



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

**“SVILUPPO E MESSA A PUNTO DI METODOLOGIE DIAGNOSTICHE
PER LO STUDIO DELLE PRINCIPALI VARIABILI FISICHE DEL
PROCESSO DI OSSI-COMBUSTIONE”**

Parte 2: Analisi dati e sviluppo di metodologie diagnostiche

Romano Bruschi (EN.SY.EN. srl)



“SVILUPPO E MESSA A PUNTO DI METODOLOGIE DIAGNOSTICHE PER LO STUDIO DELLE PRINCIPALI VARIABILI FISICHE DEL PROCESSO DI OSSI-COMBUSTIONE”

Parte 2: Analisi dati e sviluppo di metodologie diagnostiche

Romano Bruschi (EN.SY.EN. srl)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂

Responsabile Progetto: Antonio Calabrò, ENEA

SOMMARIO

Il presente report è strutturato in due parti: nella prima viene fatto un approccio analitico al contenuto informativo dei dati acquisiti, nella seconda viene valutata la potenzialità diagnostica delle informazioni estratte. Le campagne di acquisizioni dati furono effettuate in modo da poter facilmente discriminare il diverso comportamento, nel processo ossi-combustivo, di diverse tipologie di combustibile (per la precisione due: polverino di carbone e macinato di semi di girasole) e con diverse granulometrie. Il setup strumentale del sistema ODC era stato studiato per verificare la possibilità di stimare i tempi relativi con cui evolvono le fenomenologie di devolatizzazione e combustione della fase liquida (TAR) sia rispetto all'istante di immissione che rispetto all'inizio dell'ossi-combustione della fase solida (CHAR) dei granuli di carbone. Dalle informazioni estratte si è potuto risalire, come sperato e con stima consistente, ai tempi di innesco delle fenomenologie di interesse ed alla distribuzione assiale delle velocità di trasporto lungo la zona iniziale del reattore. Inoltre, cambiando il setup delle sonde disponendone una sul fondo del reattore, si è potuto acquisire integralmente tutta l'evoluzione della dinamica combustiva dall'ingresso fino alla zona di quenching, lo scopo è di verificare sia l'attendibilità che la leggibilità dei dati forniti dalle sonde radiali e soprattutto risalire in modo corretto al tempo di combustione della parte solida (char), informazione di supporto non trascurabile alle successive fasi analitiche di caratterizzazione combustibile a cui sono sottoposte le ceneri residue.

Inoltre dai segnali acquisiti dalle sonde radiali è osservabile la presenza di dinamiche veloci dell'emissione luminosa, questa fenomenologia è, ipoteticamente, correlabile alla crisi meccanica dei granuli di carbone (produzione di micro o nano polveri?).

L'analisi dei comportamenti delle dinamiche osservate e la stima della loro coerenza con lo stato chimico-fisico del reattore permette altresì di definire indicatori diagnostici suscettibili ad un uso on-line con il processo combustivo di impianti reali. La stima on-line della variabilità dell'ignition delay della parte volatile con la temperatura è una informazione non trascurabile per il controllo della disomogeneità della distribuzione della temperatura nella camera di combustione. La possibile coerenza tra crisi-meccanica e presenza delle polveri nei fumi. Il tempo minimo di permanenza del polverino in camera di combustione in funzione della granulometria e della temperatura.

Analisi dei dati prodotti dalle campagne di misura effettuate sull'impianto IPFR

1. Finalità e scopo delle campagne di misura

Sull'impianto IPFR sono state effettuate due campagne di acquisizione dati entrambe mirate a:

- Stima dell'ignition delay (DEVO, ritardo devolatizzazione) e della durata della combustione della fase liquida (TAR) (carbone tipo S.A.)
- stima del ritardo di innesco della fase solida (CHAR)
- Stima dei tempi di permanenza e della velocità di trasporto (velocità gas combusti)
- individuazione di fenomenologie a dinamica veloce e loro interpretazione (crisi meccaniche dei granuli di carbone)
- Osservazione ed individuazione dello stato combustivo (diffusivo ed oxy) nel pre-combustore

2. Il reattore IPFR ed il setup strumentale dedicato

Il reattore verticale è il cuore dell'impianto. Consiste in un tubo di 15 cm di diametro, 4,5 m di lunghezza ed è suddiviso in dieci moduli. I moduli si suddividono a loro volta in due tipi, il TOP e il BOTTOM hanno un'altezza di 25 cm e sono privi sia di termoresistenza sia di termocoppia. Il TOP presenta anche una portina denominata portina uno.

Gli altri otto moduli sono lunghi 50 cm e sono numerati dall'1 all'8. I moduli 1 e 2 presentano 3 portine mentre gli altri 6 ne hanno 2. In totale le portine sono 19 e permettono di raggiungere il reattore attraversando il materiale refrattario che lo circonda (Figura 5). Grazie alla loro intercambiabilità è possibile cambiare i bocchelli delle portine tra loro dotando di grande flessibilità il reattore.

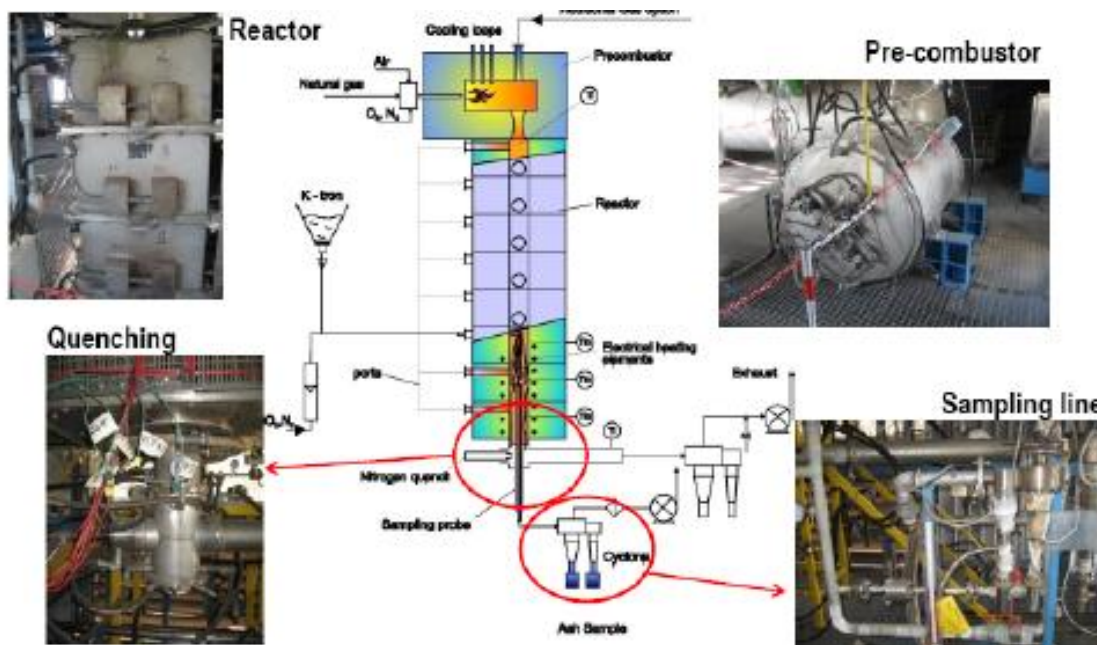


Figura 1 Impianto IPFR nelle sue sezioni principali

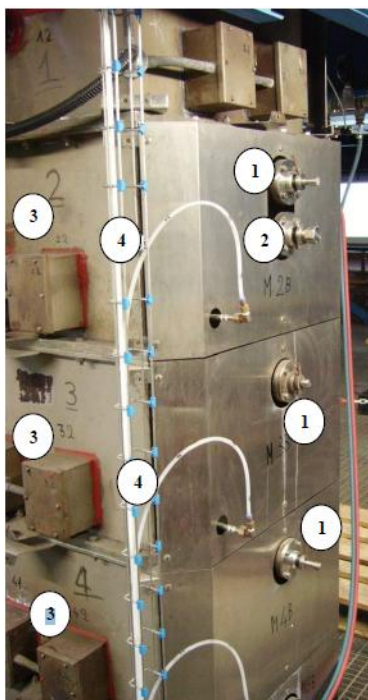


Figura 2 Particolare sui Moduli 1, 2,3 e 4. Si notano le portine predisposte per la lancia del combustibile (1) e quella per il pirometro (2). Sono inoltre visibili gli alloggiamenti delle termoresistenze (3) ed i tubi per il raffreddamento dei moduli in cui scor

Le quattro sonde ODC, per l'osservazione diretta del processo, sono inserite in porte disposte lungo l'asse del reattore.

Le porte interessate e le relative quote (fine reattore è base di riferimento) sono:

portina	Quota dal fondo mm
P5	3636
P6	3509.5
P7	3383
P8	3133
P9	2883
P10	2633
Fondo	0

portine	Dx mm
P5-P6	126
P6-P7	126
P7-P8	250
P8-P9	250
P9-P10	250
P10- fondo	2633

Le porte pari sono disposte radialmente a 90° rispetto a quelle dispari.

Istallazione delle sonde nelle due campagne sperimentali, corrispondenza canale-portina:

- campagna 1 (aprile 2011): CH0-P6, CH2-P7, CH1-P6, CH3-P7
- campagna 2 (settembre 2011) : CH0-P6, CH2-P8, CH1-P10, CH3-fondo reattore

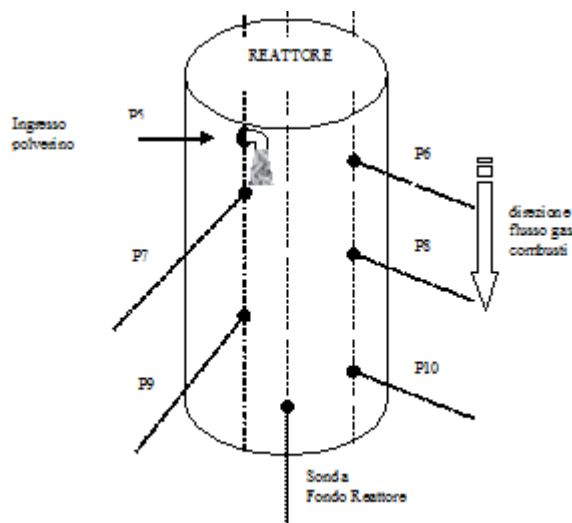


Figura 3 Configurazione dei punti di installazione per le sonde ODC

3. Il campo visivo delle sonde.

La sonda ottica è costituita da una barretta di zaffiro di diametro 2mm inserita in un contenitore cilindrico di allumina. La testa ne definisce il campo visivo e considerando che il contenitore di allumina si prolunga di 20 mm oltre la barretta di zaffiro possiamo determinare dimensione e caratteristica del campo visivo:

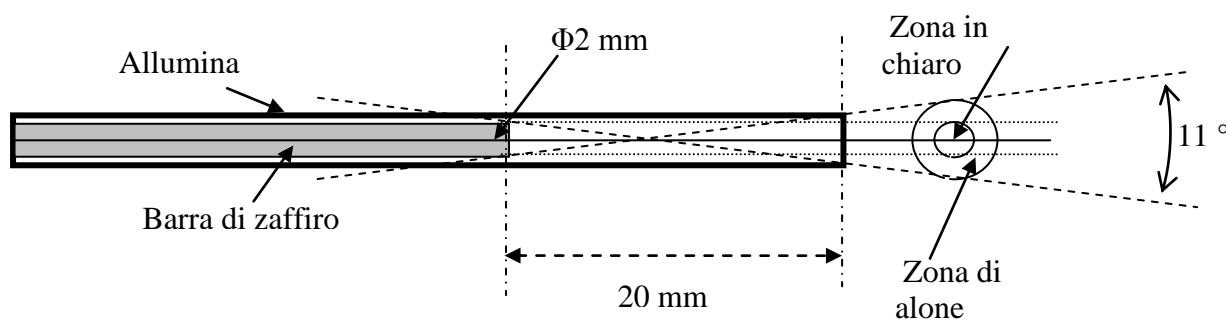


Figura 4 Struttura della testa della sonda ODC e del relativo campo visivo

La zona in chiaro è la zona su cui incidono i raggi che hanno percorsi paralleli all'asse ottico: non subendo riflessioni conservano la coerenza spaziale, immagine chiara.

La zona di alone è la zona su cui incidono solo i raggi non paralleli all'asse ottico e che non mantengono le coerenze spaziali: immagine non chiara.

Per migliorare la collimazione sull'asse ottico, la zona di alone può essere ridotta o eliminata inserendo un gap tra la fibra ottica e la barra di zaffiro (meglio, se viene inserito anche un

diaframma). Questo gap evita che la maggior parte dei raggi non paralleli all'asse ottico entrino nella fibra ottica in quarzo, e siano poi acquisiti.

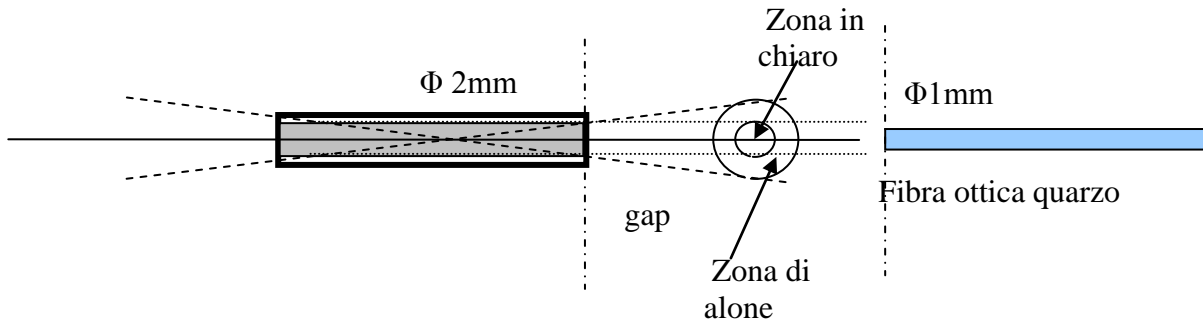


Figura 5 Collimazione sonda tramite eliminazione della zona di alone

Il segnale fornito dalle sonde è l'integrazione dell'emissione radiativa percepita nel volume osservato, pertanto:

- la risoluzione spaziale rimane determinata dalla dimensione del cono di osservazione definito dall'apertura della sonda (11°).
- La risoluzione temporale rimane determinata dai tempi di integrazione del processamento segnale. Il trasduttore è stato impostato a una frequenza di taglio di 150kHz, la sua modalità di osservazione è continua. Il segnale da questo prodotto viene campionato dalla scheda con un tempo di integrazione di circa 20 ns, la frequenza di campionamento è impostata sempre maggiore a quella della frequenza di taglio, normalmente ≥ 1 Msample/sec, in modo da avere la massima estensione dinamica. L'integrazione del segnale, essenzialmente, è definita dal metodo di pre-processamento software del segnale.

4. Interpretazione del segnale in uscita dalle sonde.

Per interpretare il segnale fornito dalle sonde disposte in posizione radiale rispetto al flusso è conveniente ricorrere ad un modello di prima approssimazione corrispondente alla risposta fornita da una sonda che, con un campo visivo rettangolare, osserva il passaggio di una struttura che ha sia la velocità che l'intensità radiante/schermante costante:

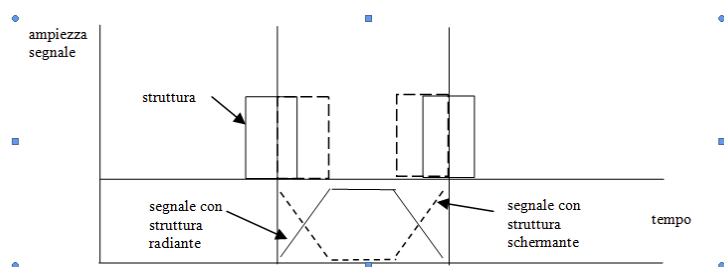


Figura 6 Schematizzazione del segnale prodotto da una sonda radiale

La sonda in posizione radiale rispetto al flusso degli eventi conserva la risoluzione spaziale e temporale, per il tempo limitato all'attraversamento del campo visivo.

Nel caso, invece, di una sonda in posizione assiale (fondo reattore) la risoluzione spaziale viene persa, ma quella temporale, non essendo limitata dal campo visivo, si estende al tempo di permanenza dell'evento nel reattore. In entrambe i casi non va trascurato il possibile effetto

schermante che gli eventi front-end hanno su quelli in "ombra" lungo lo spazio di integrazione. Questo significa che per la sonda assiale, dal punto di vista di sensibilità visiva, questo effetto è più punitivo rispetto a quella radiale. Comunque si tenga conto che:

- gli eventi che si osservano sono, dal punto di vista fluidodinamico, diffusivi (si compenetrano) e pertanto non formano schermature compatte.
- la fenomenologia radiativa non è direzionale, si distribuisce in tutto il volume, e quindi la "schermatura reciproca" non è totale
- attualmente, l'interesse è puntato sulla dinamica e non sull'intensità di radiativa. Pertanto l'informazione è condizionata essenzialmente dalla "risoluzione di conversione" della linea di acquisizione.

Nella dinamica radiativa osservata sono contenute essenzialmente due informazioni dovute alla:

- fluttuazione dell'intensità del processo combustivo durante il passaggio,
- fluidodinamica, ovvero dalla struttura vorticoso dei fluidi in fase combustiva. Le particelle (come "inseminanti") radianti ne seguono la dinamica e ne permettono la rilevazione.

Infine, per semplificare, si può dire che la sonda ottica opera come un "miscelatore" di tanti segnali variabili nel tempo e che dal risultante segnale binarizzato, possono essere "demiscelati" (estratti) con opportuni algoritmi analitici (FFT, WDT, ...)

5. Procedure per l'effettuazione delle misure

Per rendere il più *evidente* possibile il processo combustivo il flusso di ingresso del combustibile (carbone, ...) è stato modulato in modo da produrre transitori del tipo:

- flusso nullo, continuo, nullo. Nell'esempio 1, il carbone viene immesso nel reattore con gas combustibili a concentrazione di ossigeno quasi nulla, infatti non c'è combustione ed il polverino di carbone ostacola la radianza di fondo delle pareti; nell'esempio 2 la concentrazione di ossigeno è al 6 % ed il contributo della combustione è evidente poiché le sonde 1 e 3 rilevano un segnale superiore al fondo

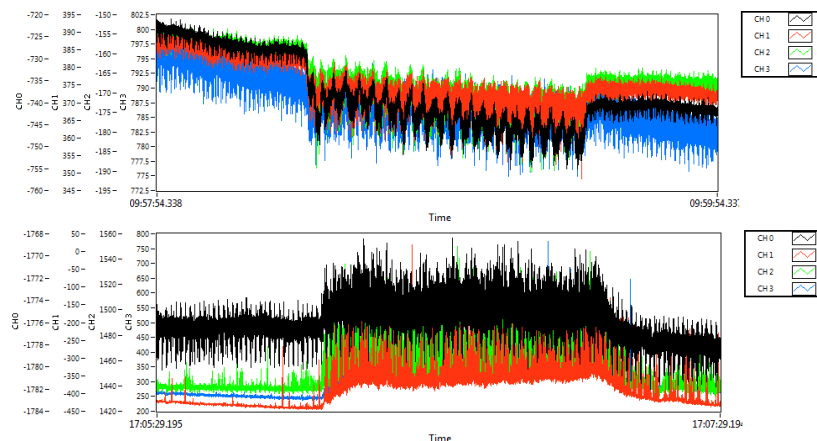


Figura 7 transitorio tipo con portata polverino nulla-continua-nulla

- flusso nullo, pulsato, nullo. Nell'esempio 1, il carbone viene immesso nel reattore con gas combustibili a concentrazione di ossigeno quasi nulla: non c'è combustione, infatti il polverino di carbone ostacola la radianza di fondo delle pareti; nell'esempio 2 la concentrazione di ossigeno è al 6 %: c'è combustione

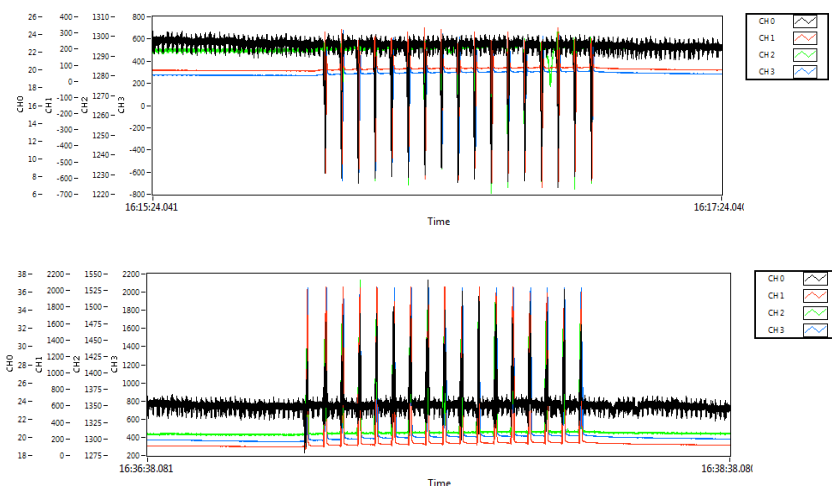


Figura 8 Transitorio tipo con portata polverino nulla-pulsata-nulla

Il transitorio di portata nulla-continua/pulsata-nulla permette di avere, come è possibile vedere nelle figure su riportate, una certezza totale nell'individuazione delle fenomenologie e questo incide in modo notevole sulla consistenza della misura e della successiva analisi.

6. Impostazione del sistema di acquisizione alla massima risoluzione possibile

Per avere la massima risoluzione sulla rilevazione della componente dinamica del segnale, è stato implementato un blocco hw/sw sul sistema ODC che permette di compensare direttamente sul trasduttore ottico-elettrico la componente continua. In questo modo si ottengono due vantaggi:

- evitare che il trasduttore (a guadagno fisso) saturi
- dedicare tutta la dinamica possibile del convertitore ADC (12 bit) al range di interesse.

La procedura in oggetto va effettuata prima di iniziare le misure.

Per una limitazione della disponibilità hardware, attualmente i quattro canali sono compensati a coppie: CH0-CH2 e CH1-CH3. La generazione del segnale di compensazione da inviare ai trasduttori è effettuato tramite i due canali di uscita analogica disponibili sulla stessa scheda di acquisizione. Ovviamente, questa limitazione è pesata in quanto non si poteva operare in condizioni in cui tutti canali erano fortemente squilibrati tra di loro.

La scheda di acquisizione permette frequenze di campionamenti contemporanei fino a 10 MHz sui quattro canali di ingresso, questo permette di effettuare, poi, stime di sfasamento temporale esenti da ritardi congeniti.

7. Metodologie per la stima della velocità media di trasporto, dell'ignition delay dei devolatilizzati e della durata di accensione.

Procedura di misura:

- Individuazione e validazione di "strutture consistenti" sui segnali prodotti dalle sonde
- Misura dello sfasamento temporale dei picchi, velocità media assiale dei gas di trasporto
- Stima dell'ignition delay del DEVO e della durata della loro combustione.

Le *strutture consistenti* sono strutture generate da quelle fenomenologie di *tipo passivo* che, trasportate dai gas combust, presentano un'inerzia tale da conservare le caratteristiche

fluidodinamiche e chimiche nel tempo e nello spazio, in modo da poter essere rilevate ed identificate in punti diversi del reattore.

Vediamo cosa implica l'immissione di un combustibile solido come il carbone. La prima considerazione viene fatta in riferimento ai tempi diversi di reazione delle fasi che lo costituiscono.

La fase liquida è la prima a fornire un contributo radiativo: l'energia radiante emessa sia dalle pareti del reattore che dai gas combust (1000 °C) la fanno evaporare velocemente, il basso calore specifico dei gas fanno raggiungere velocemente la temperatura di innesco e la presenza di ossigeno ed il processo diffusivo ne provocano una reazione combustiva consistente; pertanto questa fase fornisce un contributo immediato ed evidente all'energia radiante percepita dalle sonde (rispetto al fondo dovuto alle pareti).

La fase solida impiega più tempo ad iniziare la combustione e a fornire, quindi, un contributo radiativo: la temperatura di innesco, causa il maggior valore del calore specifico, viene raggiunta più lentamente, inoltre la reazione combustiva avviene solo sulla superficie di scambio e pertanto è meno intensa, così il primo contributo che il polverino di carbone produce essenzialmente è negativo poiché scherma l'energia radiante di fondo.

La seconda considerazione si riferisce agli aggregati di particelle (evidenti nei flussi pulsati) ed alle interazioni fluidodinamiche e chimiche che hanno luogo in essi: gli aggregati si presentano come nubi.

Questi aggregati possono essere considerati come strutture inerziali dal punto di vista fluidodinamico (mantengono la forma nel tempo) e i granuli che le costituiscono, sia in fase combustiva (che non come vedremo), le rendono rilevabili alle sonde posizionate lungo l'asse del reattore. Le informazioni prodotte dalle sonde permettono di effettuare una stima della velocità di trasporto media assiale.

8. Pre-processamento del segnale

Prima che i segnali siano sottoposti al processamento per l'estrazione delle informazioni è necessario che siano sottoposti ad una fase preliminare di epurazione dai disturbi.

I disturbi principali sono originati dalla presenza di grossi carichi elettrici e dalla scarsa efficienza della massa. Pertanto i disturbi più caratteristici si trovano a 50 e 60 Hz e loro armoniche superiori. La loro caratteristica è quella di non essere minimamente condizionati dal processo e di comparire, temporalmente coerenti, su tutte le sonde. La procedura di filtraggio adottata è di tipo attivo ed è sviluppata a livello software, consiste di un algoritmo che elimina dallo spettro in frequenza le armoniche indesiderate (50 e 60 Hz e loro multipli). Il procedimento garantisce che non sia introdotta alcuna deformazione consistente nel segnale da analizzare.

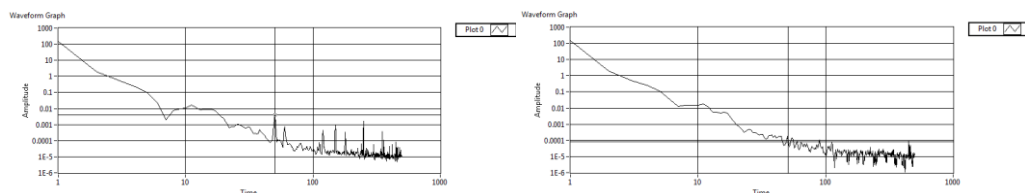


Figura 9 Nella figura a sinistra appare lo spettro del segnale non filtrato, a destra dopo il filtraggio

Esistono comunque altri segnali di disturbo che appaiono contemporaneamente e sincroni in tutte le sonde, la loro frequenza è atipica, probabilmente sono conseguenze di vibrazioni meccaniche presenti nella struttura del reattore che si ripercuotono sulle sonde. Questo disturbo non avviene mai in coincidenza dei transitori di interesse, per cui vengono trascurati.

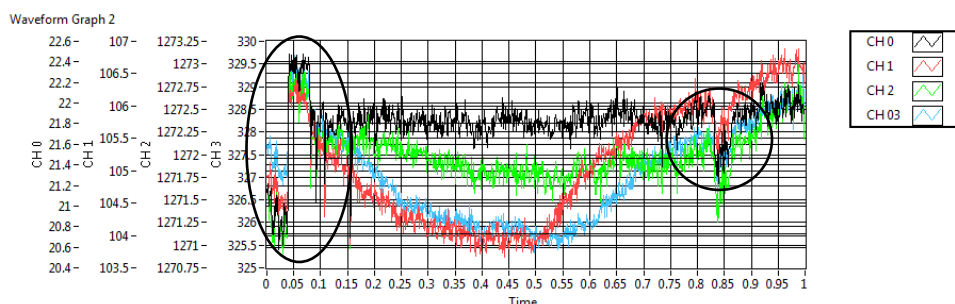


Figura 10 Le zone cerchiare contengono i disturbi

La probabilità che sia da accreditare alle vibrazioni è alta in quanto durante le misure a portata continua questo non appare. Nella fig.11 si nota come questo disturbo sia presente solo a portata nulla.

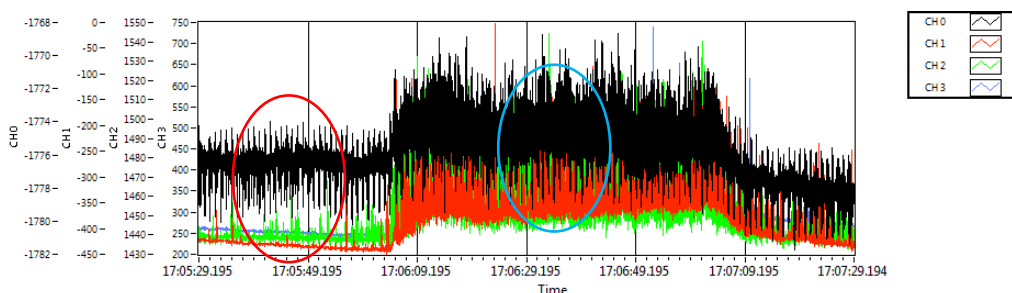


Figura 11 Acquisizione durante una portata di polverino nullaa-continua-nulla

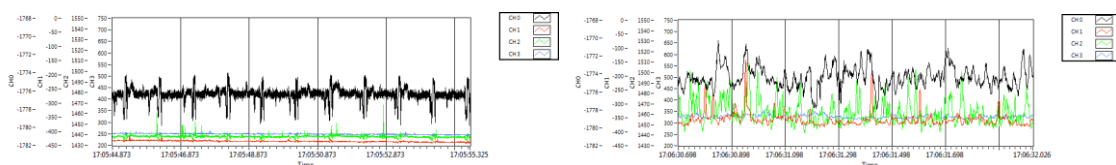


Figura 12 Le due figure sono gli zooming della zona cerchiata rosso e celeste rispettivamente

9. Stima della velocità media assiale dei gas di trasporto

Sono state seguite due metodologie:

- Stima diretta dello sfasamento temporale, Dt , tra i picchi rivelati nei rispettivi canali. Consiste nella individuazione dei picchi tramite una analisi funzionale (ricerca dei max/min). Il metodo è immune dal rumore distribuito.
- Stima dello sfasamento degli impulsi tramite l'indice di cross correlazione. Questo metodo è basato sulla stima della max similitudine e pertanto risente delle possibili modifiche degli andamenti. Il sistema è ottimizzato restringendo l'intervallo di analisi a quello contenente l'evento di interesse.
- Le condizioni per una misura consistente della velocità sono quelle ottenute con una condizione di % di O2 nulla, questo garantisce che la forma degli impulsi acquisiti sia mantenuta nel tempo e nello spazio, come si può vedere dalla fig

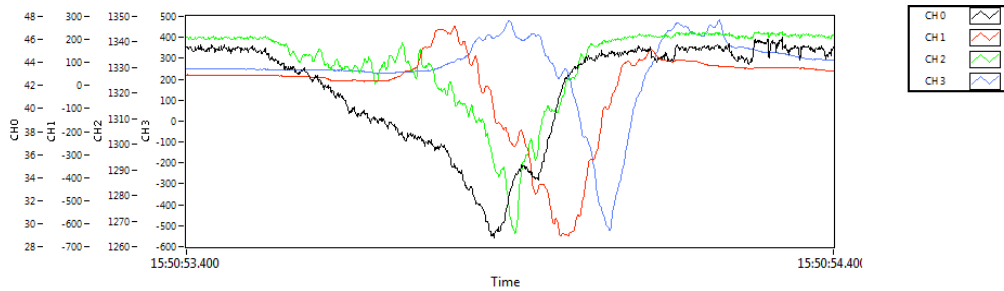


Figura 13 Sono riportate le acquisizioni delle sonde disposte secondo la successione: CH0, CH2, CH1, CH3

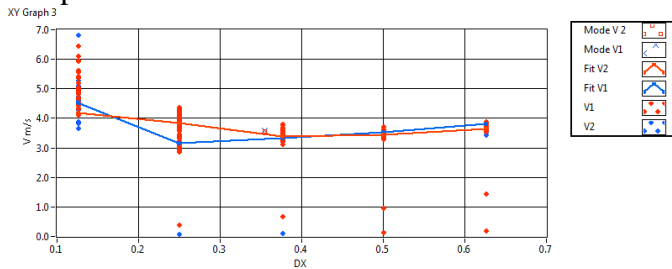
Per interpretare i risultati va detto che le coordinate dei grafici sono: in ordinata la velocità, in ascissa la distanza relativa tra le sonde. V1 e V2 sono i risultati ottenuti con i due metodi. "Mode V1" e "Mode V2" è la moda della distribuzione dei valori di V1 e V2 per ogni singola distanza. "Fit V1" e "fitV2" è il fitting lineare effettuato tra tutti i valori calcolati. Nei risultati riportati di seguito "V1" è ottenuto con la misura diretta della distanza tra i picchi, "V2" con il metodo della cross-correlazione. Ogni file di acquisizione permette una misura multipla.

TEST 1

Portata aria combustione 22.09 nmc/h

Portata gas 2.19 nmc/h

Temp Reattore 1100 °C



DXmean m 0.354124

Mode V1 m/s 3.58482

Mode V2 m/s 3.54768

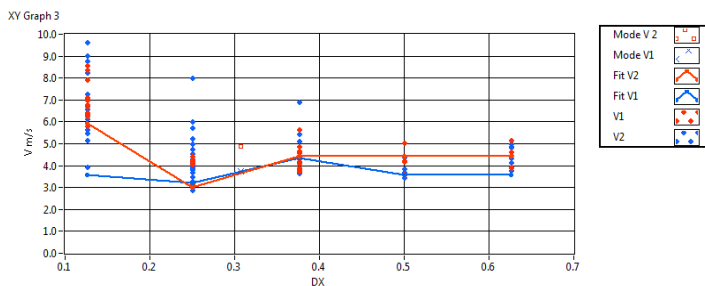
TEST 2

14-04-2011-11-26-15.098.tdms

Portata aria combustione 24.18 nmch

Portata gas 2.19 nmc/h

Temperatura reattore 900 °C



DXmean m 0.307394

Mode V1 m/s 3.73641

Mode V2 m/s 4.87425

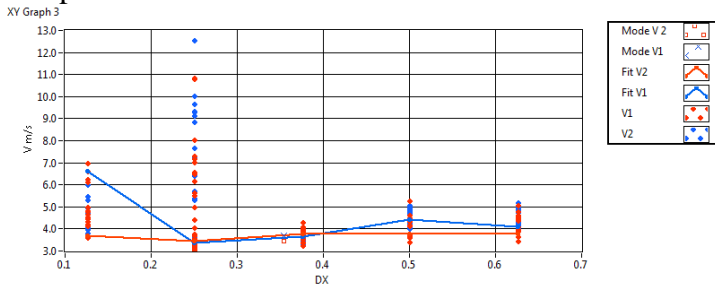
TEST 3

14-04-2011-14-42-30.034.tdms

Portata aria combustione 24.42 nmch

Portata gas 2.19 nmc/h

Temperatura reattore 900 °C



DXmean m 0.354667

Mode V1 m/s 3.69034

Mode V2 m/s 3.46222

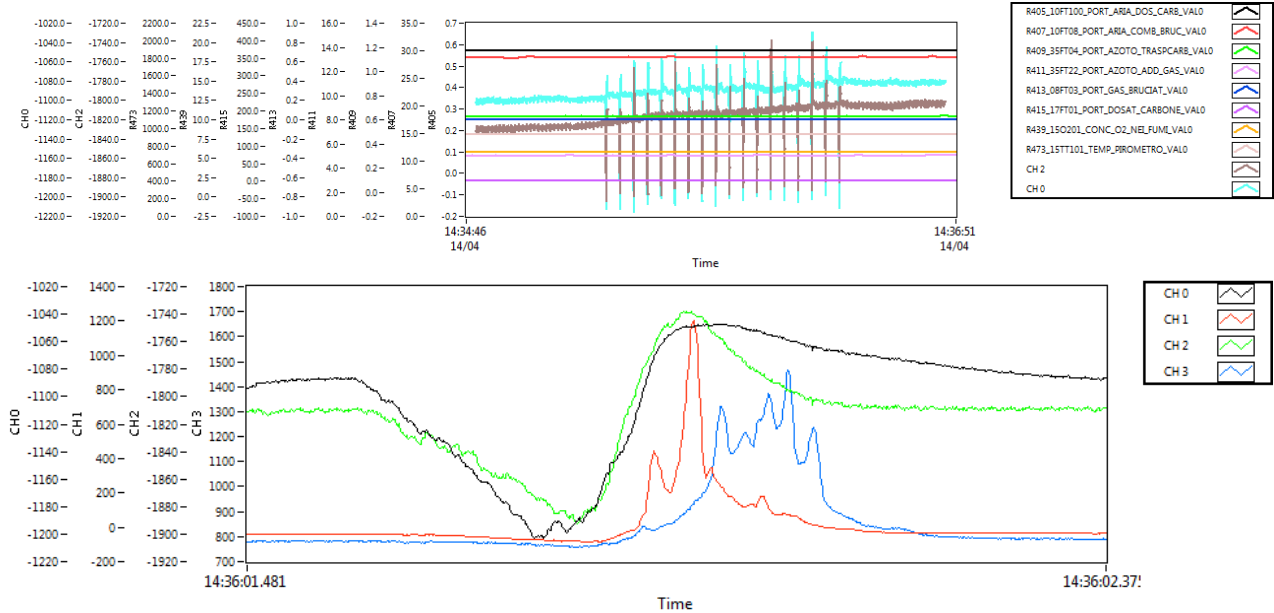
I risultati ottenuti sono coerenti e consistenti, i due metodi si possono considerare validati. Nota di interesse: la misura della velocità è in grado di evidenziare che, in prossimità del bocchello di uscita, il polverino ha una velocità maggiore di quella dei gas combusti di trasporto.

10. Stima dell'ignition delay dei devolatilizzati e della durata della loro combustione

La stima del parametro di ignition delay dei componenti che volatilizzano (gas espulsi e liquidi che vaporizzano) viene effettuata stimando l'intervallo di tempo che passa tra la rilevazione del passaggio carbone della prima sonda (CH0) e la rilevazione dell'accensione delle sostanze devolatilizzate da parte delle altre sonde. Il valore di questo parametro è funzione essenzialmente della concentrazione di O₂ che incide sulla velocità reattiva della miscela e della radianza termica al contorno. Comunque, come già detto, a causa del basso calore specifico della miscela (o meglio della bassa capacità termica) la velocità con cui la miscela raggiunge il valore di innesco è altissima, pertanto è il valore della concentrazione di O₂ che inciderà notevolmente sui tempi di reazione (o meglio sul ritardo di innesco). A questo scopo sono state fatte una serie di misure in cui l'unica variabile modificata è stata la % di O₂

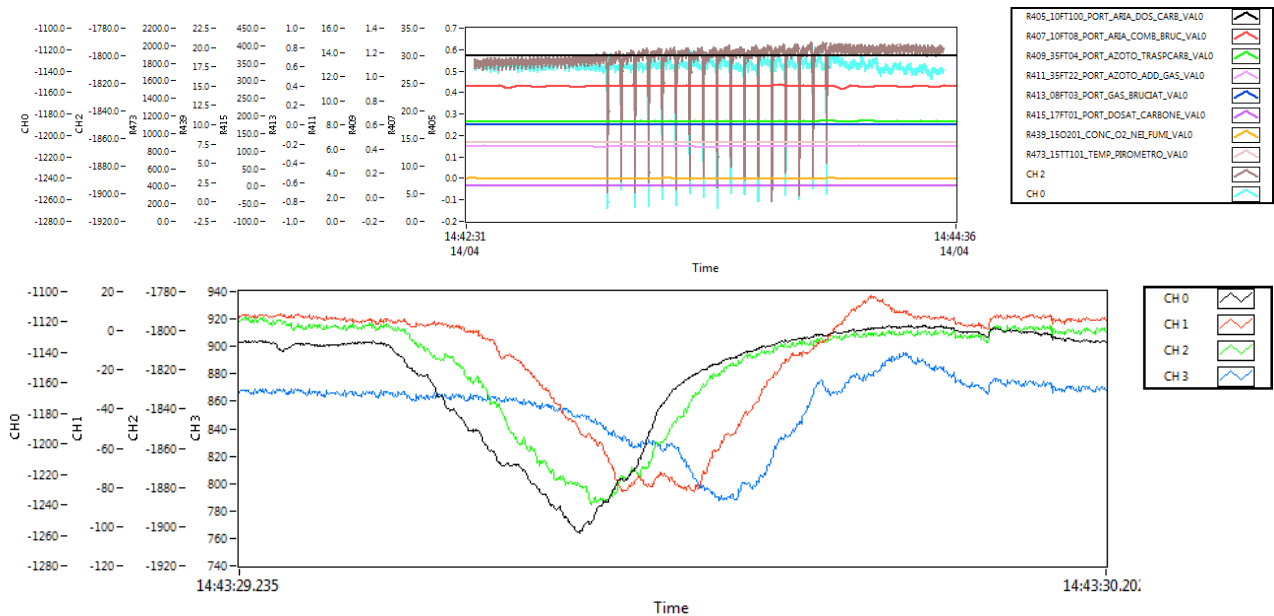
Misura 17: 14-04-2011-14-34-45.382.tdms

Carbone S.A. TQ > 125 micron
 ALIM. nulla- pulsata - nulla 110 g/h
 Trasporto azoto
 O2 6.0 % NEI FUMI
 TEMP 900°



Misura 18: 14-04-2011-14-42-30.034.tdms

Carbone S.A. TQ > 125 micron
 ALIM. nulla- pulsata - nulla 110 g/h
 Trasporto azoto
 O2 3.0 % NEI FUMI
 TEMP 900°



Misura 19: 14-04-2011-15-17-00.481.tdms

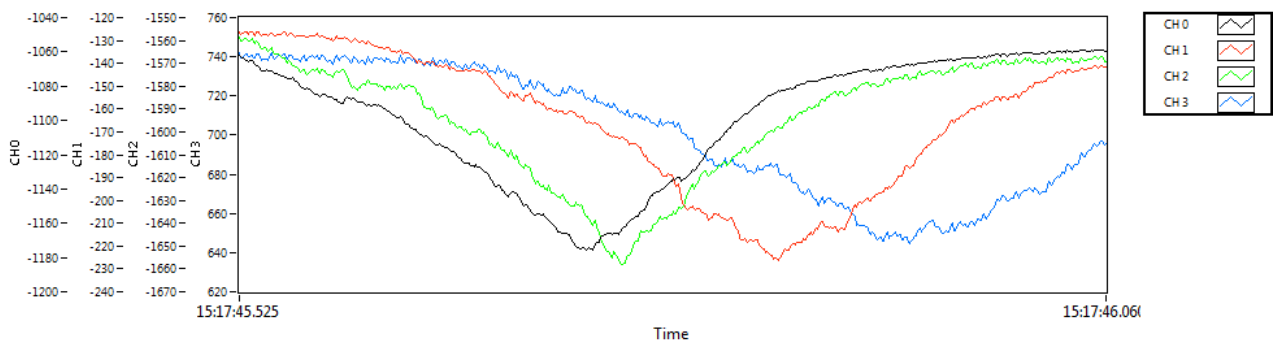
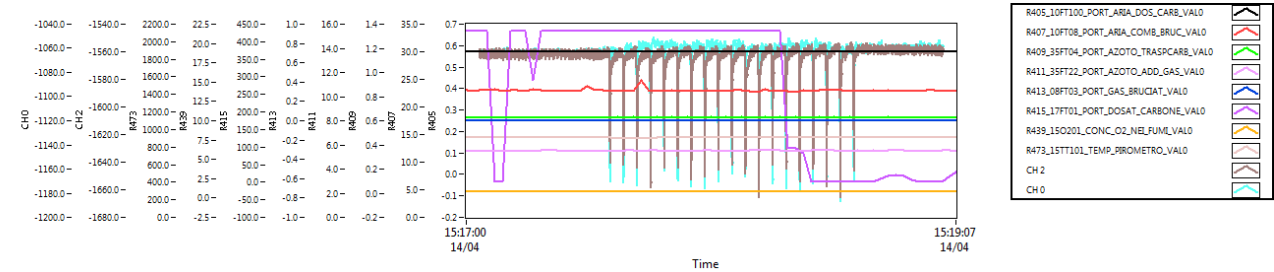
Carbone S.A. TQ > 125 micron

ALIM. nulla-pulsata-nulla 110 g/h

Trasporto azoto

O2 0.5 % NEI FUMI

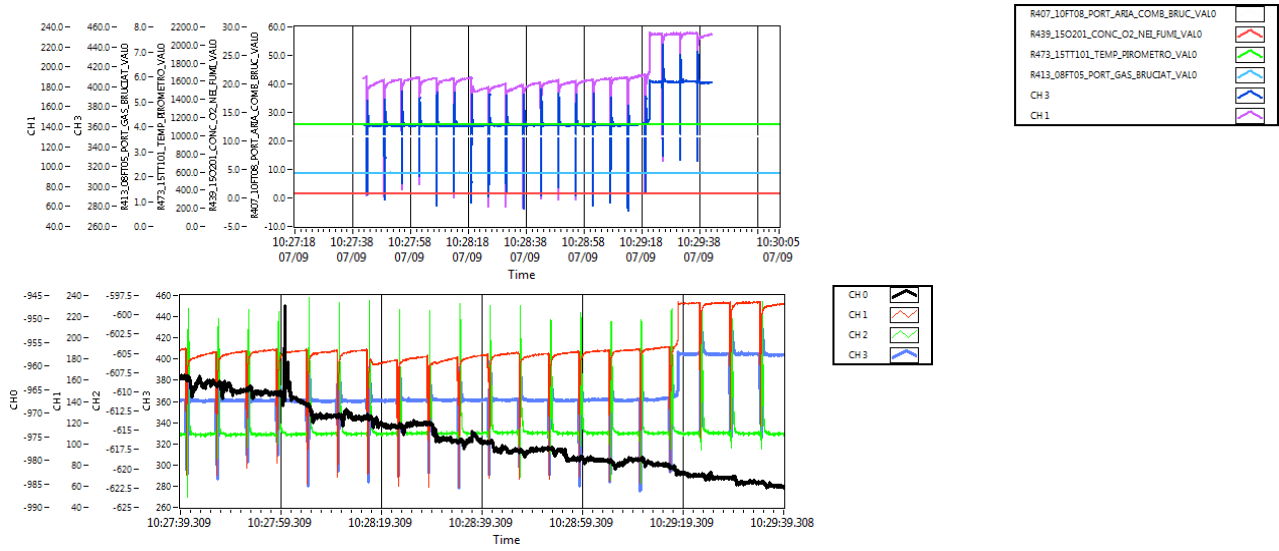
TEMP 900°



Nuova campagna di misure del 7/9/2011, si modifica il posizionamento delle sonde ODC, la sonda sul canale CH0 è tenuta in posizione assiale sul fondo del reattore.

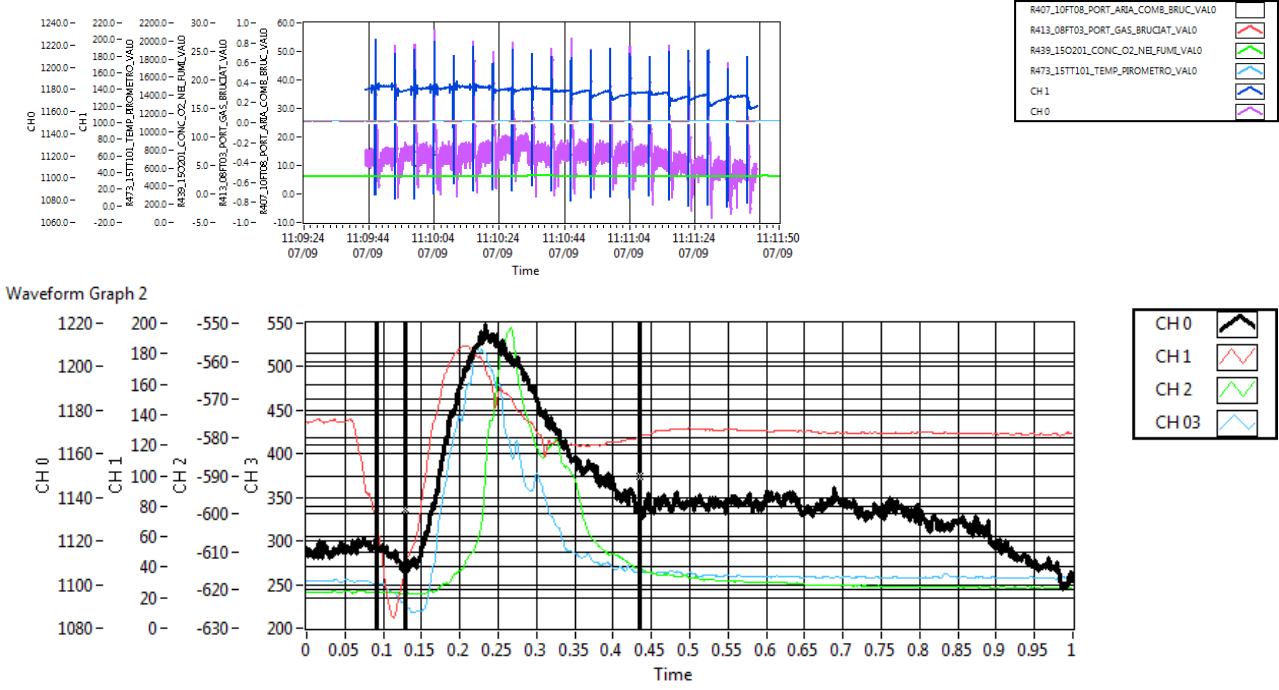
Canale ODC	Portina reattore
CH1	P6
CH3	P8
CH2	P10
CH0	Fondo reattore, vista assiale-frontale

Misura 2: 07-09-2011-10-27-38.309.tdms
 CARBONE TQ SUP 125
 ALIMENTAZIONE PULSATA 1 Ca+3Sc sec
 O2 0.5% NEI FUMI
 TEMP 1100°C



informazione scadente, valori non stimabili.

Misura 5: 07-09-2011-11-09-39.940.tdms
 CARBONE TQ SUP 125
 ALIMENTAZIONE PULSATA 1 Ca+3Sc sec
 O2 3% NEI FUMI
 TEMP 1100°C



cursore C 0.434701
 cursore B 0.104478
 cursore A 0.048507
 l'ignition delay B-A = 0.056 sec
 ignition DEVO C-B = 0.330 sec

Misura 7: 07-09-2011-11-18-59.817.tdms

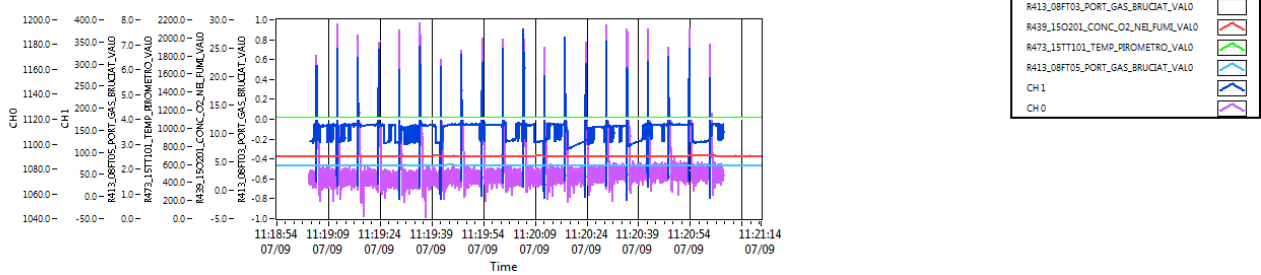
CARBONE TQ SUP 125

ALIMENTAZIONE PULSATA 1 Ca+3Sc sec

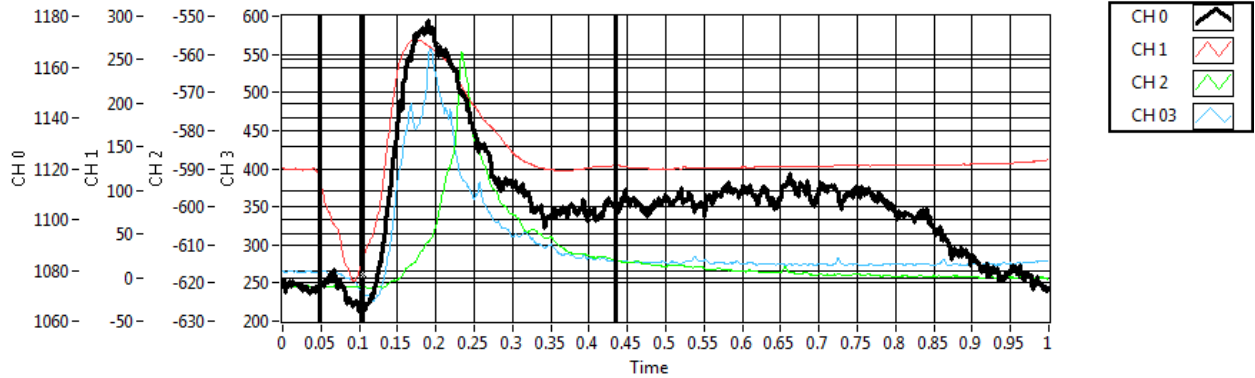
tolta aria dal carico carbone

O2 6% NEI FUMI

TEMP 1100°C



Waveform Graph 2



cursore C 0.434701

cursore B 0.128731

cursore A 0.091418

l'ignition delay B-A = 0.037 sec

durata C-B = 0.306 sec

Misura 10: 07-09-2011-11-29-07.271.tdms

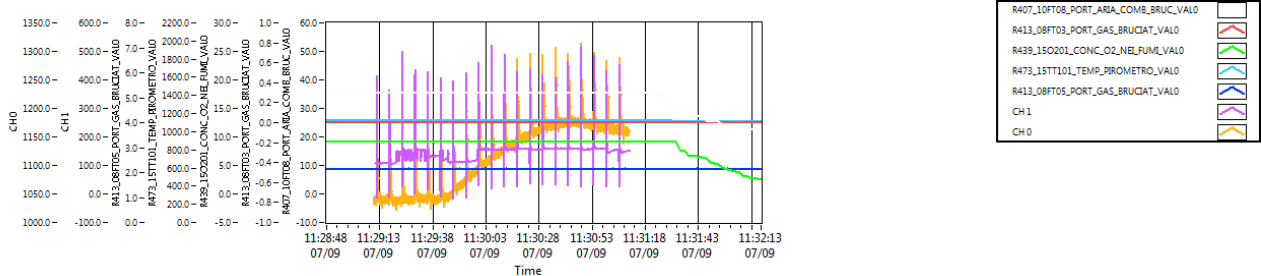
CARBONE TQ SUP 125

ALIMENTAZIONE PULSATA 1 Ca+3Sc sec

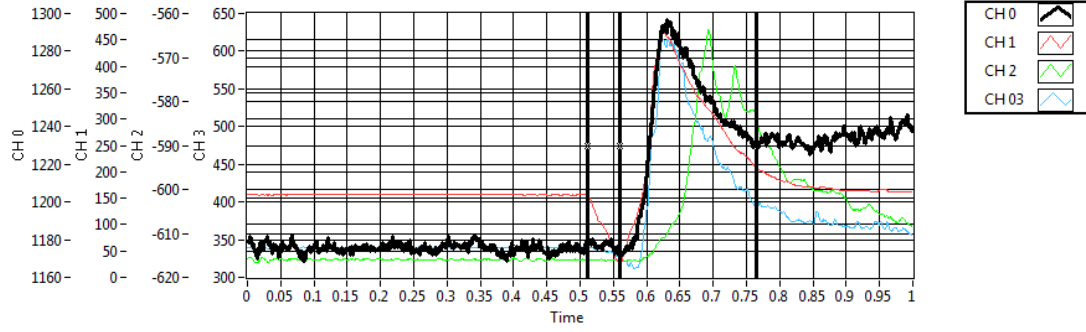
tolta aria dal carico carbone

O2 9% NEI FUMI

TEMP 1100°C



Waveform Graph 2



cursore C 0.76306

cursore B 0.51119

cursore A 0.55970

l'ignition delay B-A = 0.052 sec

durata C-B = 0.252 sec

Conclusioni

Il sistema ODC ha dimostrato di essere capace di effettuare misure atte alla caratterizzazione del polverino di carbone. Ha permesso di rivelare le dinamiche dei processi combustivi, di discriminarli e di stimarne direttamente i tempi di ritardo di innesco e di durata. Il sistema permette inoltre di effettuare, on-line, la stima della velocità assiale dei gas di trasporto, permettendo così di disporre di un metodo ridondante per stabilire il tempo di permanenza del polverino nel reattore. Il sistema è semplice, poco intrusivo, veloce da utilizzare e molto efficace.