



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



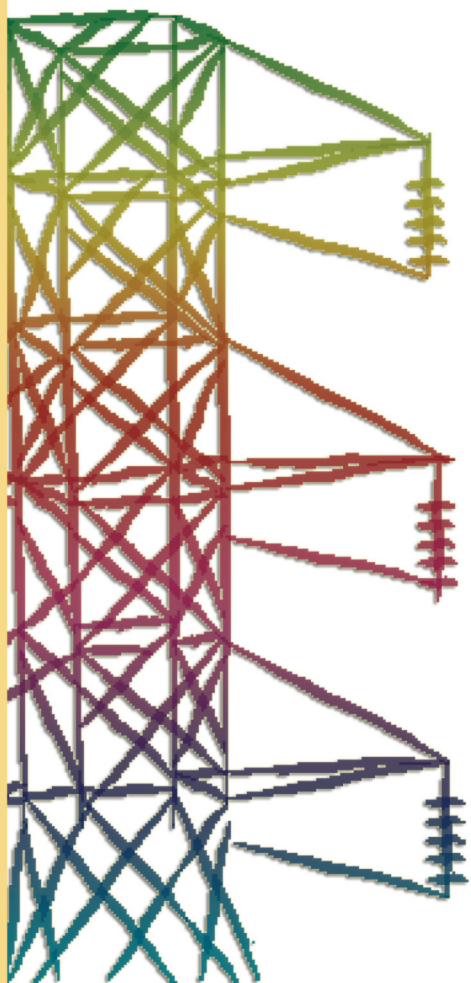
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

# **La metodologia ODC applicata alla verifica delle condizioni di funzionamento flameless di un reattore ad ossi-combustione di slurry di carbone**

**R. Bruschi, C. Stringola, M. Nobili**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

La metodologia ODC applicata alla verifica delle condizioni di  
funzionamento flameless di un reattore ad ossi-combustione di  
slurry di carbone

*R. Bruschi, C. Stringola, M. Nobili*

LA METODOLOGIA ODC APPLICATA ALLA VERIFICA DELLE CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO  
FLAMELESS DI UN REATTORE AD OSSI-COMBUSTIONE DI SLURRY DI CARBONE

R. Bruschi, C. Stringola (ENEA)

M. Nobili (EN.SY.EN. Srl)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Tecnologie innovative per migliorare i rendimenti di conversione delle centrali a polverino di carbone - Sviluppo di un sistema di combustione di tipo "flameless" per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione di inquinanti e CO<sub>2</sub>

Responsabile Tema: Stefano Giammartini, ENEA

Le attività, di cui si riportano in modo sintetico contenuto e risultati, sono un compendio degli sforzi che si stanno facendo presso i laboratori ENEA per far migrare in modo efficiente e non intrusivo le metodologie e tecnologie sviluppate su sistemi a combustione in scala di laboratorio verso sistemi di scala industriale, in particolare operanti in condizioni MILD o Flameless.

### 1. La metodologia ODC in sintesi

La metodologia ODC si basa sull'analisi del segnale prodotto da un sensore ottico che, sensibile ad uno spettro di radiazione che si estende dall'ultravioletto all'infrarosso, capta l'energia radiante emessa dal processo combustivo e dall'ambiente in cui questo avviene. Per quanto riguarda l'energia radiante emessa dal processo combustivo, risultante dell'effetto di chemiluminescenza dei reagenti e dell'emissione termica dei prodotti di combustione, questa ha una fluttuazione, nel tempo, che è legata alla interazione, nel tempo e nello spazio, del campo fluidodinamico turbolento con lo strato sottile in cui avviene la reazione della combustione (strato identificato come fronte di fiamma locale nel caso di combustione premiscelata e come fronte di frazione stechiometrica locale in quella non-premiscelata). Quanto supposto implica l'esistenza di una coerenza tra la componente dinamica dell'emissione radiante e quella della fluidodinamica turbolenta che può essere messa in evidenza comparando gli spettri che si ottengono analizzando i segnali forniti da un sistema ODC e da un sistema LDA (anemometria laser doppler) in grado di fornire lo spettro della fluttuazione della velocità assiale, ovvero della turbolenza dei gas (combusti e non).

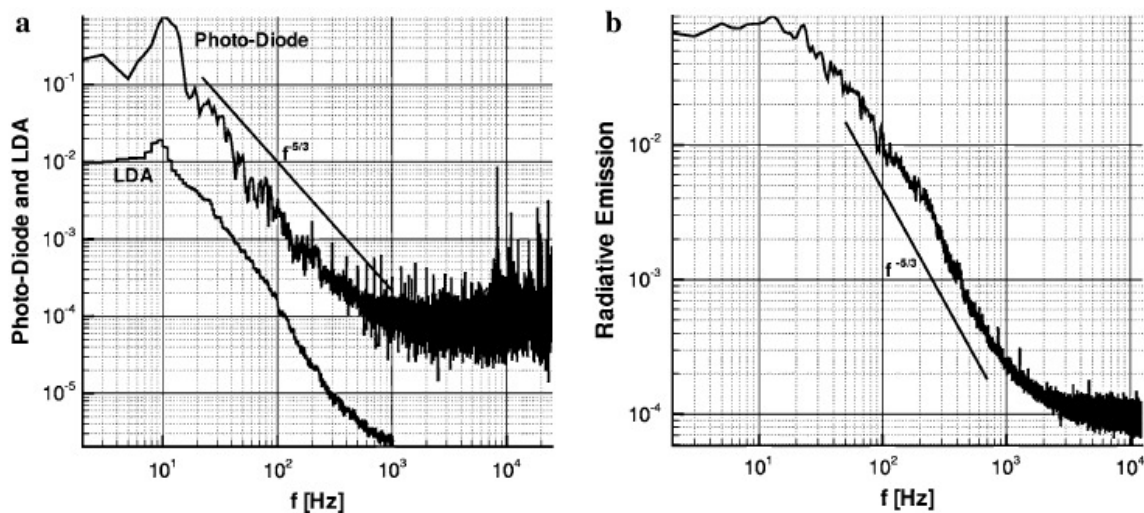


Figura 1: Spettro dell'emissione radiativa della fiamma acquisita da ODC. La fig. 1a si riferisce ad un bruciatore CH<sub>4</sub>/Air con fiamma premiscelata, tramite bluff-body, e mostra insieme allo spettro dell'energia radiante quello della fluttuazione della velocità assiale prodotto da un sistema LDA che osserva il punto centrale dell'area di campionamento dell'ODC (LDA può essere considerato affidabile fino a 100Hz, poiché il data-rate delle particelle era 1 kHz). La figura 1b si riferisce ad un bruciatore H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> con fiamma stechiometrica non premiscelata. In entrambe le figure si rileva un decadimento prossimo a  $f^{-5/3}$ .

Un aspetto interessante è che lo spettro fornito dal sistema ODC rivela il caratteristico decadimento inerziale, con pendenza prossima a  $-5/3$  su scala bilogarithmica, con cui le grandi scale, conservative ma instabili, si decompongono in piccole scale dissipative, confermando così la sua capacità di rivelare lo stato fluidodinamico del processo. Qui si ricorda che la caratteristica di decadimento di  $-5/3$  è propria dei gas non reattivi, isotropi e omogenei (legge di Kolmogorov), attribuiti non completamente assegnabili ai gas combustibili analizzati.

Nella figura 2 sono riportati gli spettri ottenuti con un bruciatore a fiamma premiscelata in condizione stabile, con rapporto di equivalenza di 1.04 e numero di Reynolds di 10400, e condizione instabile, ottenuta riducendo il flusso massico dell'aria fino ad ottenere un rapporto di equivalenza di 1.44 e numero di Reynolds 8700. Lo spettro mette in evidenza, rispetto alla condizione stabile, un aumento dell'energia delle grandi scale e una riduzione della banda delle scale inerziali a favore di quelle piccole, testimoniando una variazione fluidodinamica consistente: l'instabilità è dovuta essenzialmente all'insorgenza della perdita di ancoraggio.

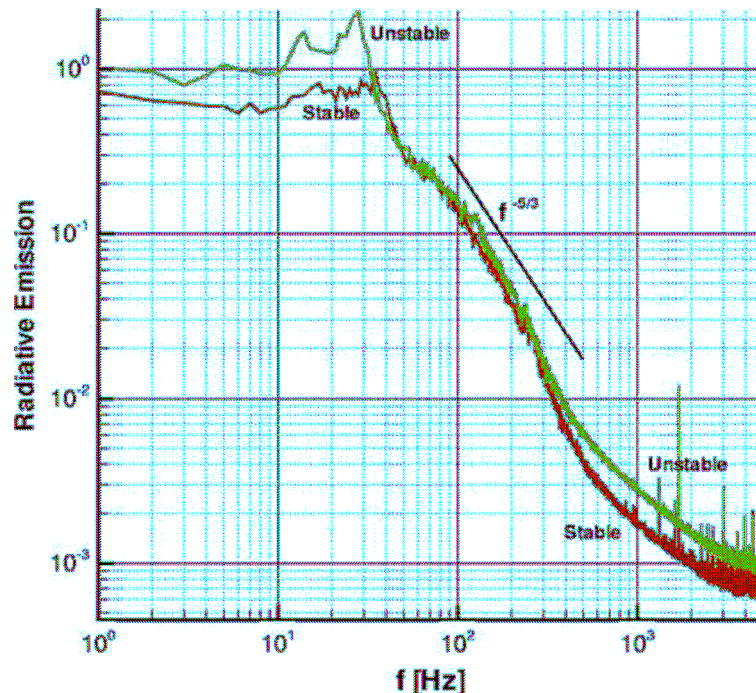


Figura 2: Spettro dell'emissione radiativa della fiamma CH<sub>4</sub>/Air, ottenuto tramite ODC, con fiamma premiscelata con bluff-body. Condizione stabile, fiamma ancorata, instabile la fiamma prossima all'estinzione mostra grosse oscillazioni.

L'intensità dell'emissione luminosa è proporzionale al tasso di produzione di alcune molecole e questo implica che la chemiluminescenza può essere utilizzata anche per misurare la velocità di reazione ed il rilascio termico. Inoltre, lo studio della dinamica del flusso luminoso dovuto alla radiazione di fiamma risulta utile per investigare i fenomeni legati alla estinzione di fiamma, sia premiscelata che non premiscelata, ed ai possibili stati di instabilità di questa. Infatti in prossimità di lean blow-off (LBO) il contenuto energetico del processo combustivo aumenta notevolmente pulsando e dando contributi sia come energia di radiazione che come energia acustica, innescando il pericolosissimo stato di instabilità termo-fluidodinamica denominato Humming.

La componente continua dell'energia radiante captata rappresenta essenzialmente la stima dello stato termico dell'ambiente in cui avviene la reazione (camera di combustione).

Nella figura 3 si può notare come il sistema ODC individui perfettamente le fluttuazioni energetiche, anche quelle incipienti l'instabilità ed è in grado anche di stimare il diverso stato termico con cui l'ambiente esce dalla fenomenologia di humming.

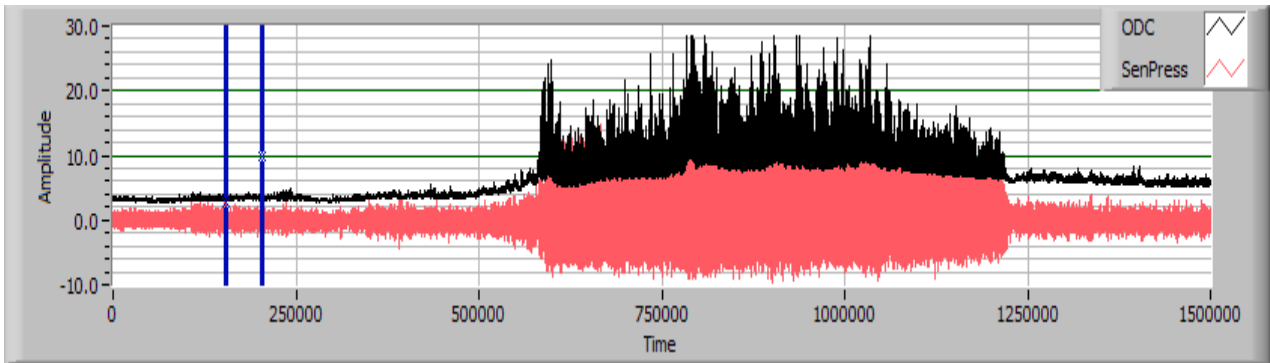


Figura 3: Sono riportati gli andamenti temporali, acquisiti in modo sincrono, dei segnali acquisiti dal sistema ODC (nero) e da un sensore piezoelettrico di pressione (rosso) durante un fenomeno di instabilità (humming) in un turbogas a combustibile liquido.

### 1.1. La sonda ottica

La possibilità di monitorare, in tempo reale e con bassa intrusività gli eventi precursori di queste fenomenologie risulta strategico ai fini di ottenere una consistente diagnostica della stabilità della fiamma. Per ottenere questi risultati il processo combustivo viene osservato direttamente con una sonda ottica passiva che remotizza le fenomenologie luminose verso il trasduttore, locato in un ambiente a basso rumore, tramite una fibra ottica. La sonda è costituita da due parti: una barra di zaffiro monocristallino ed una di fibra ottica in quarzo. Lo zaffiro ha una funzione strategica: l'elevato indice di rifrazione lo fa comportare come una fibra ottica ideale (senza aggiunta di clad) ed essendo inoltre un materiale inerte fino ai 2000 K permette l'accesso diretto in camera di combustione.

### 1.2. Il sensore ottico

Il sensore ottico utilizzato è un UDT455HS, con una superficie sensibile di  $5\text{mm}^2$ , una risposta spettrale che va dai 200 a 1100 nm (UV-IR) e una risposta in frequenza superiore ai 5 MHz.

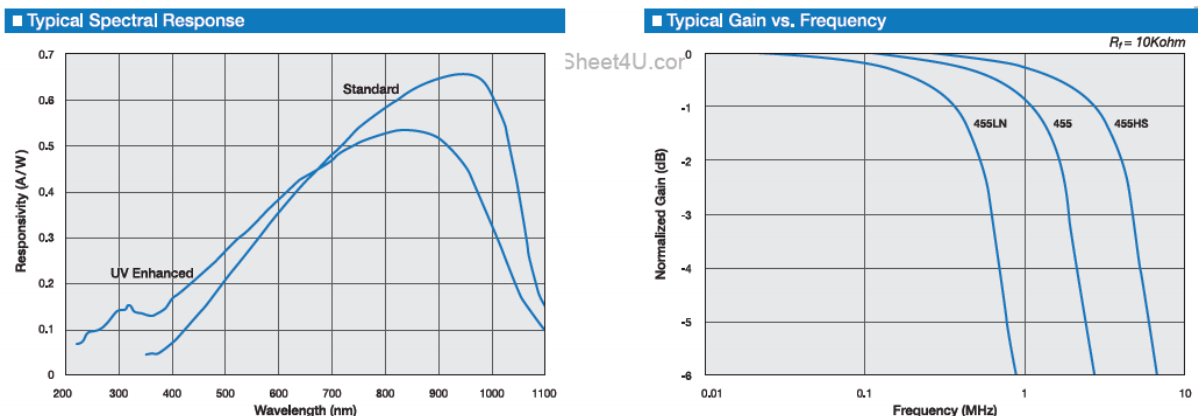


Figura 4: Caratteristiche del sensore ottico UDT55HS

Questa caratteristica trasduttiva è necessaria per poter osservare tutti i fenomeni del processo combustivo. Il sensore può essere visto come un “miscelatore” di segnali che genera un segnale

composito contenente tutte le informazioni dinamiche osservate, informazioni che possono essere estratte con algoritmi di analisi armonica. Il componente viene comunque limitato, a livello hardware, nella risposta in alta frequenza a 100kHz, frequenza considerata sufficiente a contenere tutte le dinamiche di interesse.

### 1.3. Struttura del sistema ODC

In Fig. 5 è illustrato il diagramma funzionale del sistema ODC utilizzato.

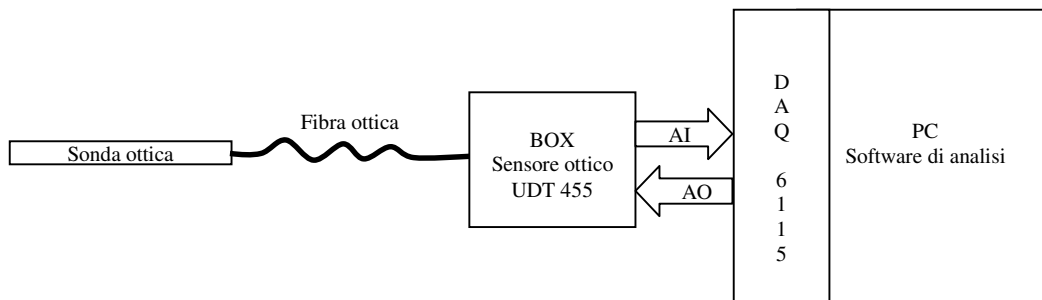


Figura 5: Diagramma funzionale del sistema ODC

Il sistema può campionare in contemporanea i quattro canali analogici di ingresso fino a 10MHz. L'elevata frequenza di campionamento è stata usata per mantenere una risoluzione temporale consistente.

Il sistema compensa la componente continua del segnale di ingresso, per utilizzare i 12 bit di risoluzione dei convertitori DAC solo sulla sua parte dinamica.

## 2. Diagnostica dei processi combustivi flame-less in carbone

Il sistema ODC è stato testato sull'ISOTHERM PWR di SOFINTER impianto che realizza ossi-combustione di uno slurry di carbone, determinando condizioni di combustione Flameless. La diagnostica di processo in questo caso non è di tipo convenzionale, infatti il processo combustivo per sua natura è poco appariscente (visibile) ed inoltre la sua fluidodinamica è lenta (le velocità dei gas combusti sono prossime ai 2 m/s). Una delle instabilità funzionali del processo ISOTHERM coincide con la presenza di fiamma (che è un evento sensibile al sistema ODC), la presenza di fiamma crea forti disomogeneità nella distribuzione della temperatura all'interno del reattore. Il processo combustivo che si viene a realizzare in prossimità della lancia di immissione è di tipo diffusivo e fondamentalmente è dovuto alle elevate pressioni parziali dei reagenti in questa zona del reattore (concentrazioni che vanno ad alterare le condizioni di combustione flame-less).

La condizione di "presenza fiamma non eliminabile e processo combustivo diffusivo (fiammate)" hanno portato ad ipotizzare che monitorare l'evento fiamma implicitamente significava monitorare lo stato del processo e dell'interno del reattore. La sonda osserva le fiamme ed il sistema ODC le analizza come un processo in evoluzione e le caratterizza stimandone tempo di crescita, tempo di decadimento, valore medio degli impulsi validati e frequenza di accadimento permettendo così di stimare la possibile coerenza con lo stato dinamico del processo e producendo una serie di indicatori utili a definire la performance del processo di impianto.

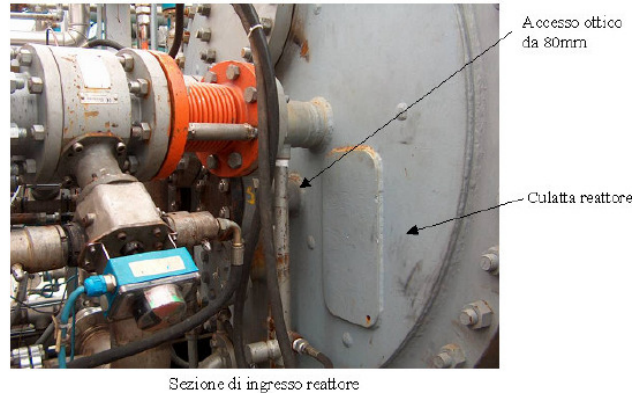
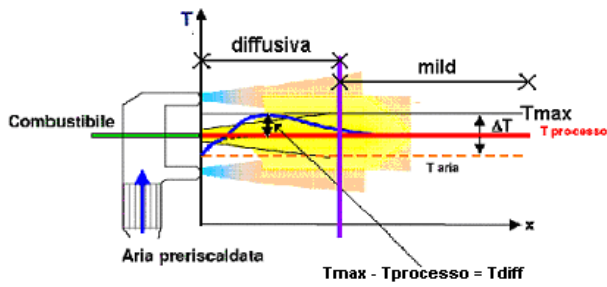
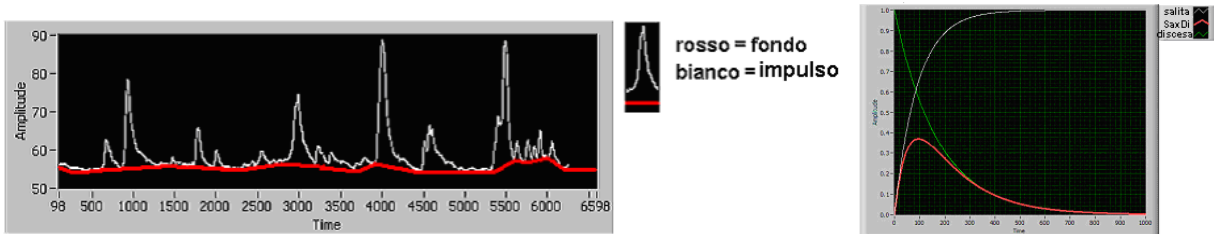


Figura 6: Profilo di temperatura assiale del reattore. Indicazione del punto di accesso ottico per la sonda ODC



$$p_t = r_0 (1 - e^{-kt})$$

$p$  = concentrazione dei prodotti  
 $r_0$  = concentrazione iniziale  
 $k$  = velocità di reazione

Figura 7: Segnale tipico prodotto dalla sonda ODC ed impulso modellizzato

Il segnale rilevato dall'ODC, fig.7, rappresenta l'andamento della luminosità ed i picchi rappresentano le fiammate del processo di combustione, il cui effetto è l'innalzamento della luminosità locale. Il segnale può essere visto come la somma di due segnali: livello di fondo (in rosso) e l'impulso-fiamma. Il livello di fondo costituisce una stima parametrica dello stato termico del reattore nella zona iniziale.

Gli indicatori sintetici (fondo, fiamma media, numero di fiammate validate,  $T_{salita}$ ,  $T_{discesa}$ ) sono entità (dimensionali e non) che racchiudono un'informazione complessa sullo stato del processo e la esplicitano attraverso il loro valore numerico. Il loro uso consente di osservare il processo con una prospettiva diversa da quella convenzionale e permettono di sviluppare algoritmi per una diagnosi precoce del processo; questi essendo eseguibili in *real time*, sono integrabili nel sistema di controllo.



## 2.1. Test di coerenza indicatori processo

Il grafico di Fig 8 mostra che, quando aumenta la portata di ossigeno (rosso), il sistema tende a freddarsi, in quanto il processo combustivo viene sfavorito dalla presenza di O<sub>2</sub> che si trova ad una temperatura molto più bassa (200°C) di quella interna al reattore (1800 ° C). Il fenomeno è evidenziato sia dal pirometro installato nella zona di testa del reattore (verde, TIT-R3106.CV) che dall'indicatore di fondo (celeste).

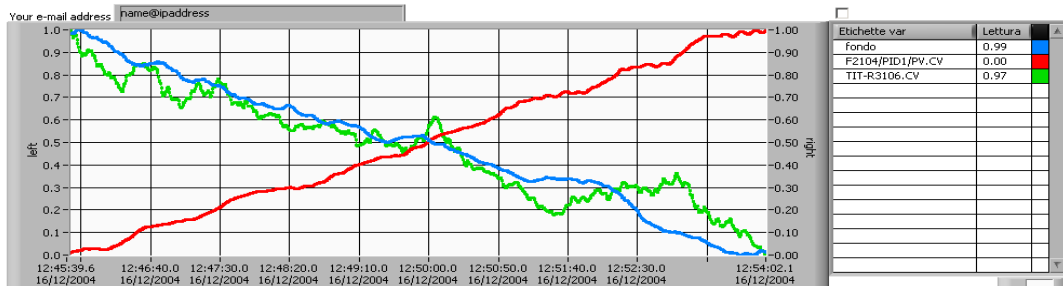


Figura 8 Corenza Fondo - Portata O<sub>2</sub> -Temp

La Fig. 9 illustra viceversa il cambiamento della forma degli impulsi di fiamma in funzione della portata ossigeno: l'aumento della portata ossigeno riduce i tempi di salita e discesa degli impulsi di fiamma, miscela più reattiva.

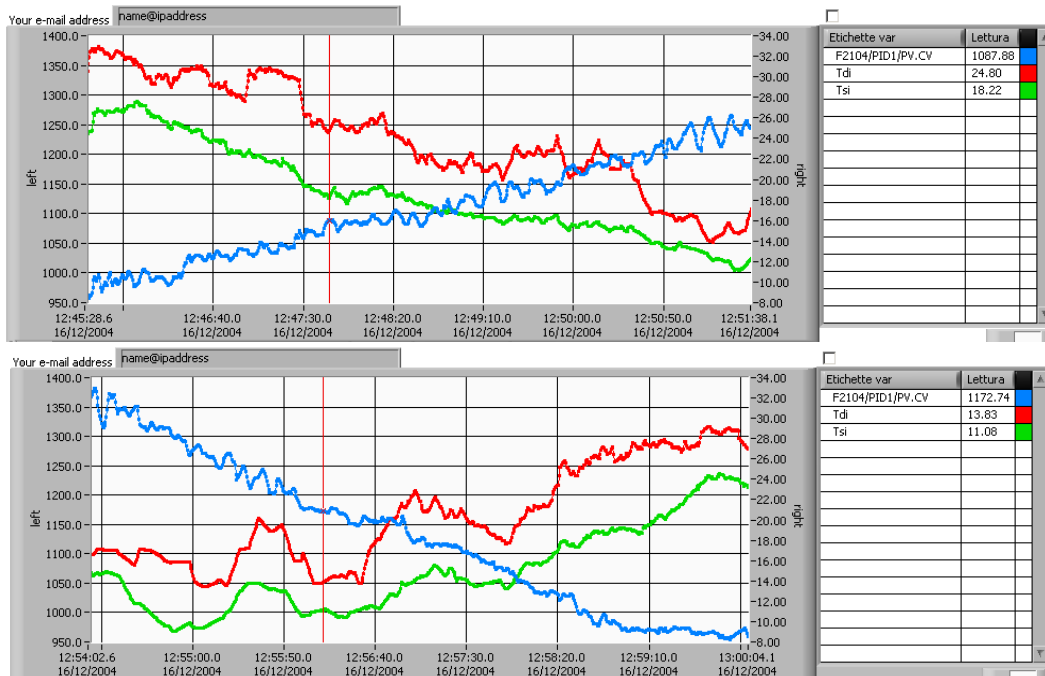


Figura 9: Variazione dei tempi di salita e discesa in funzione di aumento e diminuzione portata ossigeno

La Fig. 10 mostra gli effetti della variazione della portata gas combusti sul processo. Essa influenza leggermente la reattività della miscela, in particolare la sua riduzione aumenta la reattività.

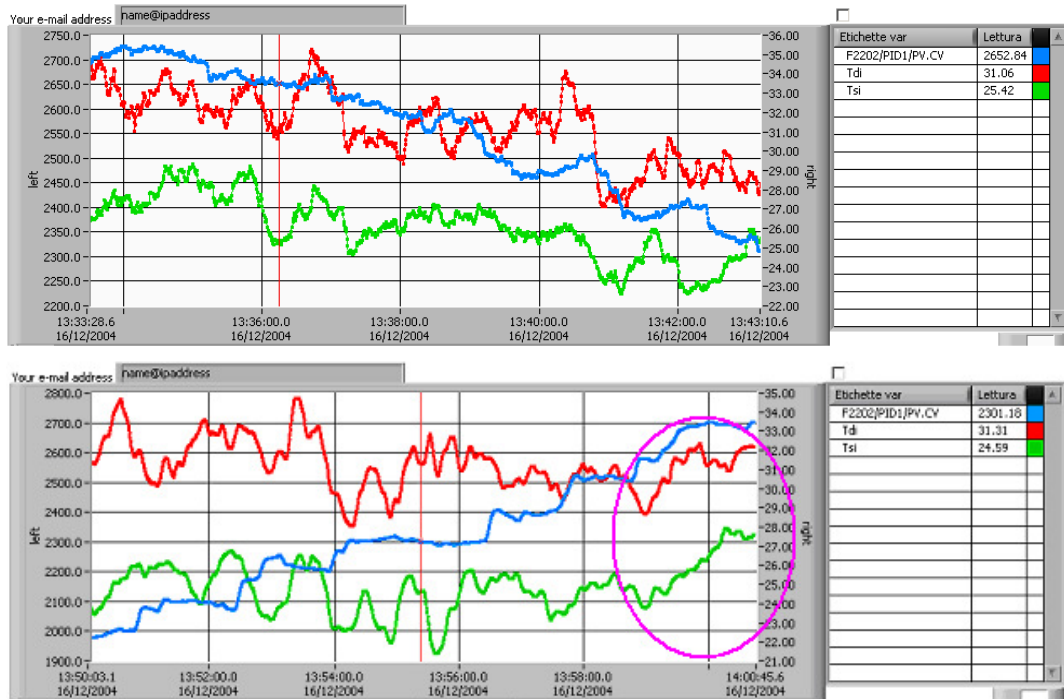


Figura 10: Variazione dei tempi di salita e discesa in funzione di diminuzione e aumento portata gas combusti

Infine la Fig 11 mostra come la variazione della presenza fiamma (N) è inversamente proporzionale alla variazione della portata ossigeno, l'aumento dell'ossigeno raffredda il processo e rende la miscela più magra.

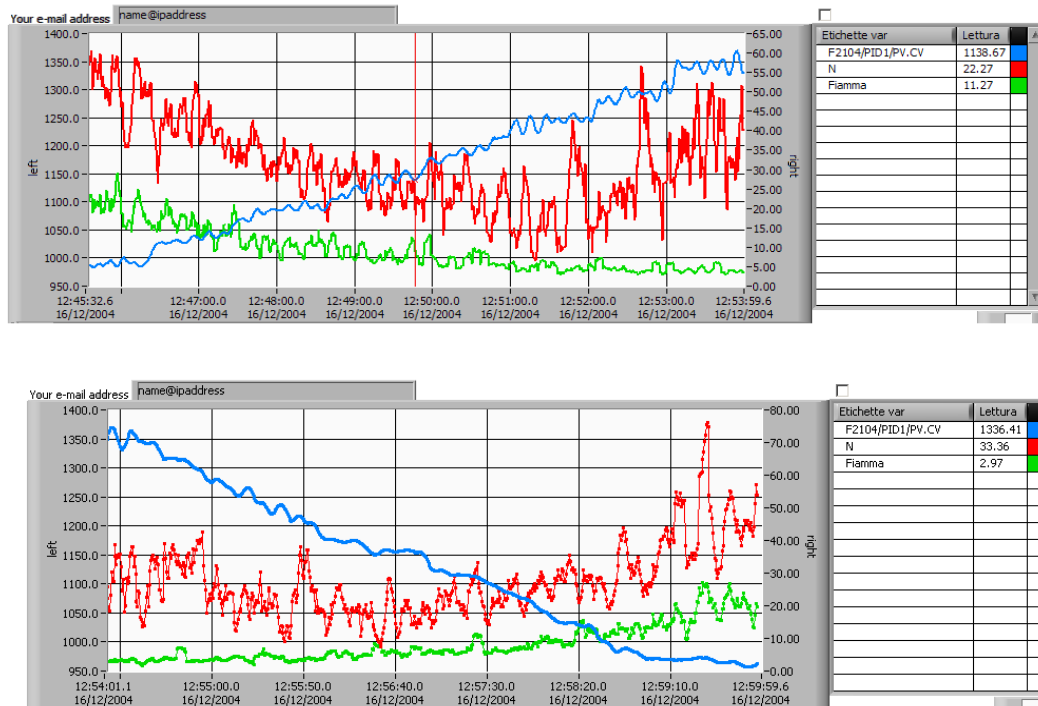


Figura 11: Variazione del numero di impulsi validati N e del valor medio dell'impulso Fiamma al variare della portata ossigeno

### 3. Anemometria

La tecnica sviluppata si applica a flussi aventi energia radiante e prevede l'utilizzo della tecnologia ODC. Il concetto di base è che il processo di combustione rilascia strutture turbolente che, trasportando gas caldi, conservano le loro caratteristiche per un tempo sufficiente a permetterne la rilevazione in due punti diversi dell'asse di fuga del reattore. Due sonde ODC, posizionate lungo l'asse, permettono tramite un algoritmo di cross-correlazione di stimare il tempo di traguardo e quindi, nota la distanza, di valutare la velocità assiale media dei gas. Si riporta un test di misura effettuato sull'impianto ISOTHERM PWR. I due sensori sono stati collocati lungo l'asse del reattore, guardando la zona di immissione del getto di slurry, con le teste ottiche in zaffiro che si affacciano direttamente sul processo.

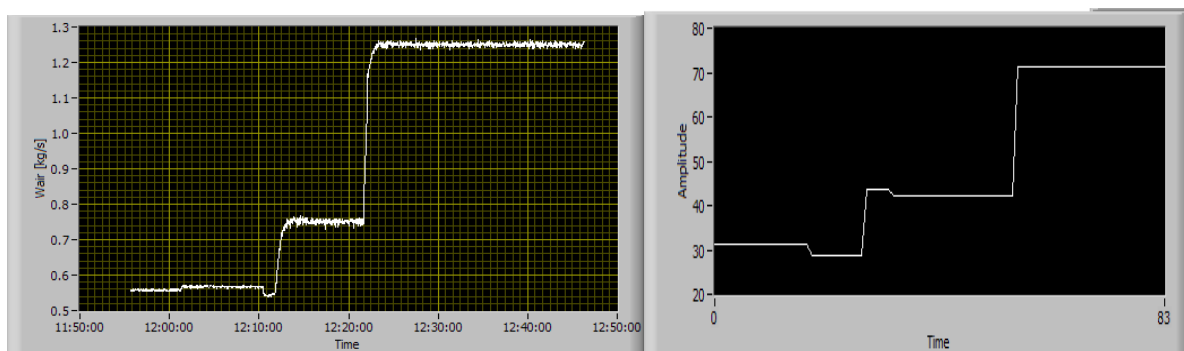


Figura 12: segnale ODC in corrispondenza agli step di portata. A destra la stima di velocità determinata dal segnale ODC

I test sono stati effettuati aumentando il flusso di combustione in tre step (Fig.12). Nel secondo passo, primo aumento di portata, la stessa presenta una leggera instabilità, che viene individuata dal sistema di analisi. L'instabilità diventa consistente, ma di bassa intensità, quando la portata viene nuovamente aumentato (terzo passo).

Il valore della velocità assiale è stato calcolato facendo il cross-spectrum tra i due segnali (equivalente alla cross-correlazione nel dominio del tempo) e prendendo la fase dell'armonica con il contenuto energetico più elevato (associata alla pulsazione della fiamma). :

#### 4. Controllo della stabilità di fiamma

Il sistema ODC è stato implementato in un sistema per il controllo della stabilità di fiamma di un bruciatore premiscelato di piccola scala (laboratorio). Il tipo di instabilità che viene preso in esame è fluido-dinamico. La considerazione principale è che la fluido-dinamica caratterizza essenzialmente le bande relative alle grandi (le piccole scale sono influenzate essenzialmente dalla cinetica chimica). Il controllo agisce con i seguenti steps:

- Apprende la forma del power spectral density in condizioni di stabilità e lo uso come informazione di riferimento
- Compara l'integrale dell'energia contenuta nelle grandi scale dello spettro attuale con quella di riferimento
- Il segnale differenza viene usato per modulare il flusso dell'aria dei jet di controllo.
- L'aria emessa dai jet forma un flusso cilindrico turbolento che contiene la fiamma interagendo con questa e modificandone il power spectral density.

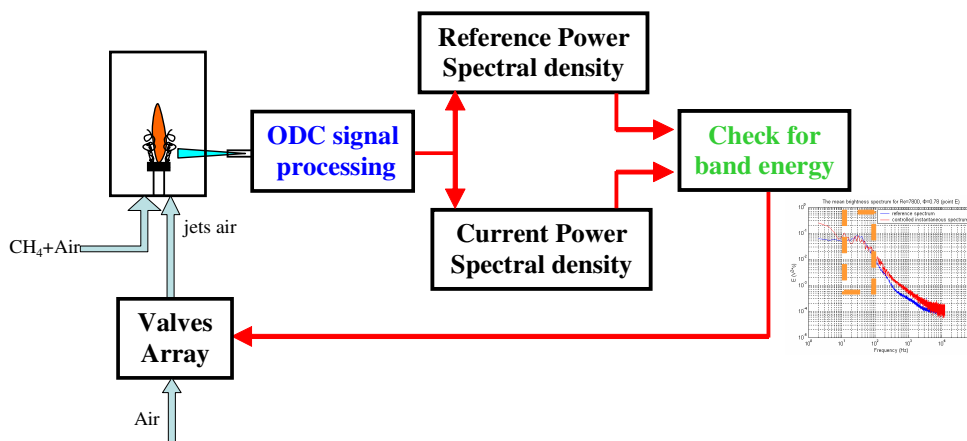


Figura 13: Diagramma funzionale del sistema di monitoraggio e controllo della instabilità fluidodinamica della fiamma

Il flusso di aria attraverso i jets di controllo è modulato tramite un array di valvole on/off. L'array è costituito da 5 valvole, ed ogni valvola viene tarata in modo che i flussi relativi seguano la regola

della potenza di 2. Il valore ottenuto dal confronto delle energie viene condizionato con una funzione sigmoide in modo che la reazione intorno allo zero sia piccola.

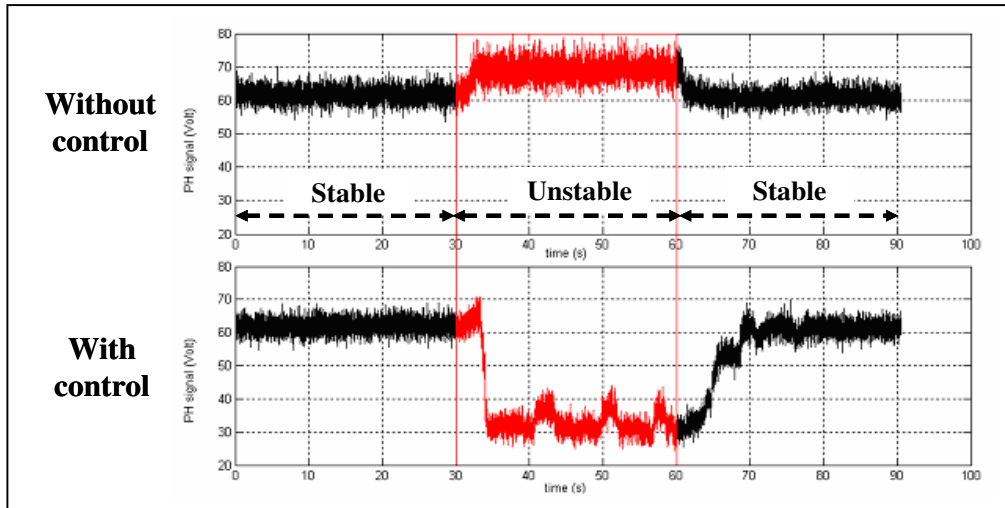


Figura 4 Andamenti dei segnali dell'ODC

Il sistema di controllo guida il processo di combustione verso un nuovo regime caratterizzato da un livello più basso di energia radiante: il contributo spettrale è lo stesso ma il processo combustivo è diverso.

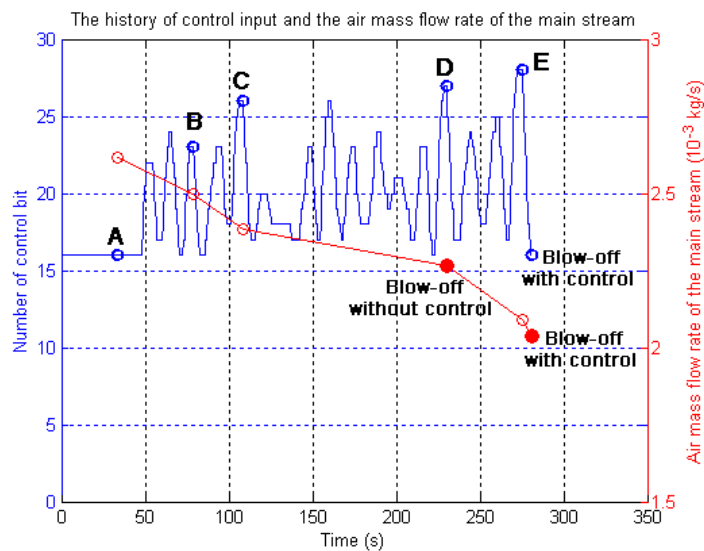


Figura 5 Andamento dell'input di controllo e del flusso massico dell'aria dello stream principale

Analogamente a quanto fatto in piccola scala, in laboratorio, sarà ipotizzato una filosofia di controllo da applicare al sistema ad ossi-combustione, che utilizzi le informazioni desumibili da un rivelatore ODC.

## 5. Conclusioni

La metodologia ODC si è mostrata efficace e vincente nell'applicazione allo studio del processo di Ossi-combustione Flameless di uno slurry di carbone ed acqua. La sua semplicità, robustezza, velocità di risposta e bassa intrusività ne fanno un sistema diagnostico migrabile verso impianti industriali come strumento di processo. Attualmente presso i laboratori dell'ENEA sono in fase di realizzazione sia teste ottiche collimate, per aumentare la capacità risolutiva del campo osservato (questo soprattutto per i sistemi anemometrici), che in configurazione multipla in quanto la possibilità di usare array consentirebbe alla sonda di approssimarsi al funzionamento di camere CCD, ma offrendo velocità incomparabilmente superiori. La quantità di informazioni che la metodologia può ancora fornire, insieme alla possibilità di sviluppo di algoritmi analitici più mirati, potenti e veloci pone questo sistema ancora in una fase iniziale del suo processo evolutivo.

## Riferimenti bibliografici

- 1) "Effect of turbulence on flame radiative emission", *Exp Fluids* (2008) 44:557–564 DOI 10.1007/s00348-007-0415-y (Springer-Verlag 2007) - R. Bruschi, E. Giacomazzi G. Troiani E. Giulietti
- 2) "Sistema di Rivelazione e Diagnosi di Stato di Combustione e Relativo Procedimento, Applicabile in Particolare a Combustori" Italian Patent No. RM2004A000157, 29 March 2004- Bruschi R., Stringola C., Casasanta V., Giacomazzi E., Coratella D., Caruggi M.
- 3) An experimental investigation of the blowout process of a jet flame. Chao Y, Chang Y, Wu C, Cheng T (2000) In: 28<sup>th</sup> symposium (International) on combustion. The Combustion Institute, Pittsburg
- 4) "Flames: their structure, radiation, and temperature", 4th edn Gaydon A, Wolfhard H (1979)
- 5) "Characterization of oscillatory heat release in unstable combustion." In: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference and exhibit, AIAA, AIAA 2005-4325, Tucson - Ghosh A, Young G, Yu K (2005)
- 6) "Sistema anemometrico per la stima della velocità assiale di gas ad alta temperatura in camere di combustione (sistemi turbogas e reattori di spinta aeronautici) " - Italian Patent No. RM 2006 A 000159- R. Bruschi, Stringola C. M. Grottaurea, E. Giacomazzi, S. Giammartini, V. Casasanta, E. Giulietti, F. Manfredi
- 7) "Diagnostics of flow dynamics bringing to the onset of thermo-acoustic instabilities in gas-turbine combustors" - R. Bruschi, E. Giacomazzi, C. Stringola, V. Casasanta, F. Manfredi, M. Caruggi (2004). In: 14th IFRF members' conference. IFRF, noordwijkerhout, The Netherlands
- 8) "Optical Unsteady Characterization of Turbulent Combustion: Application in an Active Control System" 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 10 - 13 July 2005, Tucson, Arizona, R. Bruschi, E. Giacomazzi, S. Giammartini, E. Giulietti, F. Manfredi, C. Stringola
- 9) " Diagnostica e caratterizzazione di un processo di combustione ad elevata temperatura", Roma TRE, AA-04-05, Roberto Borgogni – Tutor R. Bruschi