



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Test valutativo del sistema ODC su impianti IPFR e FOSPER di IFRF,  
operanti in condizioni di ossicombustione

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

*G.Coraggio, M.Faleni, C.Galletti, L.Tognotti,*



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CHIMICA  
CHIMICA INDUSTRIALE  
E SCIENZA DEI MATERIALI**

TITOLO: SVILUPPO DI STRUMENTAZIONE E METODI PER LA DIAGNOSTICA DI SISTEMI OPERANTI IN OSSI-COMBUSTIONE

Autori

R. Bruschi, M.Nobili, C. Stringola (ENEA)

G.Coraggio, M.Faleni (International Flame Research Foundation)

C.Galletti, L.Tognotti (Università di Pisa)

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema 5.2.2.2 *“Sviluppo di un sistema innovativo di combustione – di tipo “flameless” – di polverino di carbone per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione di inquinanti e CO<sub>2</sub>”*

Responsabile Tema: Stefano Giammartini, ENEA

## **"Sviluppo di strumentazione e metodi per la diagnostica di sistemi operanti in ossi-combustione"**

### Sommario

Con riferimento al tema di ricerca 5.2.2.2 "Sviluppo di un sistema innovativo di combustione – di tipo "flameless" – di polverino di carbone per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione di inquinanti e CO<sub>2</sub>" dell'Accordo di Programma MSE-ENEA, questa attività è volta allo sviluppo e messa a punto di sistemi diagnostici per lo studio delle principali variabili chimico-fisiche di processo, utili all'indagine fenomenologica di base sul processo ed alla validazione di codici di calcolo come strumenti di progettazione.

L'attività oggetto dell'accordo di collaborazione con l'Università di Pisa è stata volta dunque allo sviluppo di diagnostica speciale, in connessione con diagnostica non invasiva sviluppata da ENEA, da applicare su impianti a ossi-combustione di taglia significativa (3 MWt) per studio accurato della oxy-combustione di carbone.

### Descrizione delle attività e degli obiettivi previsti

L'attività si è articolata in tre obiettivi intermedi, all'interno dei quali sono individuabili distinte e consequenziali fasi lavorative:

1. Sviluppo di diagnostica di tipo intrusivo e non, finalizzata alla misurazione di campi di temperatura, specie chimiche, flussi termici e altre grandezze rilevanti per processi di oxy-combustione. Particolare enfasi è stata data allo sviluppo di diagnostica che possa fornire, in termini di accuratezza e risoluzione spaziale e temporale, basi di dati per la validazione di codici di calcolo CFD.

Oltre all'analisi dello stato dell'arte sulla diagnostica per sistemi di ossi-combustione di taglia significativa, in questa fase sono state definite le metodologie diagnostiche da utilizzare nei test in campo ed è stata programmata la sperimentazione

2. Test di validazione, condotti su impianti sperimentali messi a disposizione dall'Università di Pisa, attraverso la Fondazione Internazionale Ricerca sulla Combustione (IFRF), operanti in condizioni di ossi-combustione e quindi ad alta temperatura. In questa fase la strumentazione sviluppata è stata impiegata per caratterizzare il processo, in unione con strumentazione non invasiva sviluppata da ENEA, e si ne è valutata la possibile integrazione per l'impiego su impianti dimostrativi di taglia significativa .
3. Studio e individuazione di soluzioni ingegneristiche atte a consentire l'impiego di strumentazione ottica non invasiva su *facility* sperimentali di taglia pilota o industriale. Lo studio ha preso in esame problematiche di protezione termica, meccanica e pulizia di sensori a fibra ottica, considerando condizioni di esercizio pari a 1200°C e 5 bar. Sono stati effettuati test sperimentali per la verifica delle soluzioni impiegate.

## 1. Sviluppo della diagnostica e definizione della sperimentazione su impianti pilota e semi-industriali

In questo capitolo si descrivono le caratteristiche degli impianti che sono stati utilizzati per la sperimentazione e si definiscono le specifiche delle sonde atte a consentire l'impiego di strumentazione ottica non invasiva ENEA su detti impianti.

I sistemi sperimentali utilizzati per i test sono stati l'*Isothermal Plug Flow Reactor* (IPFR) e la fornace *Fo.Sper.*, entrambi eserciti sia in condizioni convenzionali (aria-gas naturale/carbone) che oxy-flame (ossigeno/CO<sub>2</sub>- gas naturale/carbone).

### 1.1 Il sistema ODC in sintesi.

Il sistema ODC (Optical Diagnostics of Combustion) permette di osservare, tramite sonde ottiche per alta temperatura, direttamente i processi combustivi che hanno luogo in una camera di combustione, di rilevarne la fluttuazione radiativa (nel range UV-IR) e di fornire, tramite elaborazione diretta, informazioni qualitative/quantitative sullo stato termofluidodinamico del processo osservato. La possibilità dello strumento di gestire, ad alta velocità di scansione (10Msamples/sec), ed in parallelo (sfasamento temporale nullo) più sonde (4, estendibili ad 8) permette di fornire informazioni sia sullo stato termofluidodinamico locale che sul livello di coerenza tra punti diversi dello spazio di processo; una ricaduta consistente di questa peculiarità è la stima della velocità media dei gas combusti tra punti traggurdati (anemometria on-line). Lo strumento, a bassa intrusività, è installabile su impianti industriali (ambienti ostici), opera on-line e fornisce informazioni in real-time. La velocità di risposta del sistema diagnostico (< 1 sec) lo rende suscettibile alla integrazione nei loops di controllo dei processi di impianto.

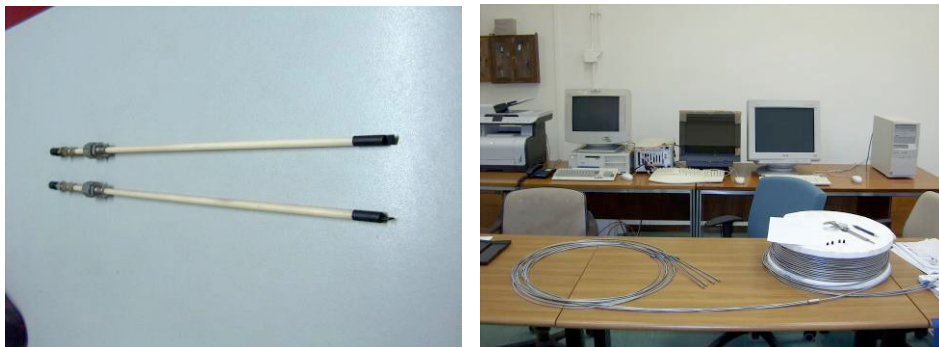


Figura 1 Sonde per alta temperatura, in zaffiro. Fibra ottica in quarzo (45 mt) per remotizzare il segnale ottico delle sonde



Figura 2 Box di interfaccia per la trasduzione ottica-elettrica

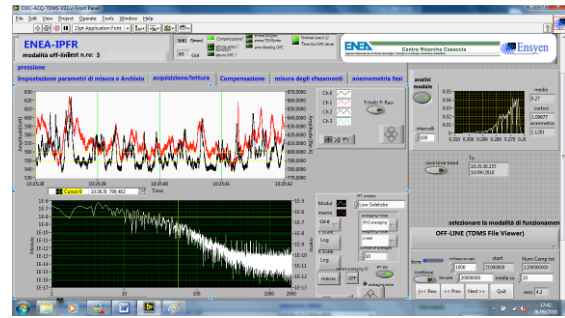


Figura 3 Pannello interattivo nella fase di rilettura dati

## 1.2 Test su IPFR

L'IPFR è descritto nell'Allegato 1. Per i test con la diagnostica non intrusiva ENEA si è pensato di utilizzare sia la camera di combustione posta in testa al reattore, che il reattore stesso, con alimentazione di *stream* di particelle di carbone.

Gli obiettivi della sperimentazione sono stati:

- Verifica delle performance del sistema non intrusivo ENEA per il monitoraggio del funzionamento di un bruciatore a gas naturale di tipo diffusivo (30 kW).
- Verifica della capacità del sistema di monitorare le transizioni tra diversi regimi di combustione (convenzionale ad aria, ossicombustione-flameless)
- Verifica della capacità del sistema di monitorare il segnale emesso da *stream* di particelle di carbone durante la combustione e applicazione di analisi di tipo doppler per la determinazione di caratteristiche del campo di moto nel reattore.

Le sonde ODC usate in questa esperienza sono per alta temperatura (Max working temperature 1800 °C) e vengono inserite direttamente nell'ambiente del processo (camera di combustione e reattore). La sonda inserita in Camera di Combustione (CC) viene attenuata in modo che le due sonde producano un segnale equivalente in ampiezza al fine di ottimizzare la conversione AD (evitare saturazione o bassa risoluzione). In contemporanea vengono registrate le variabili di processo in modo da valutare (off-line) la coerenza.

Il monitoraggio e la diagnostica dello stato combustivo sono ottenuti utilizzando due sonde ODC ad alta temperatura affacciate direttamente nella camera di combustione in modo da avere una prospettiva assiale (frontale al bruciatore) ed una radiale in prossimità della fiamma.

Lo scopo della dislocazione è osservare:

- l'integrale delle fluttuazioni radiative della combustione, sonda assiale
- le fluttuazioni locali della fiamma, sonda radiale (collimata sulla fiamma)



**Figura 1: sonda radiale**

**sonda assiale**

La combinazione delle due informazioni permette di identificare lo stato combustivo:

- La sonda radiale individua la presenza della fiamma e permette di qualificarne (quantificarne), tramite analisi spettrale, lo stato turbolento.
- La sonda assiale verifica la presenza di fiamma lungo tutto l'asse della camera. Avendo una vista frontale è in grado di rilevare, anche in condizione di combustione *mild*, la fiamma che si ha in prossimità del bruciatore.

Il bruciatore è stato gestito anche in modo da creare le condizioni di combustione mild (flameless)

- la temperatura media interna in CC è stato portata ad un valore (1050 °C) superiore a quella di autoaccensione del metano (750 °C)
- è stata ridotta la portata aria compensandola con gas combustibili ricchi di CO<sub>2</sub> in modo da ottenere una consistente diluizione della miscela e riduzione dell'ossigeno disponibile.

In definitiva, le prove si possono suddividere in sei tipi diversi di seguito elencati:

1. Verifica delle condizioni di stabilità del segnale e rumori di fondo
2. Iniezione di gas aggiuntivi alla combustione (azoto)
3. Combustione del char in atmosfera di gas da combustione di gas naturale e aria con O<sub>2</sub> al 4%
4. Variazione dell'eccesso di O<sub>2</sub> nei gas di combustione dal 4% al 6% e viceversa
5. Passaggio dalla combustione di gas naturale in aria a condizioni di ossicombustione e viceversa
6. Misure di velocità del polverino durante la combustione

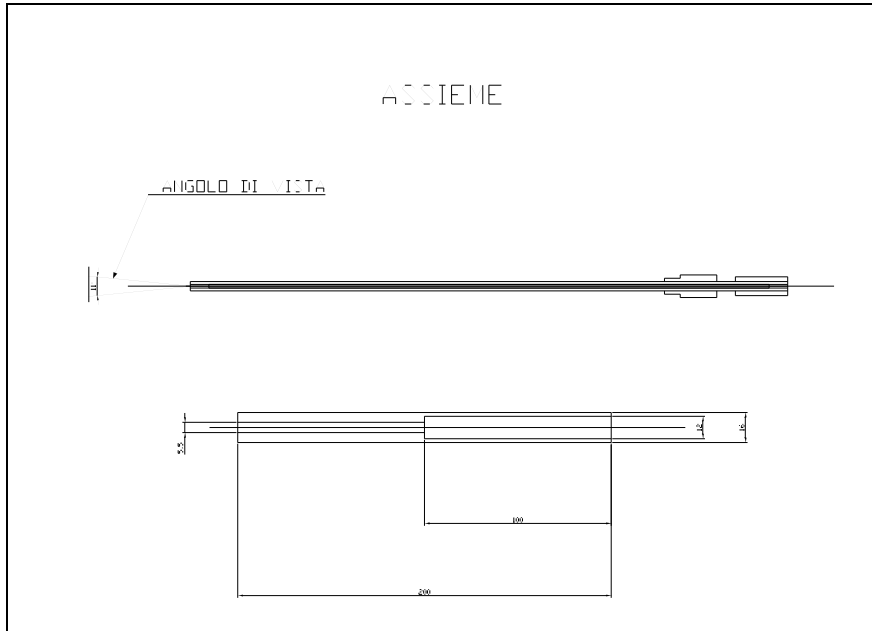
Per i primi cinque tipi di prova i due sensori erano posizionati uno nel precombustore nel bocchello dello scintillatore, l'altro nel modulo 2 del reattore portina 6.

Per l'ultimo tipo di prova i due sensori sono stati posizionati lungo il reattore a varie distanze allo scopo di valutare la possibilità di riconoscere le stesse strutture di emissione durante il percorso e poter quindi calcolare la loro velocità.

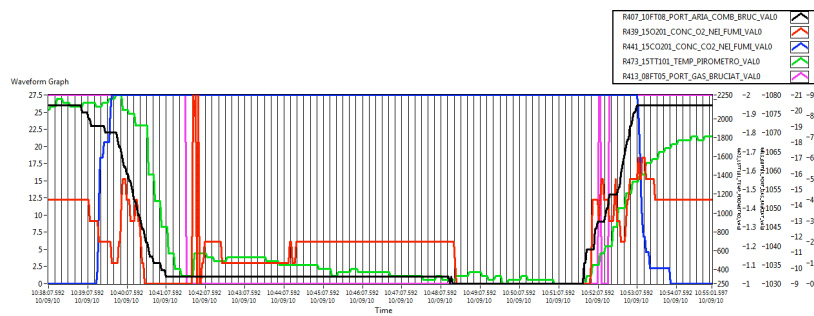
Tutti i dati di esercizio impianto disponibili sono raccolti nel file Excel "Archivio Prove ENEA-IPFR lug-sett10- 20-09-10.xls" presente nella cartella prove ENEA luglio sett 2010.

Nel primo foglio "archivio prove" sono i dati principali, nel foglio "valori medi" sono le medie dei dati estratti dall'archivio di impianto per la durata di ogni prova.

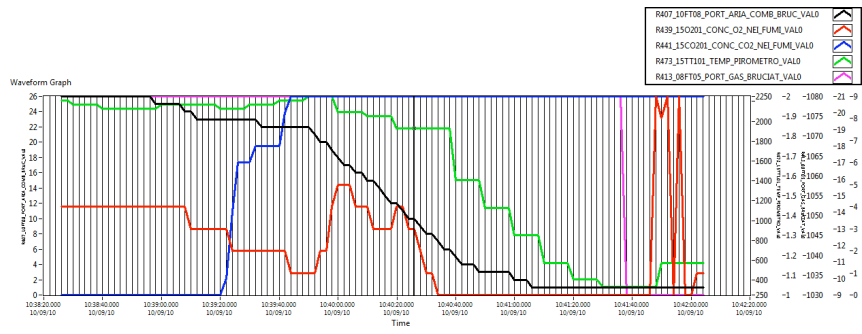
Per le prove su IPFR si sono utilizzate delle semplici boccole in teflon per adattare i sensori ai vari bocchelli interessati alle misure. Nella figura seguente è riportato il disegno del sensore e della boccola utilizzata per inserirlo nei vari accessi.



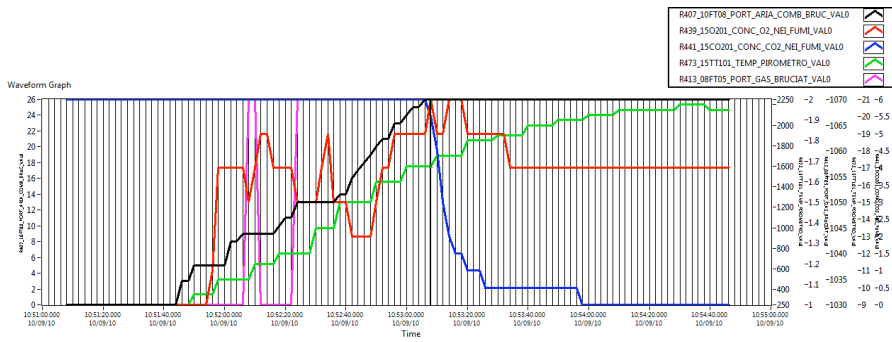
Nella figure 2-4 sono riportati gli andamenti delle variabili di processo con cui si è gestito il combustore IPFR per passare dalla condizione convenzionale in aria a quella in ossicombustione e viceversa



**Figura 2 La figura riporta gli andamenti delle variabili di processo per ottenere le condizioni di entrata e uscita ossicombustione**



**Figura 3: Zoom della fase transitoria air-oxy**



**Figura 4 Zoom della fase transitoria air-oxy**



### **1.3 Test su Fo.Sper.**

L'impianto e le condizioni operative dei test effettuati sono descritte nell'Allegato 2. Per i test con la diagnostica non intrusiva ENEA si sono utilizzate diverse porte, anche mediante acquisizione del segnale da due sonde in parallelo, lungo la fornace, in condizioni di combustione convenzionale e di ossicombustione. Il bruciatore, un Aerodynamically Air Staged Burner di derivazione IFRF, è stato esercito a carbone, in diverse condizioni di funzionamento.

Gli obiettivi della sperimentazione sono stati:

- Verifica delle performance del sistema non intrusivo ENEA per il monitoraggio del funzionamento di un bruciatore a carbone di tipo staged (3 MW).
- Verifica della capacità del sistema di monitorare le transizioni tra diversi regimi di combustione (convenzionale ad aria, ossicombustione)
- Verifica della capacità del sistema di monitorare il segnale emesso da più sensori e applicazione di analisi di tipo doppler per la determinazione di caratteristiche del campo di moto/temperatura nella fornace.
- Analisi dei segnali per la valutazione della possibilità di utilizzo della tecnica per la validazione di approcci modellistici avanzati (LES, interazione cinetica/turbolenza)

I test, essenzialmente, sono stati mirati a valutare l'osservabilità, da parte delle sonde ODC, della combustione di polverino di carbone (verificare, ovvero, se l'opacità dell'ambiente impediva l'osservazione in modo consistente del processo) e, successivamente, valutare la potenzialità risolutiva dello stesso sistema ODC. Su FOSPER sono state individuate tre porte di accesso laterali, P1- P3 - P6, su cui sono state effettuate le misure. Il forno, attualmente, viene utilizzato per esperienze sulla ossicombustione del polverino di carbone. La procedura usata per la transizione da condizioni convenzionali ad aria a ossicombustione è la seguente:

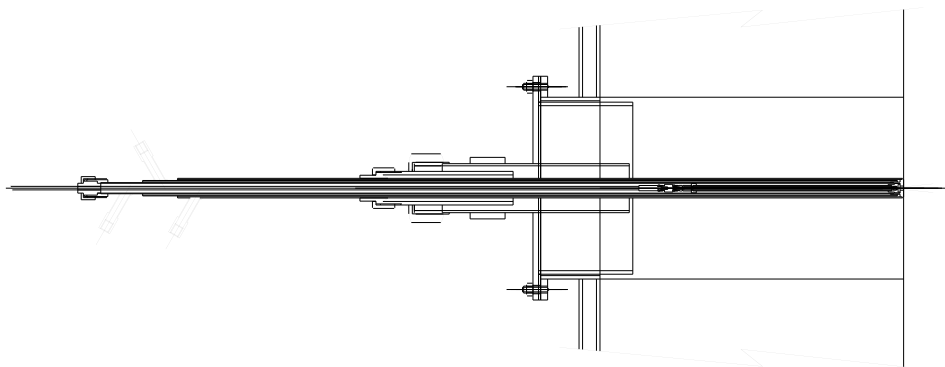
- combustione diffusiva aria-metano, andata a temperatura di esercizio
- ricircolo fumi per diluizione miscela aria-gas (e raffreddamento)
- immissione graduale di ossigeno, andata in ossicombustione gassosa
- immissione di polverino di carbone e contemporanea riduzione gas. La procedura si continua fino a completa sostituzione del gas col carbone.
- ossicombustione del carbone.

Le fasi sono state seguite con il sistema ODC. La posizione delle sonde è stata definita senza conoscere a priori le dimensioni della f ipotetica, solo a posteriori (dopo l'analisi delle misure) è possibile individuare la posizione ottimale per l'osservazione delle fenomenologie legate al processo.

**1.4 Sviluppo e realizzazione di sonde atte a consentire l'impiego di strumentazione ottica non invasiva ENEA su impianti sperimentali di taglia semi-industriale.**

Nella figura seguente è rappresentato lo schema della sonda realizzata ed utilizzata per posizionare i sensori anche all'intero del forno sperimentale FOSPER o altri impianti che richiedano un raffreddamento del sensore. I disegni costruttivi sono allegati (cartella *prove ENEA luglio sett 2010*).

ACCIAIERIE BONDI-BOCCELLO-FORTINA LATO EST



## 2. Risultati dei test sperimentali

### 2.1 Test su IPFR

Nelle figure seguenti si riportano alcuni esempi significativi degli spettri ottenuti nei test in IPFR.

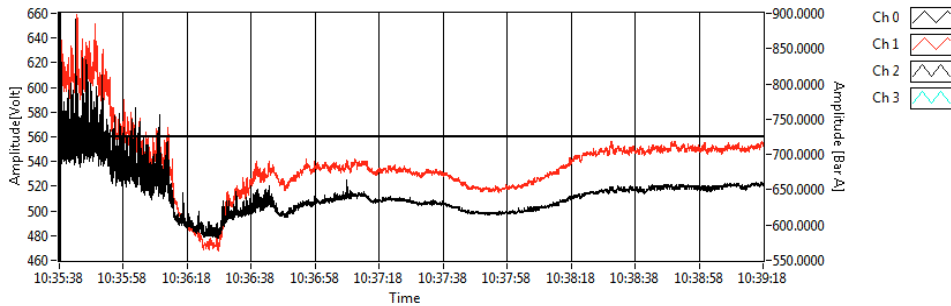


Figura 4 Transitorio premix-mild. Trend dei segnali prodotti dalle sonde ODC. Nero-assiale, rosso-radiale.

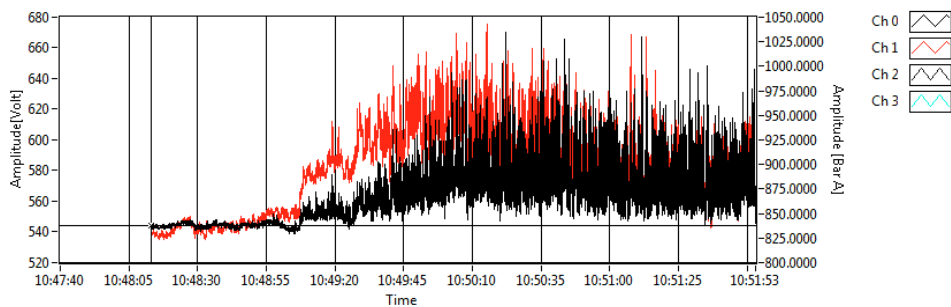
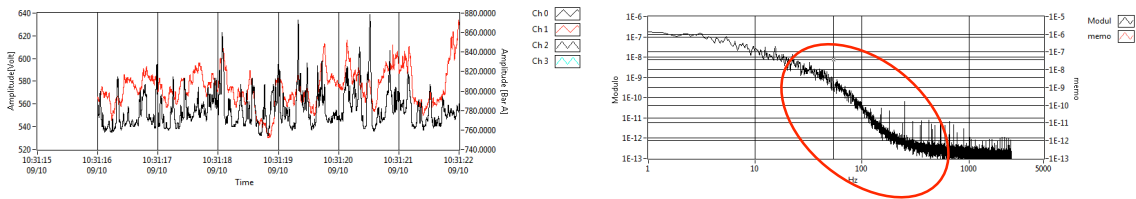


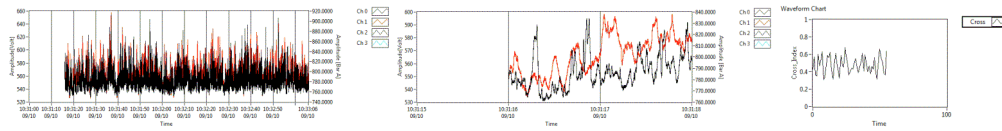
Figura 5 Transitorio mild-premix. Trend dei segnali prodotti dalle sonde ODC. Nero-assiale, rosso-radiale.

La coerenza temporale dei segnali *ODC- Variabili di Processo* non è perfetta in quanto gli orologi dei due sistemi di acquisizione non sono stati sincronizzati (il sistema ODC è in anticipo di circa 3'). Comunque, dai trend delle misure che hanno inseguito le fasi di andata e ritorno *premix-mild-premix*, dalla figura 5 alla 9, sono ben visibili i mutamenti della dinamica del segnale ODC e la forte coerenza temporale che questa ha con i trend delle variabili di processo (corrispondenza dell'inizio e durata del fenomeno, circa 13'). Sono state eseguite altre due misure in condizioni stazionarie:

- **condizione premix.** Il segnale ODC individua la presenza di una dinamica turbolenta con decadimento inerziale delle grandi scale (zona rossa). Si può notare come i segnali delle due sonde abbiano una coerenza discreta, ma non elevata (indice cross-correlazione medio 0.5): il segnale assiale, con vista integrale, contiene le dinamiche di quello radiale.

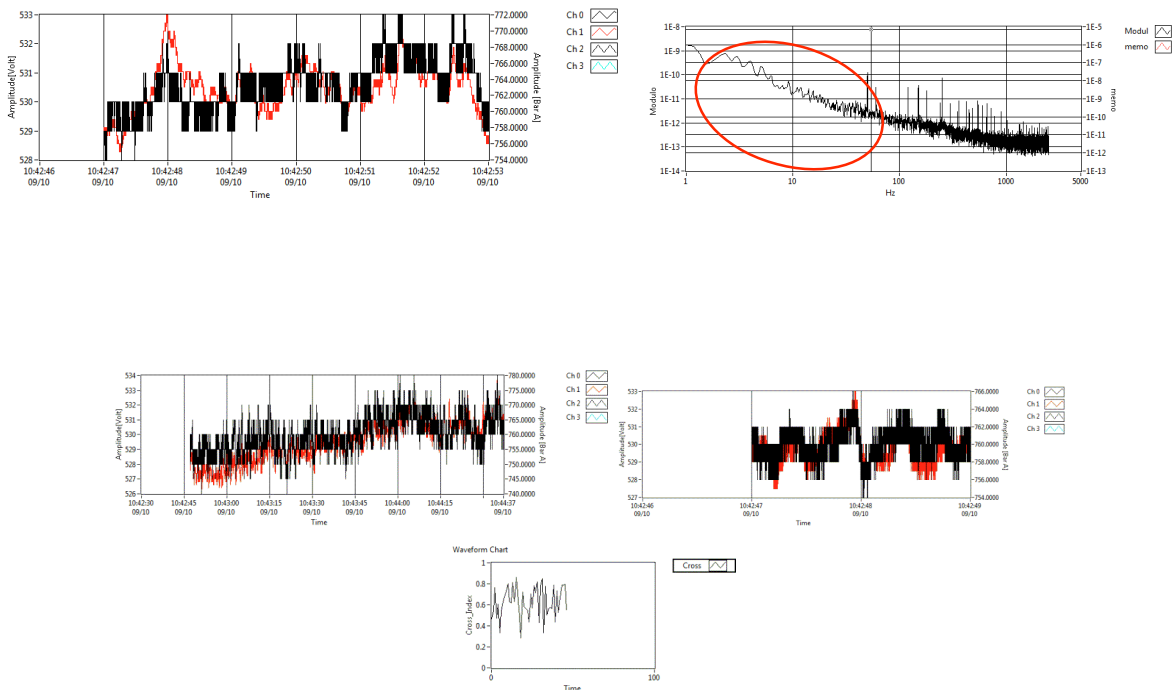


**Figura 6 Power spectral density in condizione premix**



**Figura 7 Andamento temporale dell'indice di cross-correlazione in premix**

- condizione mild.** Il segnale ODC indica assenza di una dinamica turbolenta in entrambe le sonde: questo implica che la fiamma è praticamente assente. L'assenza di fiamma (dovuta essenzialmente alla forte diluizione della miscela combustiva che non permette l'autosostentamento locale della fiamma, assenza di fronte di fiamma) fa sì che le reazioni di combustione, e quindi della relativa emissione radiativa, non siano legate al comportamento turbolento della miscela comburente-combustibile, ma essenzialmente alla fluttuazione del loro valore medio (quindi le sonde ODC non vedono la fluidodinamica: infatti lo spettro, vedi zona rossa, tende ad appiattirsi, non sono evidenti le grandi scale ed il relativo decadimento inerziale). L'indice di cross-correlazione medio è alto, 0.7, questo indica che le fluttuazioni radiative tendono a divenire coerenti nell'intero volume della camera di combustione, condizione che caratterizza lo stato di combustione mild (combustione di volume)

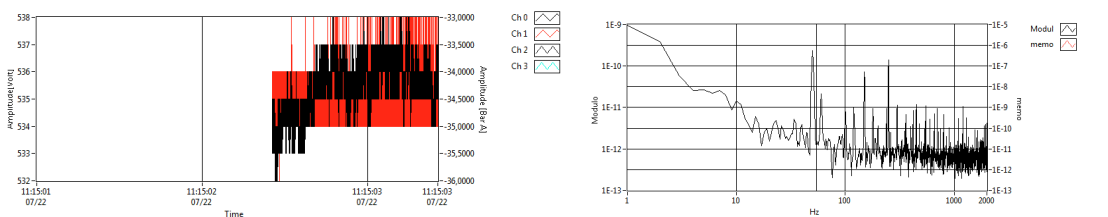


## Individuazione del flusso di particelle di carbone lungo l'asse del reattore

Sono state effettuate delle misure con le sonde ODC inserite in punti di osservazione disposti lungo l'asse del reattore, lo scopo era di verificare l'efficienza delle sonde a rilevare le particelle di carbone che bruciano mentre lo percorrono.

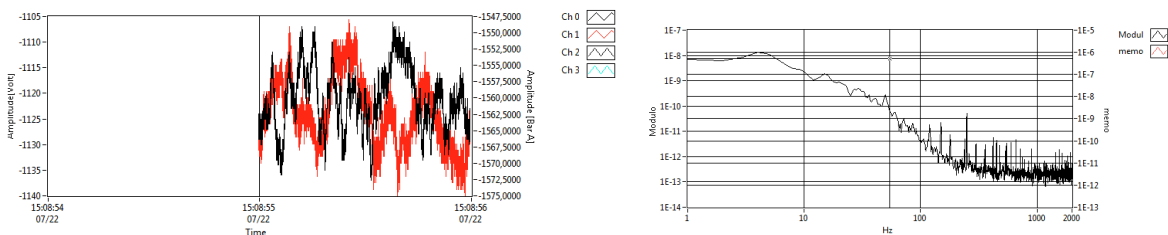
### Misura: fondo (senza carbone e con gas di trasporto 1.5 nmc/h)

ch. 1 - modulo M2, Porta 6, ch. 0 - camera di combustione



### Misura: con carbone 110 g/h e con gas di trasporto 1.5 nmc/h

ch. 1 - modulo M3B, Porta 8, ch. 0 - modulo M4B, Porta 10



I due test riportati evidenziano:

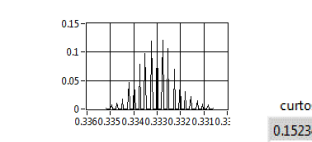
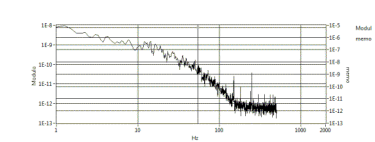
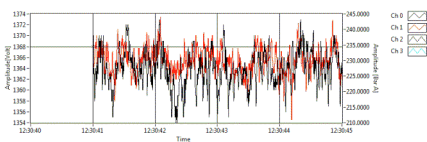
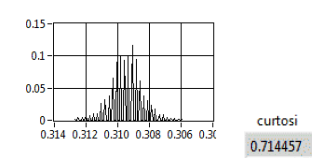
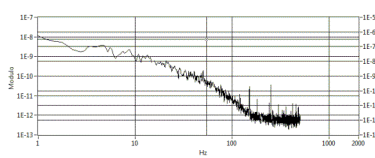
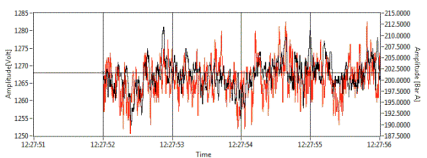
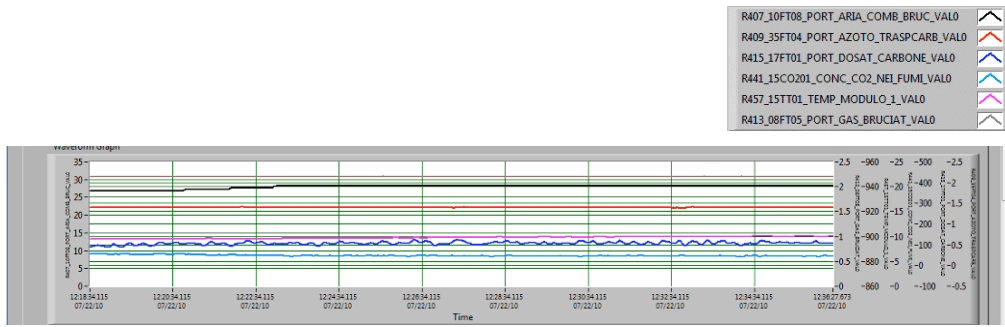
- la capacità delle sonde ODC di osservare fenomenologie di combustione di polverino di carbone anche con flussi molto piccoli (100 g/h).
- Di inseguirne e osservarne lo stato di combustione lungo l'asse del reattore permettendo così di rilevare e valutare i tempi di combustione di questo (permettendo così una sua migliore caratterizzazione)

La distanza delle sonde (25 cm), e la loro posizione, radiale-normale (90°) permettono al sistema ODC di effettuare una stima della velocità media del flusso di polverino, in fase di combustione, lungo il percorso del reattore. Distanze superiori ai 25 cm non permettono di evidenziare strutture tali da permetterne la loro rilevazione coerente.

Mis 6 del 22/7/2010

Sonda CH1 in M2B P6, CH0 M2C P7. distanza relativa 25 cm, posizione radiale-normale. Durata 120 sec. Freq. di camp. 5 MHz.

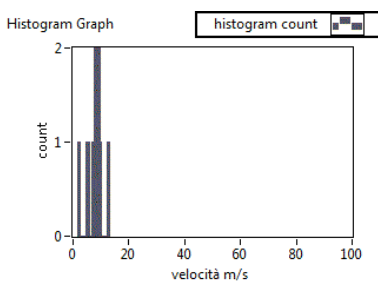
Due misure: 22-07-2010-12-27-52.608, 22-07-2010-12-30-41.092



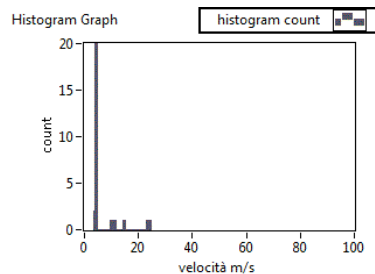
Delle due misure vengono riportati gli andamenti delle variabili di processo, dei segnali ODC, nel dominio del tempo e della frequenza, ed una stima della stabilità del processo rappresentata dall'istogramma delle variazioni di segnale, che approssima molto la forma di una gaussiana ottimale (vedi il valore di curtosi). Due metodi di analisi sono stati usati per stimare la velocità media delle particelle, entrambe sono basati sull'analisi della fase relativa tra i due segnali.

Il primo metodo si basa sulla stima dello sfasamento lineare tra i due segnali, il secondo la stima dello sfasamento viene prima processata ed ottimizzata utilizzando i valori più consistenti dello sfasamento (bassa fluttuazione).

Il primo metodo fornisce due risultati diversi: 12,744 m/sec e 4,431 m/sec. Il secondo metodo da una informazione più stabile, in entrambe i casi punta su circa 9-10 m/sec.

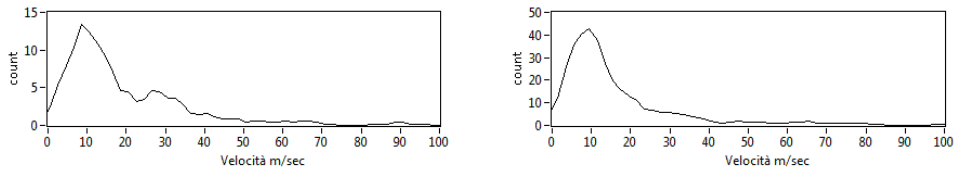


Speed 12.744



Speed 4.4319

Figura 8 Distribuzione della velocità con il metodo lineare delle fasi



**Figura 9 Distribuzione della velocità con il metodo delle fasi ottimizzate**

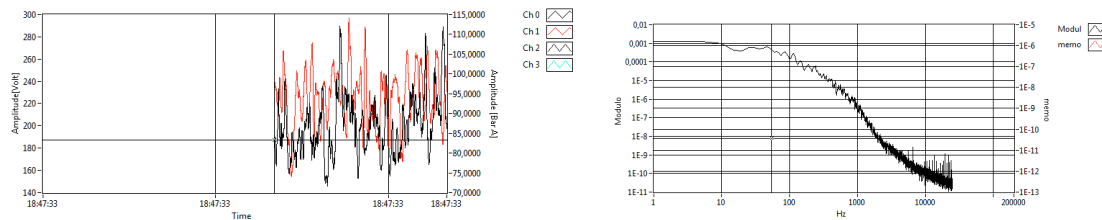
La possibilità di utilizzare un sistema ODC multisonda (8) potrebbe fornire una informazione completa ed affidabile sulle particelle in combustione che fluiscono lungo il reattore in quanto permetterebbe di stimare posizioni, tempi di percorrenza e durata del processo combustivo dei granuli di carbone. Il sistema inoltre permette di avere un monitoraggio globale sia del combustore che del reattore ed osservare in modo distinto sia la fase combustiva dei volatili che del CHAR.

## 2.2 Test su Fo.Sper.

### Ossicombustione con carbone

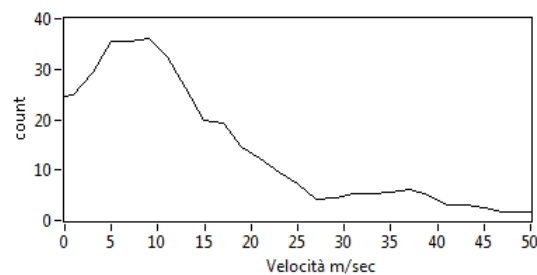
Ricircolo gas combusti; Ossigeno su aria primaria e secondaria

Sonda ch.0 su portina 1, Sonda ch.1 su portina 3



**Figura 10 Il sistema mostra una evidente capacità di rilevazione del flusso in combustione**

Il test dimostra che il sistema ODC ha capacità di osservare (non si verifica accecamento delle sonde per opacità d'ambiente) in modo consistente il processo di ossicombustione in atto nel forno (3 MW) e fornisce informazioni sulla dinamica del flusso di polverino in fase di combustione. L'osservazione contemporanea su due porte vicine P1 e P3 (interasse porte 27,5 cm) permette di effettuare anche una stima della velocità media del flusso in fase di combustione. In fig.16 è riportata la distribuzione delle velocità di flusso di polverino rilevate tra la porta 1 e 3



**Figura 11 Distribuzione della velocità di flusso di polverino rilevata tra le porte 1-3 (distanza 58 cm)**



**Figura 12 Inserzione delle sonde nella porta P1 e P3**

### Anomalie funzionali

Il sistema ODC durante le misure ha evidenziato un comportamento anomalo della dinamica radiativa. Prima di trarre conclusioni è opportuno fare ipotesi con considerazioni critiche anche

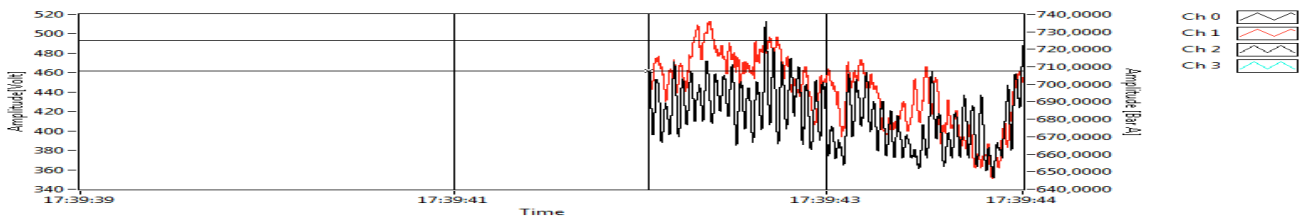


sul set-up strumentale ODC. Per queste misure sono state usate sonde inserite direttamente nel cavedio ottico, le sonde penetrano per una lunghezza di 20 cm (il diametro è di 5mm) ed il cavedio (50 cm) è flussato con aria per mantenere bassa la temperatura di lavoro delle sonde.

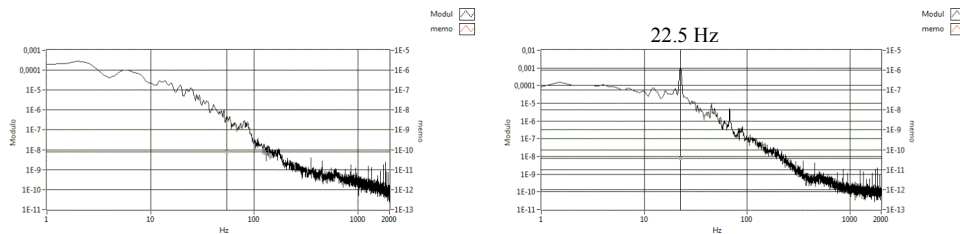
**Misura 1** condizioni: ossicombustione con carbone

Ricircolo gas combusti, Ossigeno su aria primaria e secondaria

Sonda ch.0 su portina 1, Sonda ch.1 su portina 3



**Figura 13** Andamento del segnale ODC. Rosso CH1 (P3), nero CH0 (P1)



**Figura 14** spettro mediato, sinistra sonda in P3 e destra sonda in P1

La frequenza presente, 22.5 Hz è particolare: è una sub-armonica dei 50Hz della rete di alimentazione elettrica.

**Ipotesi 1, critica negativa sul set-up delle sonde ODC.**

La sonda è una barra di piccole dimensioni inserita in un cavedio flussato con aria in pressione: non si può escludere la possibilità di vibrazione della sonda, con comportamento tipo ancia forzata alla frequenza di 22.5 HZ, che si ripercuote sul segnale acquisito.

**Ipotesi 2, fluttuazioni dei sistemi di alimentazione del forno.**

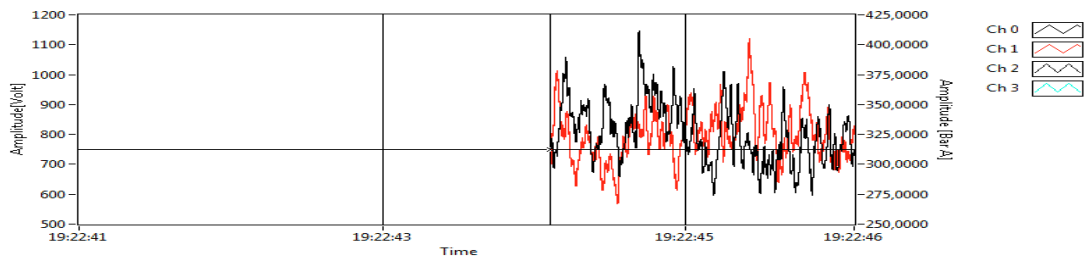
Questa ipotesi può essere avvalorata dal fatto che è strano che solo una delle sonde veda la fluttuazione e quindi la fenomenologia in atto potrebbe essere limitata al suo campo visivo. Inoltre, va considerato che in successione alle misure il forno è andato in blocco, quindi esisteva effettivamente una condizione di esercizio anomalo.

Per evitare, o meglio ridurre, la possibile anomalia funzionale delle sonde sono state effettuate altre misure usando sonde più corte (15 cm, stesso diametro). Ovviamente il forno è stato riattivato ed esercito a condizioni probabilmente diverse.

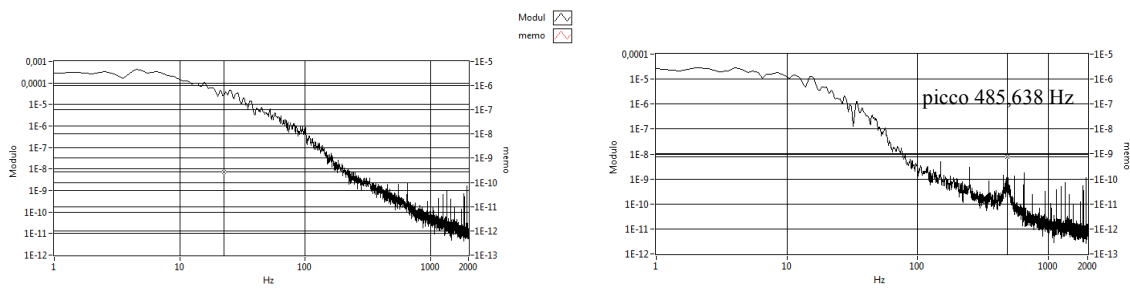
**Misura 2** condizioni: ossicombustione con carbone

Ricircolo gas combusti, Ossigeno su aria primaria e secondaria

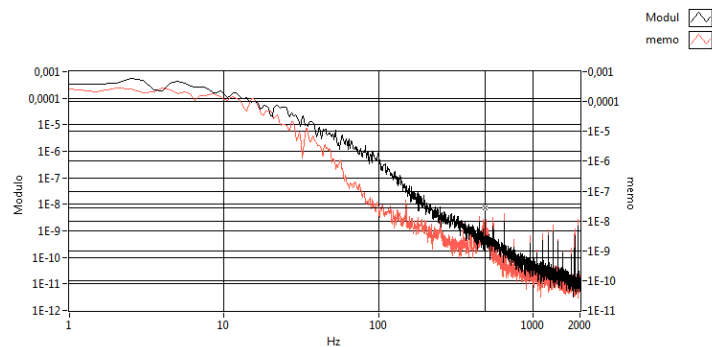
Sonda ch.0 su portina 1, Sonda ch.1 su portina 3; Sonde da 15 cm (penetrazione 12cm)



**Figura 15 Andamento del segnale ODC. Rosso CH1 (P3), nero CH0 (P1)**



**Figura 16 Spettri medi. Sinistra CH0. Destra CH1**



**Figura 17 Confronto degli spettri medi. Nero CH0. Rosso CH1**

In questa condizione di esercizio (individuabile dal riferimento temporale assoluto) non si nota più l'armonica a 22.5 Hz sulla sonda CH0 (P1), ma si evidenzia un picco a 485 Hz solo su CH1 (P3). Inoltre dal confronto degli spettri medi, figura 22, si può notare come il contenuto spettrale si deformi osservando il processo con una distanza assiale di circa 57 cm (distanza P1-P3). Il decadimento delle scale turbolente si allontana da quello caratteristico dei gas (Kolmogorov), le emissioni radiative sono prodotte dalle polveri di carbone che hanno una fluidodinamica più dura (decadimento più veloce).

### 3. Conclusioni

Il sistema ODC ha mostrato la capacità di seguire i processi termo fluidodinamici relativi alla combustione di polverino di carbone in sistemi di taglia diversa ed in diverse condizioni operative. Non sembra risentire eccessivamente delle condizioni gravose di esercizio dei test effettuati su impianti di taglia semi-industriale ( opacità legata all'ambiente- camera di combustione di notevoli dimensioni).

In particolare:

- Il sistema diagnostico è in grado di monitorare l'esistenza di diversi regimi di combustione e le transizioni tra essi.
- Il sistema è in grado di cogliere, anche dal punto di vista semi-quantitativo, importanti caratteristiche del campo emissivo legato al campo di moto/temperatura in fiamme di taglia elevata (3 MW), mettendo in evidenza l'esistenza di frequenze tipiche per ogni sistema *apparecchiatura sperimentale-condizione operativa*.
- Il sistema può essere utilizzato per tracciare il moto di particelle solide in sistemi reattivi.

L'utilizzo del sistema ODC per il monitoraggio e controllo della combustione, su taglia pilota ed industriale, in condizioni non convenzionali (*oxy-mild*) appare promettente e individua ulteriori obiettivi e traguardi della ricerca volta allo sviluppo di sistemi diagnostici avanzati non convenzionali.