4 si può notare, confrontando le due serie temporali, che l'indice è sia asimmetrico (rispetto al ingresso-uscita dall'instabilità) che sensibile ai precursori. L'asimmetria ci indica quale sotto dinamica di processo guida il fenomeno; informazione di grande interesse nell'ambito del controllo passivo.

Per tali ragioni crediamo che questa strada sia la maggiormente promettente nell'ambito della diagnostica *real-time* purché siano ridotti i tempi di calcolo. A tal proposito, in questa direzione sembrano esserci buoni margini di miglioramento.

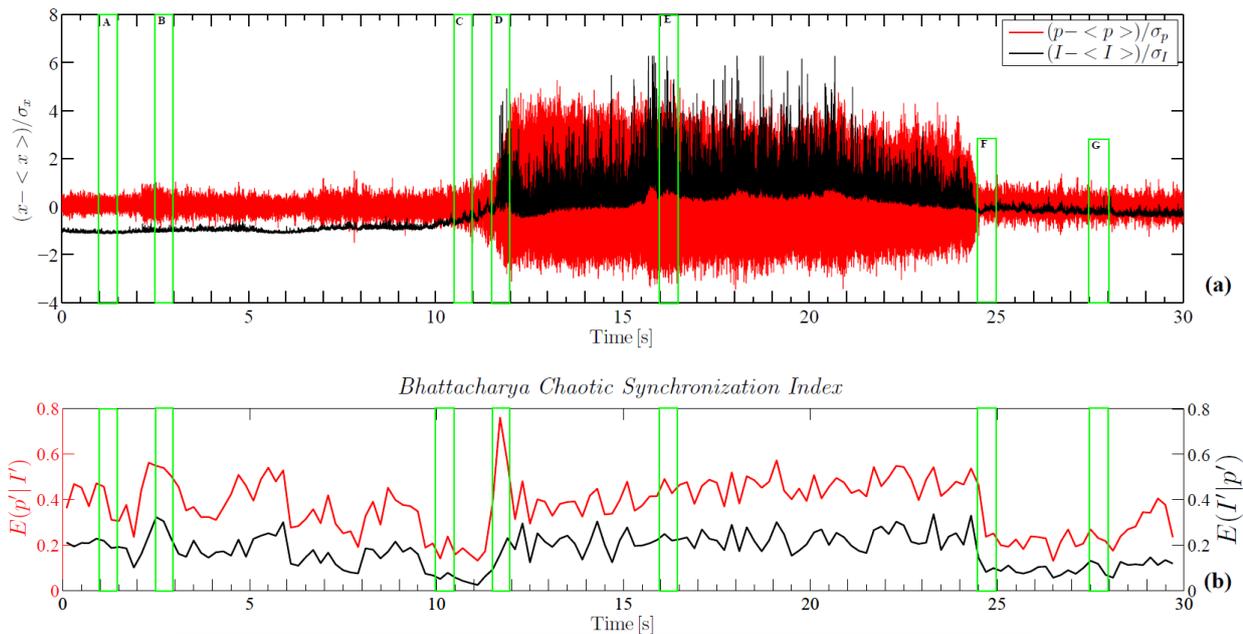


Figura 4 confronto tra le serie temporali e l'andamento dell'indice di sincronizzazione andamento dell'indice di sincronizzazione.

## 2 Conclusioni

Per quanto concerne la diagnostica non intrusiva dell'instabilità nei bruciatori scala superiore, le tecniche di analisi caotica sviluppate sembrano essere un valore aggiunto e contribuiscono notevolmente all'interpretazione del processo. Nello specifico sembra che l'indice di sincronizzazione restituisca informazioni sull'innesco dell'instabilità in anticipo rispetto allo pseudo-Rayleigh. Ulteriori test su quest'indice verranno effettuati su diversi database per verificarne l'attendibilità e flessibilità.

## 3 Riferimenti bibliografici

1. Chiocchini, S., Pagliaroli, T., Camussi, R., Giacomazzi, E. "Chaotic and Linear Statistics Analysis in Thermo-Acoustic Instability Detection", j. Propulsion and Power (under revision).

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

### POSIZIONE ATTUALE E POSIZIONI PRECEDENTI:

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

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

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

### FORMAZIONE

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

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

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

### SUPERVISIONE DI TESI DI LAUREA, DOTTORANDI E POSTDOC

Attualmente è docente guida di cinque dottorandi, due assegnisti di ricerca ed un Ricercatore a tempo

determinato (di tipo A). Dal 2008 al 2013 è stato docente guida di 8 dottorandi e 7 assegnisti di ricerca; Dal 2008 è stato relatore di oltre 150 tesi di laurea triennale e oltre 20 tesi di laurea magistrale.

### ATTIVITÀ DIDATTICA

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

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

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

### PRINCIPALI INCARICHI ISTITUZIONALI PRESSO L'UNIVERSITÀ ROMA TRE

Attualmente: è Vice-Direttore con delega alla didattica del Dipartimento di Ingegneria; è referente del

Dipartimento di Ingegneria presso il "Centro Linguistico di Ateneo" e presso l'"Ufficio Studenti con Disabilità" dell'Ateneo Roma Tre. È responsabile della Qualità (per la didattica) del Dipartimento di Ingegneria dell'Università Roma Tre;

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

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

### ALTRI INCARICHI SCIENTIFICI

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

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

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

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

Dal 2011 è membro dell' Editorial Advisory Board della rivista The Open Acoustic Journal  
Inoltre: ha fatto parte di commissioni nazionali per esame finale di dottorato e concorsi a posti di ricercatore; è stato membro di numerose commissioni per esame finale di dottorato presso sedi estere (TU Delft, Univ. of Poitiers, Trinity College of Dublin, Ecole Centrale de Lyon), per assegnazione del titolo HDR (Habilitation a Diriger la Recherche, Ecole Centrale de Lyon), per concorsi a posizioni di Associate Professor (Trinity College of Dublin, University of Bath).

#### ORGANIZZAZIONE DI EVENTI SCIENTIFICI

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

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

#### PRINCIPALI SEMINARI E PRESENTAZIONI AD INVITO

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

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

#### ATTIVITA' DI REFERAGGIO PER RIVISTE ED ASSEGNAZIONE FINANZIAMENTI

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

#### RESPONSABILITA' DI CONTRATTI E CONVENZIONI

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

#### ATTIVITÀ SCIENTIFICA

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

#### PRINCIPALI PUBBLICAZIONI (2011-2015)

M. felli, R. Camussi, “Mechanisms of evolution of the propeller wake in the transition and far fields”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 682, pp. 5 – 53, 2011.

F.R. Verdugo, A. Guitton, R. Camussi, “Experimental investigation of a cylindrical cavity in a low Mach number flow”, Journal of Fluids and Structures, Vol. 28, pp. 1–19, 2012.

S. GRIZZI, R. CAMUSSI, “Wavelet analysis of Near-Field Pressure Fluctuations Generated by a Subsonic Jet”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 698, pp. 93-124, 2012.

A. Di Marco, R. Camussi, M. Bernardini, S. Pirozzoli, “Wall pressure coherence in supersonic turbulent boundary layers”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 732, pp. 445-456, 2013.

R. Camussi, S. GRIZZI, “Statistical analysis of the pressure field in the near region of a  $M = 0.5$  circular jet”, International Journal of Aeroacoustics, Vol. 13, pp. 169-182, 2014.

T.Pagliaroli, R.Camussi, “Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 341, pp. 116-137, 2015.

A. Di Marco, M. Mancinelli and R. Camussi, “Pressure and velocity measurements of an incompressible moderate Reynolds number jet interacting with a tangential flat plate”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 770, pp 247 – 272, 2015.

D. Grassucci, R. Camussi, P. Jordan, S. Grizzi, “Intermittency of the near pressure field induced by a compressible coaxial jet”, Experiments in Fluids 56:23, 2015

T.Pagliaroli, R.Camussi, E. GIACOMAZZI, E. GIULIETTI, “Velocity measurements of particles ejected from a small size solid rocket motor”, Journal of Propulsion and Power, in press.

A. Di Marco, M. Mancinelli, R. Camussi, “Flow-induced pressure fluctuations of a moderate Reynolds number jet interacting with a tangential flat plate”, Advances in Aircraft and Spacecraft Sciences, in press.

- J. Grilliat, L. Zhou, A. Delgado, R. Camussi, M. C. Jacob, "Applications of the wavelet theory on turbulent time signals: denoising and conditioning", *Developments in mechanical engineering*. Vol. 5. Eds. J.T. Cieslinski, J.A. Szymczyk, Gdansk: Gdan. Univ. Technol., 2012, pp. 59-64.
- R. Camussi, A. Di Marco, "Boundary Layer Noise", in *Noise Sources in Turbulent Shear Flows: Fundamentals and Applications*, CISM Courses and Lectures 545, Springer, 2013.
- R. Camussi, A. Di Marco, "Wall pressure fluctuations statistics: measurements and numerical simulations", in *Advanced post-processing of experimental and numerical data*, Von Karman Institute Lecture Series, Nov. 2013.
- R. Camussi, "Wavelet analysis and applications in aeroacoustics", in *Advanced post-processing of experimental and numerical data*, Von Karman Institute Lecture Series, Nov. 2013.
- R. Camussi, "Advanced analysis techniques (Wavelets, LSE, POD) for noise sources identification", in *Aeroengine Noise*, Von Karman Institute Lecture Series, Dec. 2014.
- R. Camussi, A. Di Marco, "Wall pressure fluctuations induced by supersonic turbulent boundary layer", in *Flinovia – Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects*, E. Ciappi, S. De Rosa, F. Franco, J.L. Gyader, S.A. Hambrics Eds, pp 67-90, Springer, 2015.
- F.R. Verdugo, R. Camussi, G. Benneth, "Aeroacoustic source characterization technique applied to a cylindrical Helmholtz resonator", 18th International Congress on Sound and Vibration (ICSV18), Rio de Janeiro (BR), 7/2011.
- S. GRIZZI, R. CAMUSSI, " Experimental investigation of the Near-Field Noise generated by a Compressible Round Jet" *Journal of Physics: Conference Series* 318 (2011) 092003, *Proceedings 13th European Turbulence Conference (ETC13)*, Warsaw 7/2011.
- g. bernardini, L. Morino, A. gradassi, M. ONORI, R. Camussi, "A simple, but efficient aeroacoustic model of jets", *AIAA paper 2012-2164*, 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Colorado Springs (USA), 6/2012.
- s. grizzi, r. Camussi, A. DI MARCO "Experimental Investigation of pressure fluctuations in the near field of subsonic jets at different Mach and Reynolds numbers", *AIAA paper 2012-2257*, 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Colorado Springs (USA), 6/2012.
- a. di marco, m. bernardini, s. pirozzoli, r. Camussi, "Multi-variate Statistics of the Wall Pressure Field beneath Supersonic Turbulent Boundary Layers", *AIAA paper 2012-2053*, 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Colorado Springs (USA), 6/2012.
- F. Magionesi, E. Ciappi, R. Camussi, T. Pagliaroli, A. Di Mascio, B. Imperatore, A. Marino, "Measurements and Modelling of Turbulent Boundary Layer Excitation for Naval and Aeronautical Applications, Noise and Vibraion: emerging methods", *proceedings NOVEM 2012 Noise and Vibration: Emerging Methods*, Sorrento 4/2012.
- R. Camussi, T. Pagliaroli, E. Ciappi, F. Magionesi, B. Imperatore, A. Marino, "Wind tunnel measurements of pressure fluctuations and structural response induced by the turbulent boundary layer at high Mach number, PART 1: velocity and pressure field characterization", *proceedings NOVEM 2012 Noise and Vibration: Emerging Methods*, Sorrento 4/2012.
- T. pagliaroli, r. Camussi, "Acoustic and Aeroacoustic Characterization of Rectangular Partial Enclosures", *AIAA paper 2013-2050*, 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Berlin (D), 5/2013.
- A. Marino, P. Vitiello, T. Pagliaroli. V. Quaranta, B. Imperatore, R. Camussi, "Innovative Vibration and Acoustic Methodologies for the Design of Enhanced Composite Panel for Aircraft", *43rd AIAA Fluid Dynamics Conference*, San Diego (USA),5/2013.
- E. Miguel, L. Gefen, C. Freitas, S. Grizzi, R. Camussi, M. Felli, "Pressure-density gradient correlations in the near-field of a transonic jet", *AIAA paper 2014-3310*, 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Atlante (USA), 6/2014.

T. PAGLIAROLI, R. Camussi, A. Di Marco, C. Stringola, E. Glulietti, E. Giacomazzi, "Combustion Acoustic Coupling in Trapped Vortex Combustor", Ninth Mediterranean Combustion Symposium, Rhodes, Greece, 6/2015.

A. DI Marco, M. Mancinelli, R. Camussi, "Flow-Induced Noise of a Moderate Reynolds Number Jet Interacting with a Tangential Flat Plate", NOVEM 2015 Noise and vibration: Emerging methods, 4/2015.

M. Mancinelli, A. Di Marco, R. Camussi, "Flat Plate Installation Effects on Velocity and Wall Pressure Fields Generated by an Incompressible Jet", Euronoise 2015 - 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Maastricht, 31 May – 3 June 2015.

S. Grizzi, R. Camussi, "Experimental Investigation of the Near-Field noise of a compressible round jet", 19° Convegno Nazionale AIVELA, Bertinoro, 12/2011.

T. Pagliaroli, R. Camussi, S. Giammartini, "Flow-Acoustic Characterization of a Trapped Vortex Combustor in non-Reactive Condition", 19° Convegno Nazionale AIVELA, Bertinoro, 12/2011.