



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo ed ottimizzazione di metodi e strumentazione per
la diagnostica di sistemi a carbone operanti
in ossi combustione

G. Coraggio, L. Biasci, C. Galletti, M. Faleni, S. Tarquini, L. Tognotti



SVILUPPO ED OTTIMIZZAZIONE DI METODI E STRUMENTAZIONE PER LA DIAGNOSTICA DI
SISTEMI A CARBONE OPERANTI IN OSSO-COMBUSTIONE

G. Coraggio¹, L. Biasci¹, C. Galletti², M. Faleni¹, S. Tarquini², L. Tognotti^{1,2}

1 International Flame Research Foundation, Livorno), 2 (Università di Pisa)

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

Progetto 2.2 "Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂"

Accordo di Collaborazione tra ENEA e
Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei
Materiali

"Sviluppo ed ottimizzazione di metodi e strumentazione per la diagnostica di sistemi a carbone operanti in ossi-combustione"

Premessa

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 2 agosto 2010 un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

La presente relazione si riferisce alle attività svolte fino a settembre 2011 relativamente al Piano Annuale di Realizzazione 2008-2009, per quanto attiene all'Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", tematica di ricerca "Cattura e sequestro della CO₂"; nello specifico, si riferisce all'obiettivo *"B4-Messa a punto delle migliori tecnologie per l'ottimizzazione del processo di ossi-combustione di polverino di carbone"* del progetto "Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro dello CO₂".

In questo ambito, l'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, che si è avvalsa delle infrastrutture IFRF/ENEL per i test semi-industriali, è stata rivolta allo sviluppo ed ottimizzazione di diagnostica specifica, in connessione con diagnostica non invasiva sviluppata da ENEA, da applicare su impianti a ossi-combustione. Lo studio ha previsto:

- l'utilizzo di una apparecchiatura pilota (IPFR) su cui sono state messe a punto metodologie diagnostiche per la valutazione dell'"*ignition delay*" e più in generale delle caratteristiche di combustione di stream di particelle di carbone in diverse condizioni di atmosfera controllata CO₂/O₂/N₂; **(Sezione 1)**
- l'ottimizzazione, su un impianto di taglia significativa (3 MWt) operante in ossi-combustione con riciclo di gas combusti -unico nel suo genere-, della strumentazione sviluppata nella precedente collaborazione, in unione con strumentazione non invasiva sviluppata da ENEA, allo scopo di sviluppare metodologie diagnostiche per il monitoraggio delle prestazioni di sistemi innovativi a carbone. **(Sezione 2)**

Sommario

1. Test su impianto pilota a flusso trascinato (IPFR) per lo sviluppo di metodologie diagnostiche sulla ossi-combustione di polverino di carbone.

Il sistema Isothermal Plug Flow Reactor (IPFR) è stato utilizzato in due campagne sperimentali (Aprile e Agosto 2011). Le metodologie sperimentali sono state ottimizzate, non solo per fornire informazioni sulle dinamiche di interazione tra le particelle di carbone e il campo di moto del getto in cui sono inserite, ma anche e soprattutto per investigare le caratteristiche peculiari della ossi-combustione di carbone.

Sono stati quindi effettuati test in differenti condizioni operative (tempi di residenza, temperature, composizione dell'atmosfera in cui le particelle sono inserite, dimensioni delle particelle) utilizzando un certo numero di sensori a fibra ottica in parallelo lungo la fornace, per valutare:

- i) Velocità delle particelle e loro distribuzione;
- ii) *Ignition delay*, sulla base delle emissioni luminose generate dalla accensione dei volatili;
- iii) Tempi caratteristici di ossidazione del char, sulla base delle emissioni dalle particelle che si convertono;
- iv) Metodi di valutazione delle cinetiche in ossi-combustione, in funzione di diversi parametri (temperatura, granulometria, concentrazione di O₂/CO₂).

Le campagne effettuate hanno fornito risultati assai interessanti ed innovativi, anche dal punto di vista delle ricadute nella definizione di metodi di valutazione di parametri chimico-fisici e tecnologici per il processo di ossi-combustione di carbone

2. Test ed analisi su combustore semi-industriale per la verifica di tecniche diagnostiche ottiche avanzate per il controllo della ossi-combustione di carbone

La fornace FOSPER, utilizzata nel corso della precedente collaborazione per mettere a punto la metodologia di acquisizione dei segnali luminosi generati da fiamme semi-industriali operanti in condizioni di ossi-combustione, è stata utilizzata per uno studio sistematico, anche dal punto di vista semi-quantitativo, delle caratteristiche del campo emissivo legato al campo di moto/temperatura in fiamme di taglia elevata (3 MW) di diversa natura (oxy-gas, oxy-coal). La campagna, di durata complessiva di una settimana, si è svolta all'inizio di settembre 2011 ed ha coinvolto ricercatori dell'Università di Pisa, dell'IFRF e dell'ENEL ricerca, nonché personale ENEA.

In particolare, gli obiettivi della sperimentazione sono stati:

- Verifica delle performance del sistema non intrusivo a sensore a fibra ottica per il monitoraggio del funzionamento di un bruciatore a carbone, esercito anche a gas, di tipo staged (3 MW) al variare della posizione nella fiamma e nei gas combusti, in diverse condizioni di rapporto di ricircolo dei fumi.
- Verifica della capacità del sistema di monitorare le transizioni tra diversi regimi di combustione (convenzionale ad aria, ossicombustione) e individuazione delle caratteristiche specifiche dei segnali generati dal sistema nelle diverse condizioni.
- 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)

La sperimentazione ha prodotto un report sui test sull'impianto operante a 3 MW in condizioni di ossi-combustione, a gas e carbone; le misure effettuate sono state, oltre all'ODC: pirometria in fiamma, radiometria totale e ellissoidale, analisi concentrazione gas e particolato in varie correnti, flussi termici in uscita dai sistemi di raffreddamento, parametri di processo.

L'analisi dei dati, ancora in corso al momento della stesura della presente relazione, ha permesso la definizione di metodologie per il monitoraggio di regimi di combustione e le loro transizioni, risultato assolutamente originale sia per la taglia della sperimentazione che per l'applicazione in ossi-combustione; l'analisi sta fornendo indicazioni assai interessanti anche dal punto di vista più fondamentale della individuazione delle caratteristiche fluttuanti di fiamme e per la validazione di modelli predittivi.

Sezione 1

Test su impianto pilota a flusso trascinato (IPFR) per lo sviluppo di metodologie diagnostiche sulla ossi-combustione di polverino di carbone.

INDICE

1. Descrizione delle prove ed elaborazione dei segnali	
1.1. Descrizione delle prove	
1.1.1. Descrizione reattore IPFR	3
1.1.2. Descrizione sonde ODC	5
1.1.3. Combustione dei solidi	6
1.1.4. Tipi di prove	7
1.1.5. Combustibili utilizzati	11
1.1.6. Variabili di processo	11
1.2. Elaborazione del segnale	
1.2.1. Caratteristiche del segnale originale	14
1.2.2. Trattamento del segnale per le prove ad alimentazione continua	14
1.2.3. Trattamento del segnale per le prove ad alimentazione pulsata	15
2. Prove aprile 2011	
2.1. Carbone tal quale	
2.1.1. Prove continue	17
2.1.2. Prove in transitorio ad alimentazione continua	37
2.1.3. Prove pulsate	48
2.1.4. Prove in transitorio ad alimentazione pulsata	62
2.2. Char di carbone	
2.2.1. Prove continue	74
2.2.2. Prove in transitorio ad alimentazione continua	78
2.2.3. Prove pulsate	80
2.2.4. Prove in transitorio ad alimentazione pulsata	82
2.3. Biomassa	
2.3.1. Prove continue	84
2.3.2. Prove in transitorio ad alimentazione continua	87
2.3.3. Prove pulsate	93
2.3.4. Prove in transitorio ad alimentazione pulsata	96
3. Discussione dei risultati prove aprile 2011	
3.1. Carbone tal quale	
3.1.1. Prove continue e in transitorio ad alimentazione continua	
3.1.1.1. Effetto della temperatura	100

3.1.1.2.	Effetto della concentrazione di ossigeno	101
3.1.1.3.	Effetto della granulometria del combustibile	104
3.1.1.4.	Effetto dell'oxycombustione	105
3.1.1.5.	Effetto del gas di trasporto	107
3.1.2.	Prove pulsate e in transitorio ad alimentazione pulsata	
3.1.2.1.	Effetto della temperatura	109
3.1.2.2.	Effetto della concentrazione di ossigeno	111
3.1.2.3.	Effetto della granulometria del combustibile	114
3.1.2.4.	Effetto dell'oxycombustione	118
3.1.2.5.	Effetto del gas di trasporto	120
3.2.	Char di carbone	
3.2.1.	Prove continue e in transitorio ad alimentazione continua	
3.2.1.1.	Effetto della granulometria del combustibile	123
3.2.1.2.	Effetto del gas di trasporto	124
3.2.2.	Prove pulsate e in transitorio ad alimentazione pulsata	
3.2.2.1.	Effetto della granulometria del combustibile	126
3.3.	Biomassa	
3.3.1.	Prove continue e in transitorio ad alimentazione continua	
3.3.1.1.	Effetto della concentrazione di ossigeno	129
3.3.2.	Prove pulsate e in transitorio ad alimentazione pulsata	
3.3.2.1.	Effetto della concentrazione di ossigeno	133
4.	Prove settembre 2011	136
4.1.	Carbone tal quale	138
4.2.	Char di carbone	173
4.3.	Biomassa	177
5.	Discussione dei risultati prove settembre 2011	183

1. Descrizione delle prove ed elaborazione dei segnali

1.1. Descrizione delle prove

1.1.1. Descrizione reattore IPFR

Il reattore IPFR, situato nell'area sperimentale della centrale Enel di Livorno e gestito dal personale IFRF, permette di riprodurre condizioni simili alle caldaie industriali a carbone. Infatti è possibile raggiungere una velocità di riscaldamento delle particelle di combustibile molto elevata dell'ordine di 10^3 - 10^4 °C/s. In questo modo è possibile effettuare una serie di prove per studiare cinetiche di devolatilizzazione, ossidazione del char e combustione in condizioni di oxycombustione. È possibile effettuare studi cinetici poiché l'IPFR dispone di una sonda di campionamento che può essere spostata a varie altezze così da ridurre il tempo di residenza nel reattore (variabile tra 5 e 1500 ms).

L'IPFR è un reattore isoterma a flusso a pistone dei gas costituito da un tubo di 15 cm di diametro e 4.5 metri di lunghezza. I gas sono fumi di combustione provenienti da un precombustore a gas naturale e aria in cui la temperatura dei fumi uscenti è controllata mediante l'iniezione di azoto. Per garantire l'isotermicità del reattore sono presenti varie resistenze elettriche esterne che riscaldano i fumi specie nel tratto finale del reattore. All'esterno del reattore ci sono 9 moduli di 0.5 metri di lunghezza che contengono le resistenze elettriche e le porte da cui inserire l'alimentazione del combustibile e gli strumenti di misura. L'IPFR può operare tra 700 e 1400°C così da garantire un'ampia gamma di condizioni di prova. Il campionamento viene effettuato con una sonda di dimensioni piccole (circa 4 cm di diametro) perciò in grado di raccogliere solamente una frazione delle particelle. Il campionamento segue un quench con azoto delle particelle così da campionare ad una temperatura di circa 200°C, inoltre la sonda è raffreddata esternamente con acqua, in tal modo si blocca la fase di reazione del combustibile. Le particelle campionate devono essere separate dai fumi, perciò si utilizzano due cicloni separatori e un filtro a manica, il particolato viene poi raccolto in piccoli flaconi per le analisi di laboratorio.

Il combustibile viene inserito mediante in un piccolo serbatoio dal quale viene prelevato da una tramoggia che assicura la portata necessaria per le prove. Il combustibile entra nel reattore per trasporto pneumatico con azoto o azoto e aria.

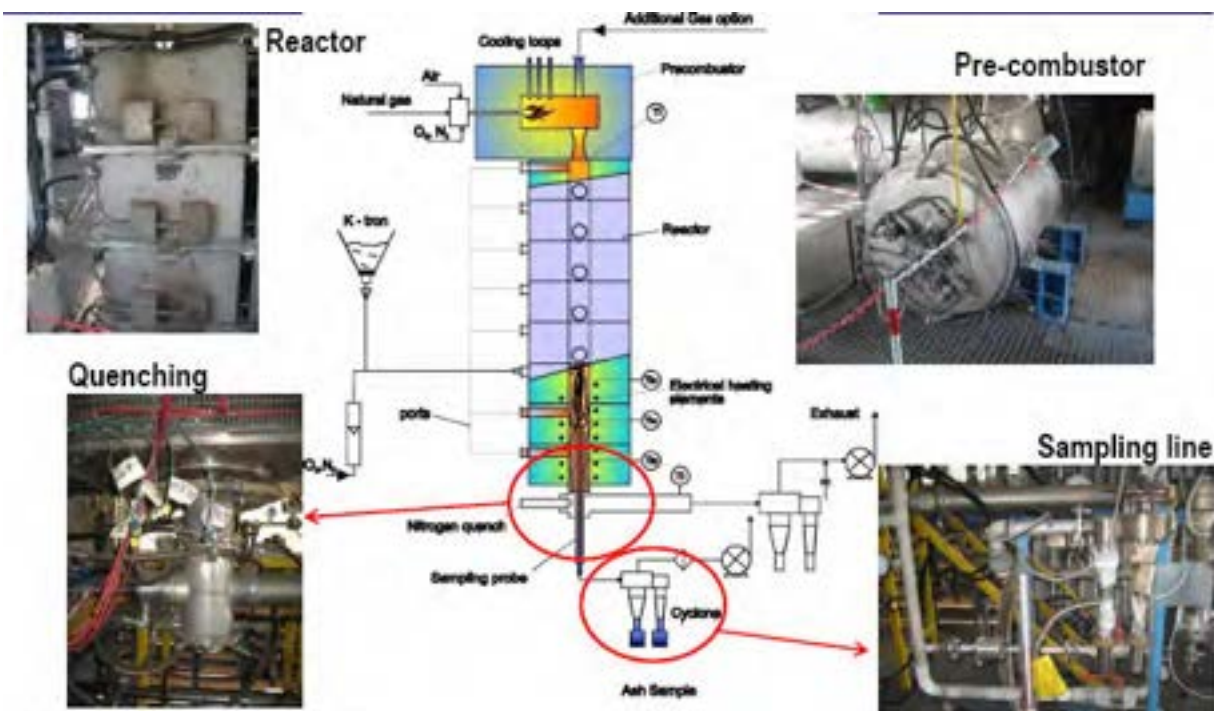


Figura 1: Schema reattore IPFR

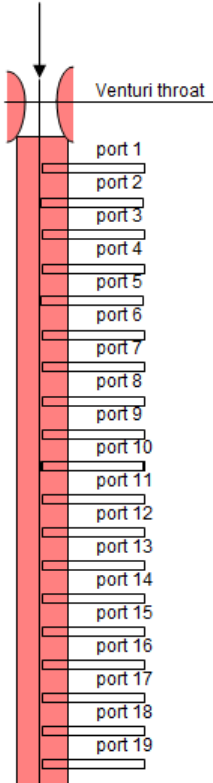
	Distances	Length	
	Port 1	247. mm	4383. mm TOP
	Port 2	126.5 mm	4136. mm mod1
	Port 3	126.5 mm	4009.5 mm mod1
	Port 4	247. mm	3883. mm mod1
	Port 5	126.5 mm	3636. mm mod2
	Port 6	126.5 mm	3509.5 mm mod2
	Port 7	250. mm	3383. mm mod2
	Port 8	250. mm	3133. mm mod3
	Port 9	250. mm	2883. mm mod3
	Port 10	250. mm	2633. mm mod4
	Port 11	250. mm	2383. mm mod4
	Port 12	250. mm	2133. mm mod5
	Port 13	250. mm	1883. mm mod5
	Port 14	250. mm	1633. mm mod6
	Port 15	250. mm	1383. mm mod6
	Port 16	250. mm	1133. mm mod7
	Port 17	250. mm	883. mm mod7
	Port 18	253. mm	633. mm mod8
	Port 19	380. mm	380. mm mod8
	Bottom	. mm	. mm

Figura 2: Schema porte reattore IPFR

1.1.2. Descrizione sonde ODC

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 fornirne, tramite elaborazione diretta, informazioni qualitative/quantitative sullo stato termo-fluidodinamico 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 termo fluidodinamico 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 traguardati (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 3: Sonda ODC per alta temperatura in zaffiro



Figura 4: Fibra ottica in quarzo per remotizzare il segnale delle sonde

Per ottimizzare la risoluzione dei convertitori - ADC a 12bit - sulla componente dinamica del segnale, il sistema realizzato permette compensarne, a coppie di due (CH0-CH2 e CH1 e CH3), la componente. La compensazione, volutamente non è automatica, i due valori di compensazione, una volta impostati sono costanti; questa procedura è stata decisa per non introdurre segnali indesiderati. I probe delle sonde ottiche hanno una struttura finale diversificata in modo da gestire il campo visivo che quindi può essere:

- la proiezione di un angolo solido (circa 10°)
- collimata sull'asse ottico del probe

La prima configurazione è meno risolutiva della seconda, ma quest'ultima risente più della prima delle condizioni termiche locali (se la temperatura è molto alta aumenta il livello di fondo).

1.1.3. Combustione di solidi

Il combustibile introdotto nel reattore come polverino (nel caso del carbone) o semi macinati (nel caso della biomassa) subisce un riscaldamento dalla temperatura ambiente alle elevate temperature presenti. L'umidità viene rilasciata a bassa temperatura, intorno ai 100°C , mentre gas e tar (prodotti ad alto peso molecolare gassosi alla temperatura di processo e liquidi a temperatura ambiente) sono rilasciati a temperature comprese tra 350 e 600°C a seconda del rango del carbone. Ciò che rimane dopo la devolatilizzazione è il char, le cui particelle sono solitamente molto porose e con caratteristiche dipendenti dal carbone originario e dalla storia termica subita.

La fase di devolatilizzazione è importante per la combustione per vari motivi:

- controlla la distribuzione dei prodotti (gas, tar, char)
- il tar che si forma contiene composti organici ossigenati o idrocarburi; il gas contiene CO_2 , CO , CH_4 , H_2 e idrocarburi leggeri e ad alte temperature per pirolisi si forma anche acqua. Alle elevate temperature di combustione tali composti sono tutti volatili che tendono a degradarsi ulteriormente (con formazione di gas leggeri per tar- cracking) o vanno verso l'ossidazione in fase omogenea
- il tar è la sorgente primaria di fuliggine, perciò controlla lo scambio termico per irraggiamento nella zona di fiamma dei volatili
- il char residuo è impoverito in ossigeno e idrogeno mentre ha un contenuto di carbonio più elevato rispetto al carbone iniziale; la reazione eterogenea per la sua ossidazione è lo stadio lento del processo, dipende dalla quantità e dalle caratteristiche strutturali e morfologiche del char formato durante il processo di devolatilizzazione.

La devolatilizzazione è influenzata fortemente (per composizione e resa dei prodotti, cinetica globale e temperature caratteristiche) dalla storia termica delle particelle (temperatura del reattore e velocità di riscaldamento), dalla granulometria e dal tipo di combustibile. I prodotti in fase gas o vapore che si formano reagiscono con l'ossigeno nelle vicinanze della particella di

char aumentando la temperatura e consumando ossigeno. Si forma una fiamma a diffusione con combustione omogenea in fase gassosa. La nuvola di volatili che brucia intorno alla particella solida evita che l'ossigeno possa raggiungere la superficie della particella e quindi previene l'ossidazione eterogenea del solido. La combustione dei volatili è molto veloce e quindi non è determinante ai fini della velocità globale del processo, ma è importante per i seguenti motivi:

- formazione di NO_x
- formazione di fuliggine
- stabilità della fiamma
- ignizione del char.

L'ossidazione del char è una reazione eterogenea. La descrizione della reazione eterogenea di ossidazione del char è complessa, a causa dei numerosi fattori che influenzano il processo. La reazione in sé si può schematizzare secondo diversi step:

- diffusione di ossigeno e altri reagenti verso la particella
- diffusione attraverso i pori
- adsorbimento sulla superficie interna
- reazione dei reagenti (ossidazione del carbonio)
- desorbimento dei prodotti (CO)
- diffusione dei prodotti verso l'esterno
- ossidazione del CO all'interno della particella o nello strato limite intorno ad essa.

Quindi oltre a fenomeni chimici è necessario considerare anche il trasferimento di materia dal bulk alla particella, la diffusione delle specie gassose in un mezzo poroso e il trasferimento di calore. Questa serie di processi in genere è più lenta della devolatilizzazione e quindi rappresenta lo stadio controllante del processo di combustione dei solidi.

Nelle prove di devolatilizzazione si inietta nel reattore polverino di carbone tal quale e si cerca di interrompere attraverso un opportuno quench il processo dopo la fase di combustione dei volatili essendo questo il fenomeno di interesse in questa fase. Ovviamente vista la ristrettezza dei tempi caratteristici è inevitabile avere anche dell'ossidazione del char. Nel caso, invece, delle prove di ossidazione del char si inietta nel reattore del char precedentemente ottenuto e se ne studia la combustione.

1.1.4. Tipi di prove

Sono stati effettuati due tipi di prove sperimentali:

- prove di devolatilizzazione del combustibile
- prove di ossidazione del char residuo.

Sia le prove di devolatilizzazione che di ossidazione del char sono state effettuate secondo quattro condizioni di alimentazione del combustibile:

- continua stazionaria

- in transitorio ad alimentazione continua
- pulsata
- in transitorio ad alimentazione pulsata.

Nelle prove ad alimentazione continua nel reattore è stata inserita la portata di set point costante di 110 g/h, condizione simile alle caldaie industriali. Nelle prove pulsate si è iniettata una quantità di 250 mm³ di combustibile nel reattore a spot, così da evidenziare meglio il passaggio della dose di combustibile davanti alle sonde e poterne seguire le evoluzioni nel reattore. Ovviamente queste prove non sono applicabili per una diagnostica su caldaie industriali, come invece le continue, ma sono molto ricche di contenuti informativi sulle dinamiche dei segnali registrati dalle sonde. Infatti potendo distinguere bene il passaggio del combustibile davanti alla sonda è possibile interpretare più facilmente il segnale registrato e attribuirlo con certezza ai processi subiti dal combustibile nel reattore. Le prove in transitorio, ad alimentazione sia continua che transitoria, sono state effettuate registrando con le sonde un periodo di tempo maggiore rispetto a quello di alimentazione del combustibile, così che fosse possibile notare una variazione del segnale delle sonde in corrispondenza del passaggio di combustibile.

Nelle prove di aprile 2011 sono state messe quattro sonde lungo il reattore in corrispondenza di altrettante porte, mentre nelle prove di settembre 2011 una sonda è stata posizionata sul fondo del reattore. In questo modo è possibile registrare il comportamento delle particelle di combustibile dal momento in cui entrano nel reattore a quando escono dopo aver subito il quench.

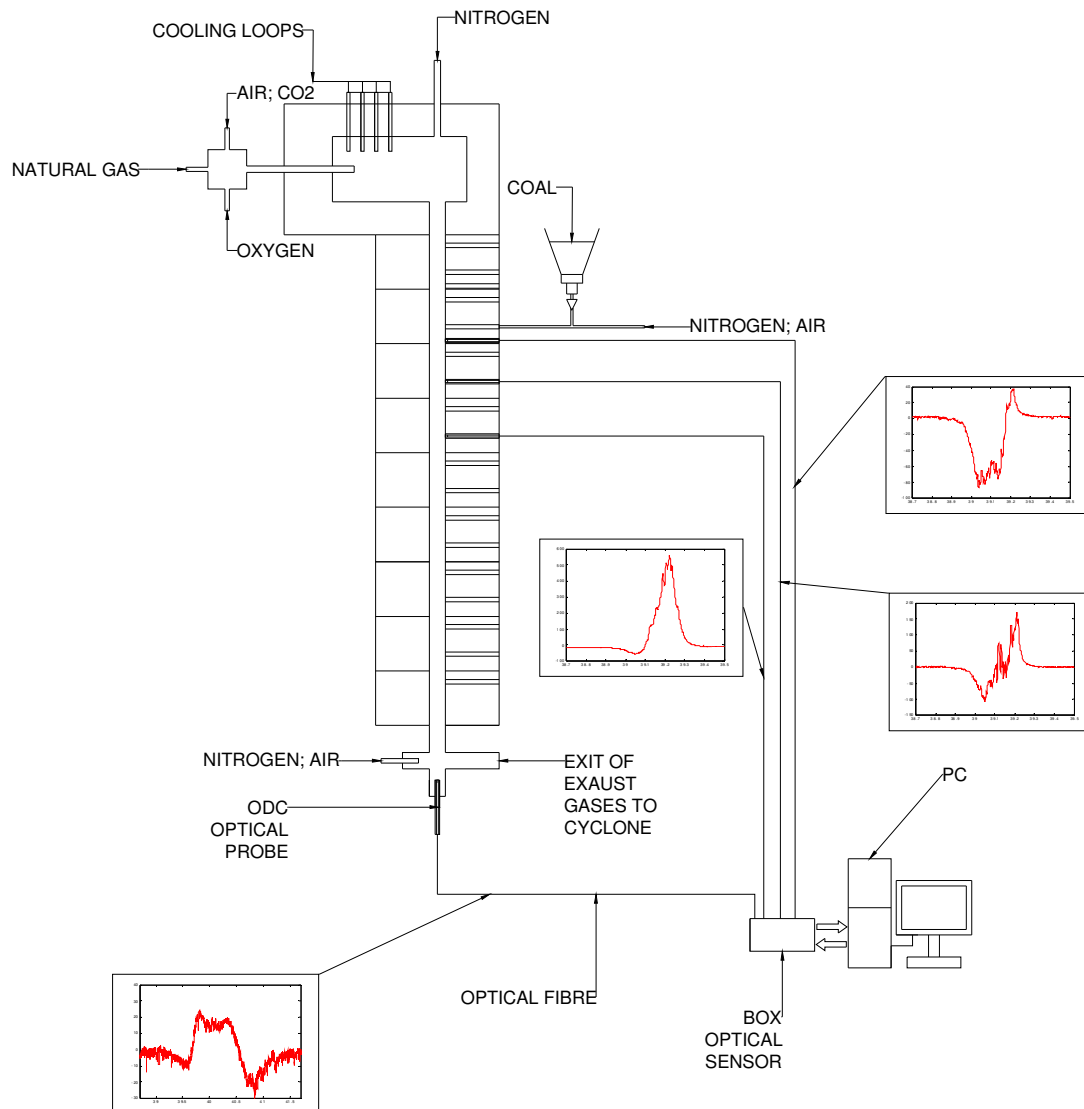


Figura 5: Schema reattore IPFR e sonde ODC nelle prove di settembre

1.1.5. Combustibili utilizzati

Per le prove sono stati utilizzati vari combustibili:

- polverino di carbone Sud Africano tal quale di due granulometrie: maggiore di 125 μm e compreso tra 38 e 90 μm
- char da polverino di carbone Sud Africano di due granulometrie: compreso tra 90 e 125 μm e compreso tra 45 e 90 μm
- semi di girasole spremuti e macinati come biomassa.

I combustibili sono stati analizzati per stabilirne la composizione sia con analisi proximate che ultimate (con TGA e CHN). Se ne riportano i risultati:

- carbone sud africano tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

<i>N. campione</i>	<i>Moisture (wet)</i>	<i>VM (wet)</i>	<i>FC (wet)</i>	<i>Ash (wet)</i>	<i>VM (dry)</i>	<i>FC (dry)</i>	<i>Ash (dry)</i>	<i>VM (dry ash free)</i>
1	2.484%	29.549%	55.371%	12.597%	30.302%	56.781%	12.917%	34.796%
1	3.465%	26.488%	55.838%	14.210%	27.438%	57.842%	14.720%	32.174%

Tabella 1: Elenco risultati prove su campioni di carbone $>125\ \mu\text{m}$ tal quali

<i>N. campione</i>	<i>Weight (mg)</i>	<i>% C wet</i>	<i>% H wet</i>	<i>% N wet</i>	<i>% C dry</i>	<i>% H dry</i>	<i>% N dry</i>
1	0.1086	67.81%	4.3410%	1.58050%	69.889%	4.474%	1.629%
1	0.1057	66.91%	4.2820%	1.58290%	68.961%	4.413%	1.631%

Tabella 2: Elenco risultati prove su campioni di carbone $>125\ \mu\text{m}$ tal quali

- carbone sud africano tal quale granulometria $38 < x < 90\ \mu\text{m}$

<i>N. campione</i>	<i>Moisture (wet)</i>	<i>VM (wet)</i>	<i>FC (wet)</i>	<i>Ash (wet)</i>	<i>VM (dry)</i>	<i>FC (dry)</i>	<i>Ash (dry)</i>	<i>VM (dry ash free)</i>
2	2.369%	28.015%	53.452%	16.165%	28.694%	54.749%	16.557%	34.388%

Tabella 3: Elenco risultati prove su campione di carbone $38 < x < 90\ \mu\text{m}$ tal quale

<i>N. campione</i>	<i>Weight (mg)</i>	<i>% C wet</i>	<i>% H wet</i>	<i>% N wet</i>	<i>% C dry</i>	<i>% H dry</i>	<i>% N dry</i>
2	0.1169	66.72%	3.9950%	1.48360%	68.339%	4.092%	1.520%
2	0.1072	66.25%	4.0060%	1.50690%	67.858%	4.103%	1.543%

Tabella 4: Elenco risultati prove su campione di carbone $38 < x < 90\ \mu\text{m}$ tal quale

- char da carbone sud africano granulometria $90 < x < 125\ \mu\text{m}$

<i>N. campione</i>	<i>Moisture (wet)</i>	<i>VM (wet)</i>	<i>FC (wet)</i>	<i>Ash (wet)</i>	<i>VM (dry)</i>	<i>FC (dry)</i>	<i>Ash (dry)</i>	<i>VM (dry ash free)</i>
--------------------	-----------------------	-----------------	-----------------	------------------	-----------------	-----------------	------------------	--------------------------

e								
3	5.052%	8.817%	67.232%	18.899%	9.286%	70.809%	19.904%	11.594%

Tabella 5: Elenco risultati prove su campione di char da carbone 90<x<125 µm

<i>N. campione</i>	<i>Weight (mg)</i>	<i>% C wet</i>	<i>% H wet</i>	<i>% N wet</i>	<i>% C dry</i>	<i>% H dry</i>	<i>% N dry</i>
3	0.1111	67.76%	1.5000%	1.30590%	71.366%	1.580%	1.375%
3	0.1102	67.62%	1.5110%	1.30450%	71.218%	1.591%	1.374%

Tabella 6: Elenco risultati prove su campione di char da carbone 90<x<125 µm

- char da carbone sud africano granulometria 45<x<90 µm

<i>N. campione</i>	<i>Moisture (wet)</i>	<i>VM (wet)</i>	<i>FC (wet)</i>	<i>Ash (wet)</i>	<i>VM (dry)</i>	<i>FC (dry)</i>	<i>Ash (dry)</i>	<i>VM (dry ash free)</i>
4	2.468%	8.848%	67.472%	21.213%	9.072%	69.179%	21.749%	11.593%

Tabella 7: Elenco risultati prove su campione di char da carbone 45<x<90 µm

<i>N. campione</i>	<i>Weight (mg)</i>	<i>% C wet</i>	<i>% H wet</i>	<i>% N wet</i>	<i>% C dry</i>	<i>% H dry</i>	<i>% N dry</i>
4	0.1045	67.80%	1.3150%	1.30960%	69.515%	1.348%	1.343%
4	0.1098	67.66%	1.3290%	1.29460%	69.372%	1.363%	1.327%

Tabella 8: Elenco risultati prove su campione di char da carbone 45<x<90 µm

- biomassa semi di girasole spremuti e macinati

<i>N. campione</i>	<i>Moisture (wet)</i>	<i>VM (wet)</i>	<i>FC (wet)</i>	<i>Ash (wet)</i>	<i>VM (dry)</i>	<i>FC (dry)</i>	<i>Ash (dry)</i>	<i>VM (dry ash free)</i>
5	9.388%	69.378%	15.309%	5.926%	76.565%	16.895%	6.540%	81.923%

Tabella 9: Elenco risultati prove su campioni di biomassa tal quale

<i>N. campione</i>	<i>Weight (mg)</i>	<i>% C dry</i>	<i>% H dry</i>	<i>% N dry</i>
5	0.1415	46.35%	5.8630%	4.97780%
5	0.1414	46.60%	5.9290%	4.68270%
5	0.1460	46.18%	5.9750%	4.73300%

Tabella 10: Elenco risultati prove su campioni di biomassa tal quale

1.1.6. Variabili di processo

Le prove sono state condotte variando alcuni parametri operativi, al fine di indagare la variazione nella risposta delle sonde e determinare alcuni parametri di processo significativi. In particolar modo il poter modificare delle condizioni permette di convalidare il segnale registrato dalle sonde visto che l'effetto sulla combustione dei parametri modificati è noto. Una volta convalidato il funzionamento delle sonde sotto questo aspetto è possibile considerare come attendibili anche eventuali altre informazioni che dal segnale possono essere tratte e sulle quali a priori esistono molte meno certezze. Ovviamente, però, senza una fase di tuning ad hoc non è possibile considerare attendibili i risultati. Le variabili sulle quali sono state effettuate modifiche durante le prove sperimentali sono:

- temperatura
- concentrazione di ossigeno nel reattore
- gas di trasporto
- presenza di combustione volumetrica o oxycombustione nel precombustore (nel caso di oxycombustione tale condizione si ritrova anche nel successivo reattore IPFR).

La temperatura del reattore rappresenta una variabile molto importante per determinare l'evoluzione della combustione in tutte le sue fasi. Dalla temperatura e dalla velocità di riscaldamento dipende, infatti, la storia termica delle particelle di combustibile. Due sono stati i livelli di temperatura operativa indagati. Alzando la temperatura è presumibile che le particelle raggiungano precedentemente temperature elevate e quindi che sia minore il tempo per raggiungere la devolatilizzazione (e la seguente ignizione della nube di volatili) e per l'ignizione del char.

La concentrazione di ossigeno nel reattore, che viene mantenuta al livello voluto immettendo più aria del necessario nel precombustore, influenza la capacità della nube di volatili e del char di ignire. Ovviamente se la quantità di ossigeno è consistente sarà favorito il contatto con i volatili in fase gas e con il char, mentre se l'ossigeno è molto scarso tale contatto è molto meno probabile e l'ignizione inevitabilmente è sfavorita. Poiché le sonde registrano un'emissione radiativa, se i volatili sono espulsi dalle particelle di combustibile ma non incontrano l'ossigeno e la nube non si ignisce non c'è possibilità di vedere un segnale positivo da attribuire alla devolatilizzazione sebbene essa sia avvenuta. La concentrazione di ossigeno, perciò, è un parametro di fondamentale importanza nella combustione dei solidi.

Per quanto riguarda il gas di trasporto del combustibile sono state analizzate due possibilità: solo azoto oppure una miscela al 50% di azoto e 50% aria. In questo caso, quindi, la corrente è per 90% azoto e 10% ossigeno (circa). Nel secondo caso, quindi, ulteriore ossigeno è aggiunto nel reattore dal gas di trasporto.

Il precombustore può lavorare in condizioni di combustione classica, volumetrica oppure in oxycombustione. In quest'ultimo caso, tuttavia, si hanno condizioni di oxycombustione anche nel reattore, visto che lì flussano i fumi del precombustore. Questa condizione è di notevole importanza per i possibili sviluppi futuri che potrà avere nella combustione industriale, perciò sono state effettuate alcune prove di devolatilizzazione in tali condizioni.

Si riportano di seguito le possibili alternative operative per le varie prove:

- prove di devolatilizzazione su carbone tal quale

<u>Variabile operativa</u>	<u>Possibili alternative</u>			
Granulometria carbone (μm)	>125		38<x<90	
Tipo alimentazione	continua		pulsata	
Tipi di prove	stazionarie		transitorie	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	900		1100	
Ossigeno in eccesso (%)	0	3	6	9
Ambiente di combustione	in aria		in oxycombustione	
Gas carrier	azoto		azoto e aria	

- prove di ossidazione su char di carbone

<u>Variabile operativa</u>	<u>Possibili alternative</u>		
Granulometria char di carbone (μm)	90<x<125		45<x<90
Tipo alimentazione	continua		pulsata
Tipi di prove	stazionarie		transitorie
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			1100
Ossigeno in eccesso (%)			6
Gas carrier	azoto		azoto e aria

- prove di devolatilizzazione su biomassa (semi di girasole spremuti e macinati)

<u>Variabile operativa</u>	<u>Possibili alternative</u>		
Granulometria biomassa (μm)	-		
Tipo alimentazione	continua		pulsata
Tipi di prove	stazionarie		transitorie
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			900
Ossigeno in eccesso (%)	0	3	6
Gas carrier			azoto e aria

1.2. Elaborazione del segnale

1.2.1. *Caratteristiche del segnale originale*

I dati dei segnali originali mostrano alcune problematiche che ne rendono complessa l'analisi immediata:

- il valore assoluto del segnale dipende dalla fase di compensazione nell'acquisizione del segnale stesso, perciò non ha valore
- l'analisi delle frequenze caratteristiche dei segnali mostra la presenza di frequenze comuni nei segnali delle sonde (da confrontare a 2 a 2 visto che nella fase di compensazione e acquisizione del segnale sono state accoppiate le sonde CH0- CH2 e CH1- CH3) e quindi non dipendenti dai fenomeni che coinvolgono il carbone ma da dinamiche del forno o delle sonde stesse e di frequenze sempre presenti e imputabili a ottica e elettronica (50- 100- 120- 150- 200- 250- 350 Hz).

Nel caso delle prove pulsate non è necessario trattare il segnale in modo particolare, è sufficiente un semplice trattamento preliminare. Nel caso, invece, delle prove continue vista la notevole complessità del segnale è stato ritenuto opportuno provare a renderlo il più possibile "pulito", ovvero renderlo più facilmente analizzabile.

1.2.2. *Trattamento del segnale per le prove ad alimentazione continua*

Per ovviare ai problemi presenti si ricorre ad un trattamento dei dati basato sull'"eliminazione" delle frequenze comuni nei segnali (con un'ampiezza significativa) e delle frequenze "tipiche" di ottica e elettronica. Si procede secondo varie fasi con Matlab:

- si convertono le serie dei dati dei segnali delle sonde dal dominio temporale al dominio delle frequenze attraverso la trasformata di Fourier (FFT) rispettando il vincolo sulla frequenza limite di Nyquist
- si individuano le frequenze con ampiezza significativa (>300) comuni ai segnali delle sonde accoppiate
- l'ampiezza di queste frequenze viene notevolmente abbassata e per evitare di rischiare di invertire la fase del segnale (rischio che si avrebbe annullando l'ampiezza) si pone pari a 100
- l'ampiezza delle frequenze "tipiche" viene posta pari al valore medio dell'ampiezza nei successivi 3 Hz così da porsi in condizioni simili al rumore circostante
- il segnale processato si riconverte nel dominio temporale attraverso la trasformata inversa di Fourier (IFFT).

Passando al dominio frequenza, modificando l'ampiezza di alcune frequenze e tornando nel dominio temporale si perdono le informazioni sul valore assoluto del segnale, ma rimangono

intatte le informazioni sulla dinamica del segnale nel tempo. Tutto ciò si può vedere dall'esempio seguente:

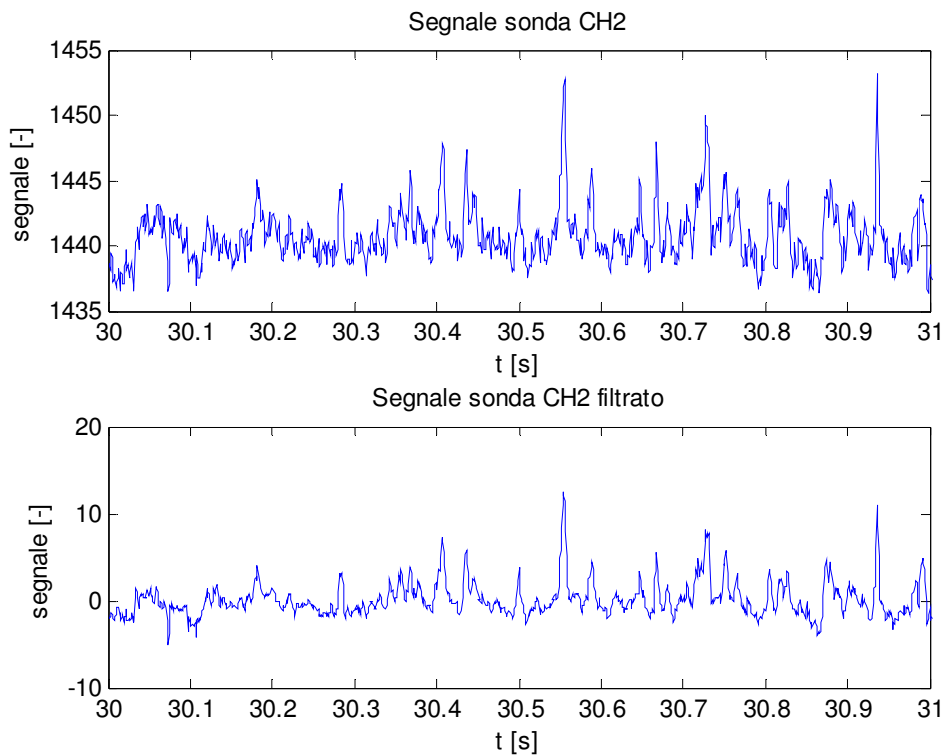


Figura 6: Confronto tra un esempio di segnale originale ed elaborato

1.2.3. Trattamento del segnale per le prove ad alimentazione pulsata

Per non avere il problema sul valore assoluto del segnale del tutto privo di significato, mentre la variazione di segnale è significativa dell'energia rilevata dalla sonda, è necessario trattare il segnale. Vista la semplicità dei segnali delle prove ad alimentazione pulsata è sufficiente eseguire un trattamento di detrend. Tale operazione consiste nel sottrarre dal segnale la migliore retta di fitting dello stesso, nel caso di segnali complessi con variazioni di forma nel tempo Matlab suddivide il segnale in intervalli e sottrae i valori delle rette dei minimi quadrati che approssimano bene ogni intervallo. In questo modo si perde il valore assoluto del segnale, mentre restano intatte la sua variazione e la sua forma, perciò in pratica non si perde nulla della sua dinamica. Il vantaggio in questo caso consiste nel fatto che si può considerare come valore di 0 la radiazione emessa dalle pareti del reattore e considerare una variazione negativa il passaggio di combustibile non ignito (e che quindi assorbe radiazione) mentre una variazione positiva è associata al passaggio di combustibile ignito (e quindi in grado di emettere radiazione). Così facendo risulta più semplice analizzare i segnali visto che si possono

confrontare le intensità registrate in sonde diverse sulla base della variazione del segnale. Tale variazione, infatti, corrisponde all'energia rilevata dalla sonda. Per confermare la conservazione dell'intera dinamica del segnale post trattamento di detrend si riporta un esempio:

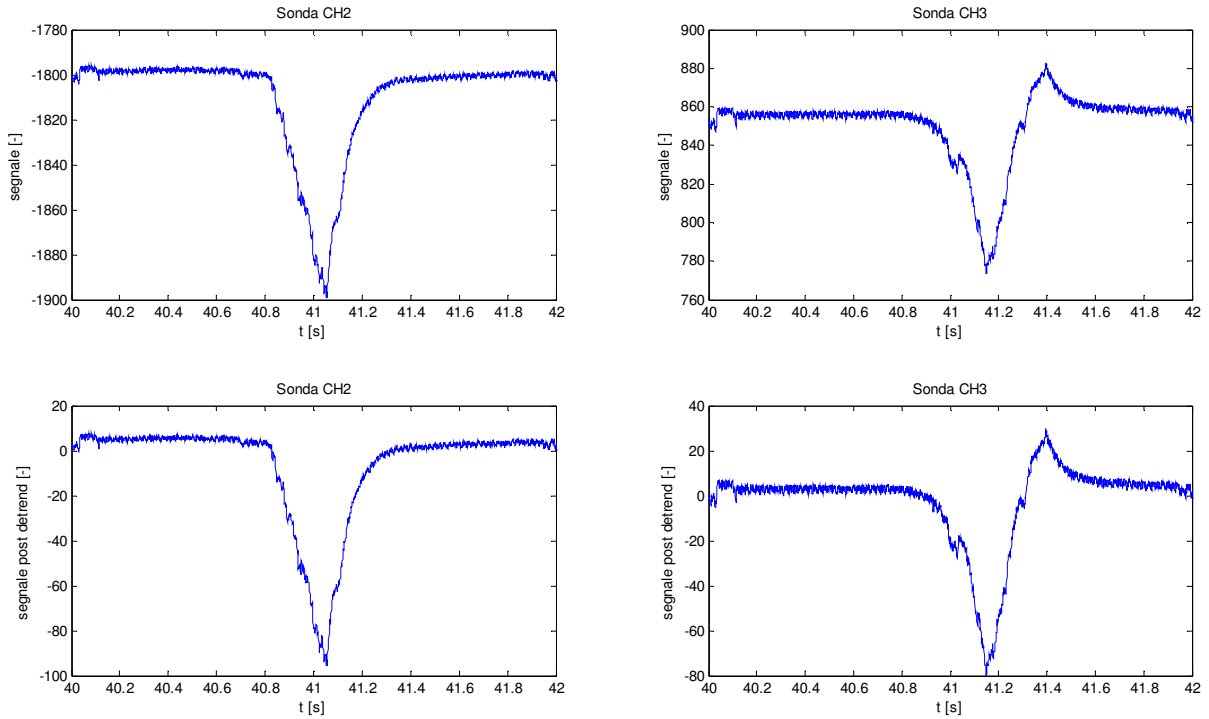


Figura 7: Confronto tra due esempi di segnale originale ed elaborato

2. Prove aprile 2011

2.1. Carbone tal quale

2.1.1. Prove continue

Le prove sono state condotte in varie condizioni operative e di seguito per ogni prova si riportano le condizioni operative e le dinamiche analizzate in intervalli di 5 secondi dopo il trattamento del segnale. Le prove sono state effettuate con una portata di 110 g/h iniettata dalla porta 5.

- ore 15.29 giorno 12/04/11

condizioni operative:

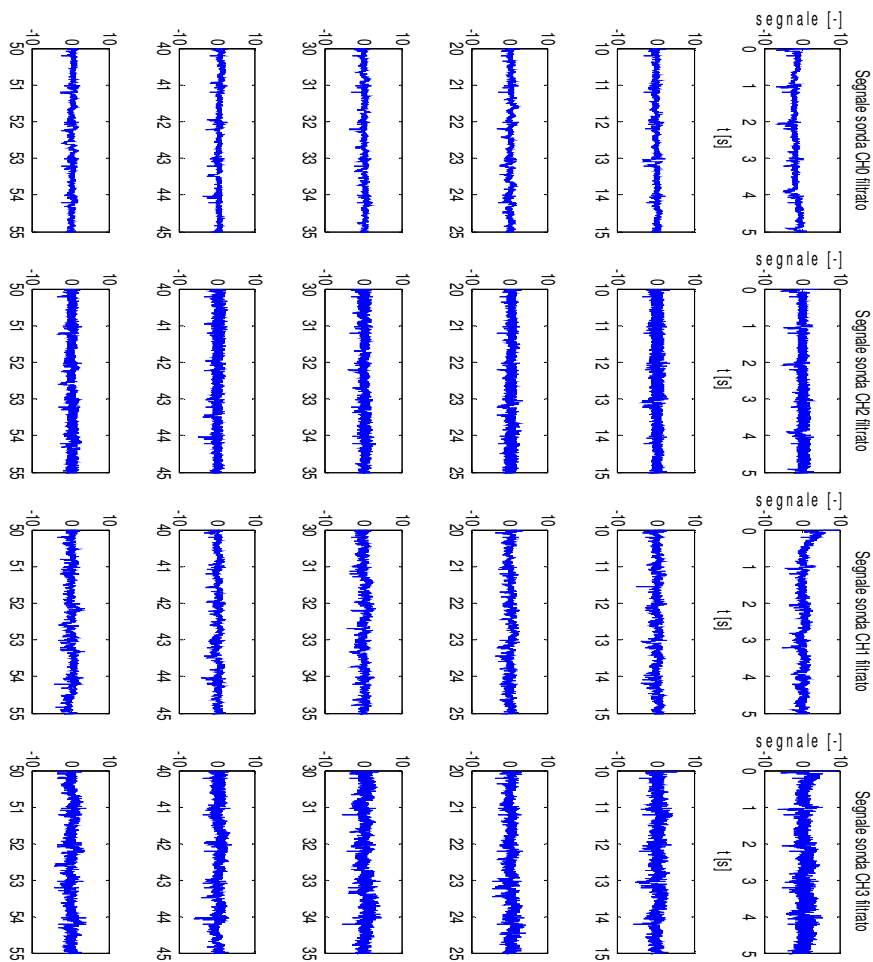
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 16.56 giorno 12/04/11

condizioni operative:

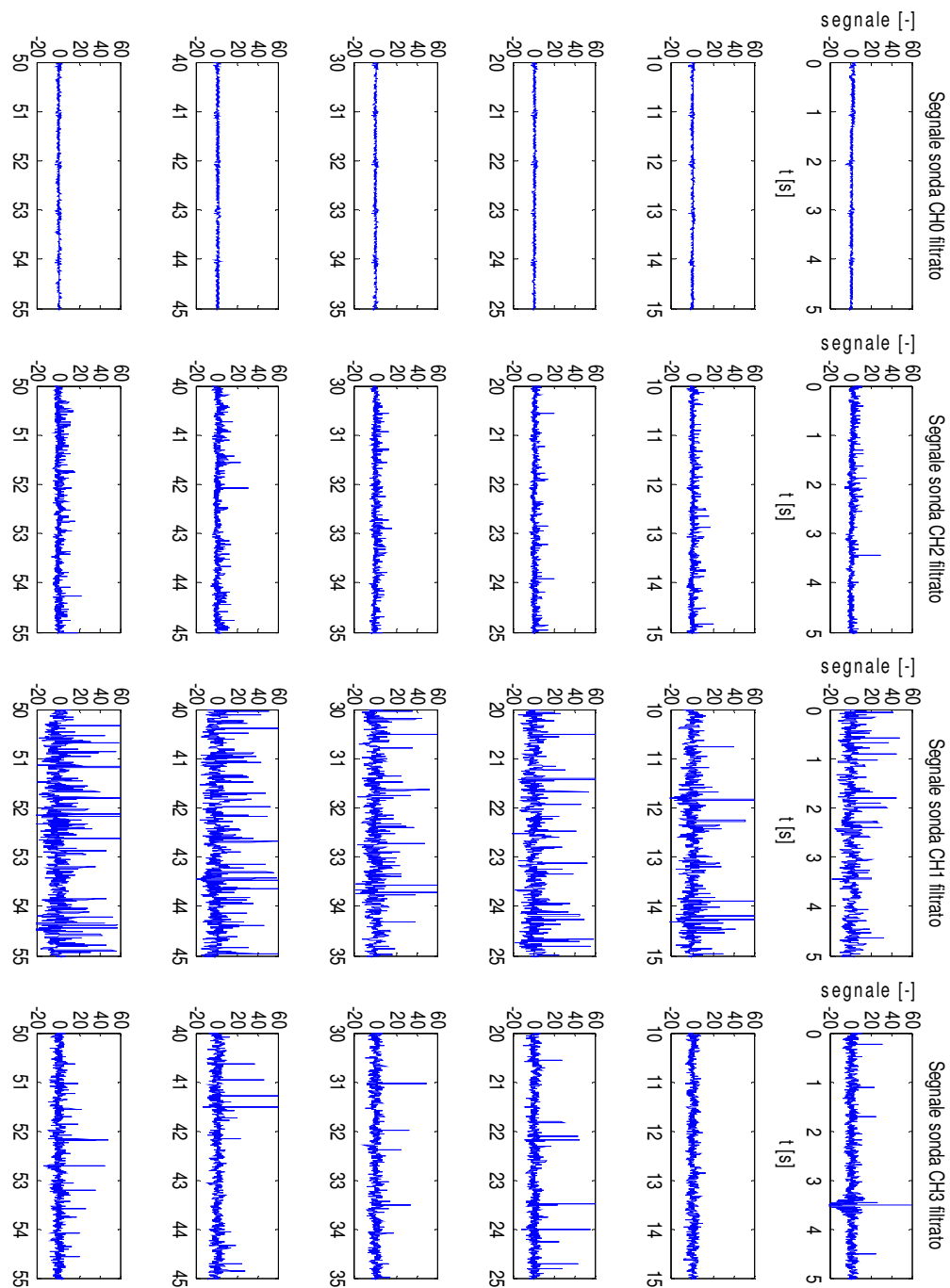
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 3.3%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 17.02 giorno 12/04/11

condizioni operative:

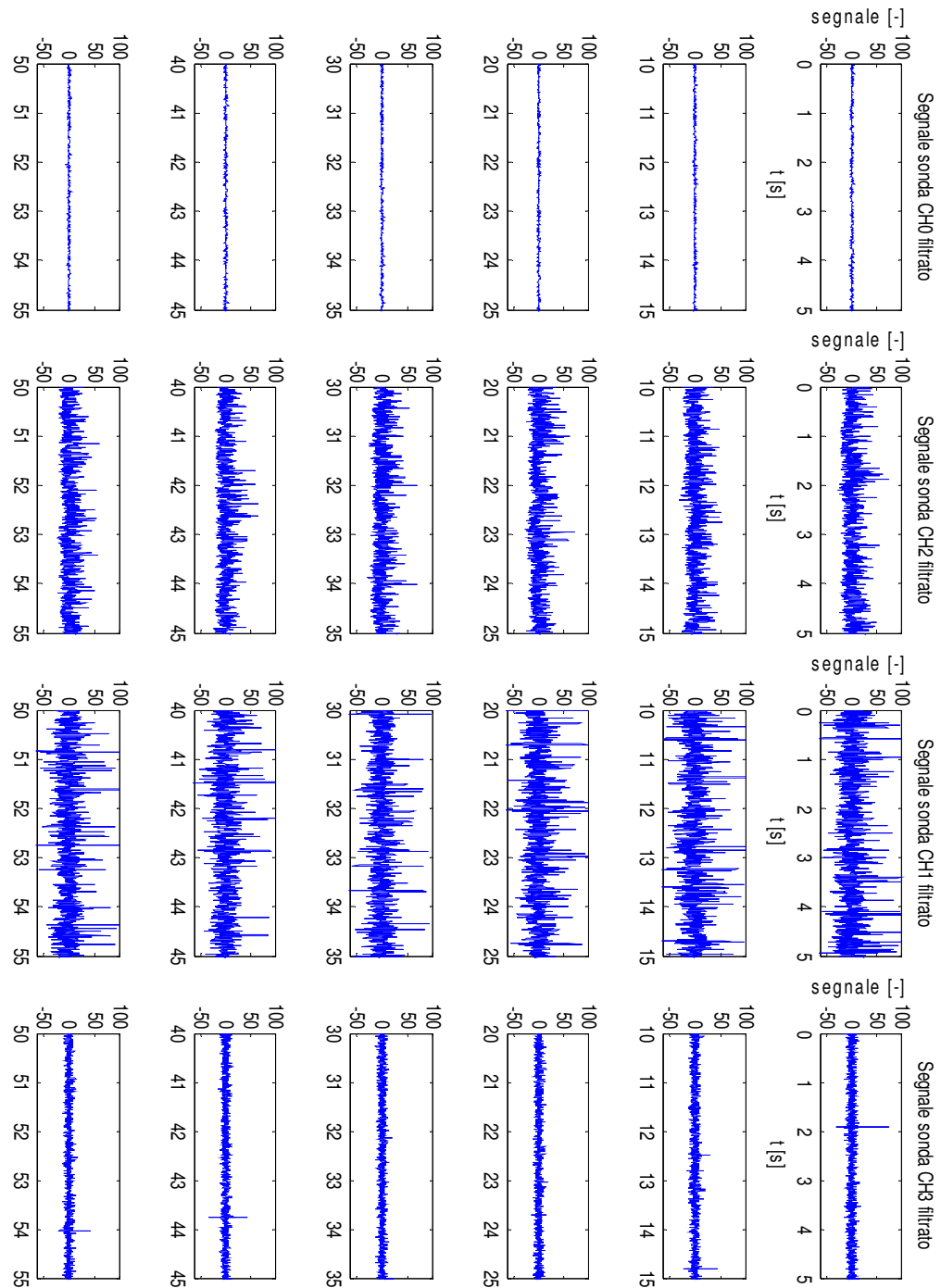
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 09.55 giorno 13/04/11

condizioni operative:

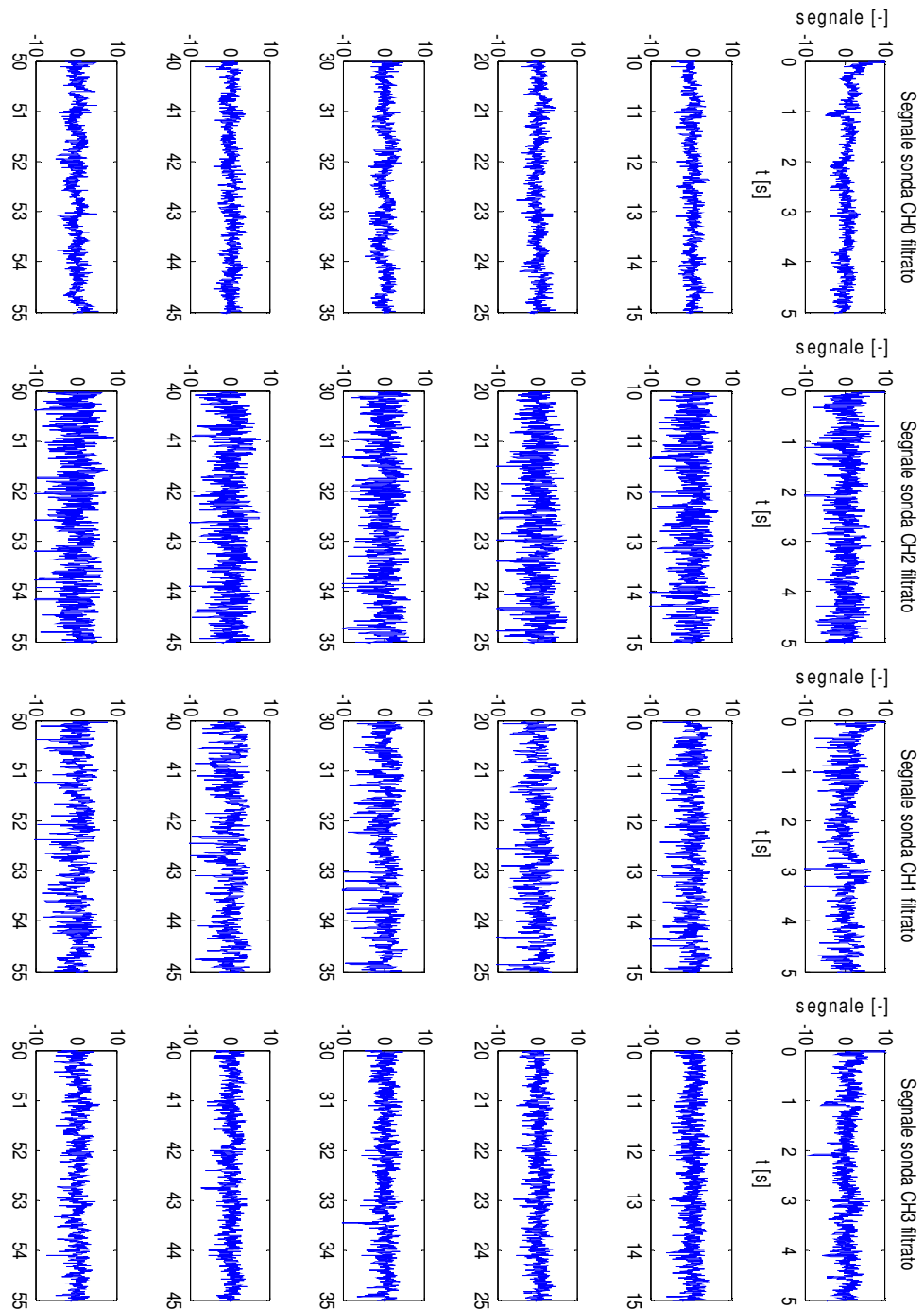
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.25 giorno 13/04/11

condizioni operative:

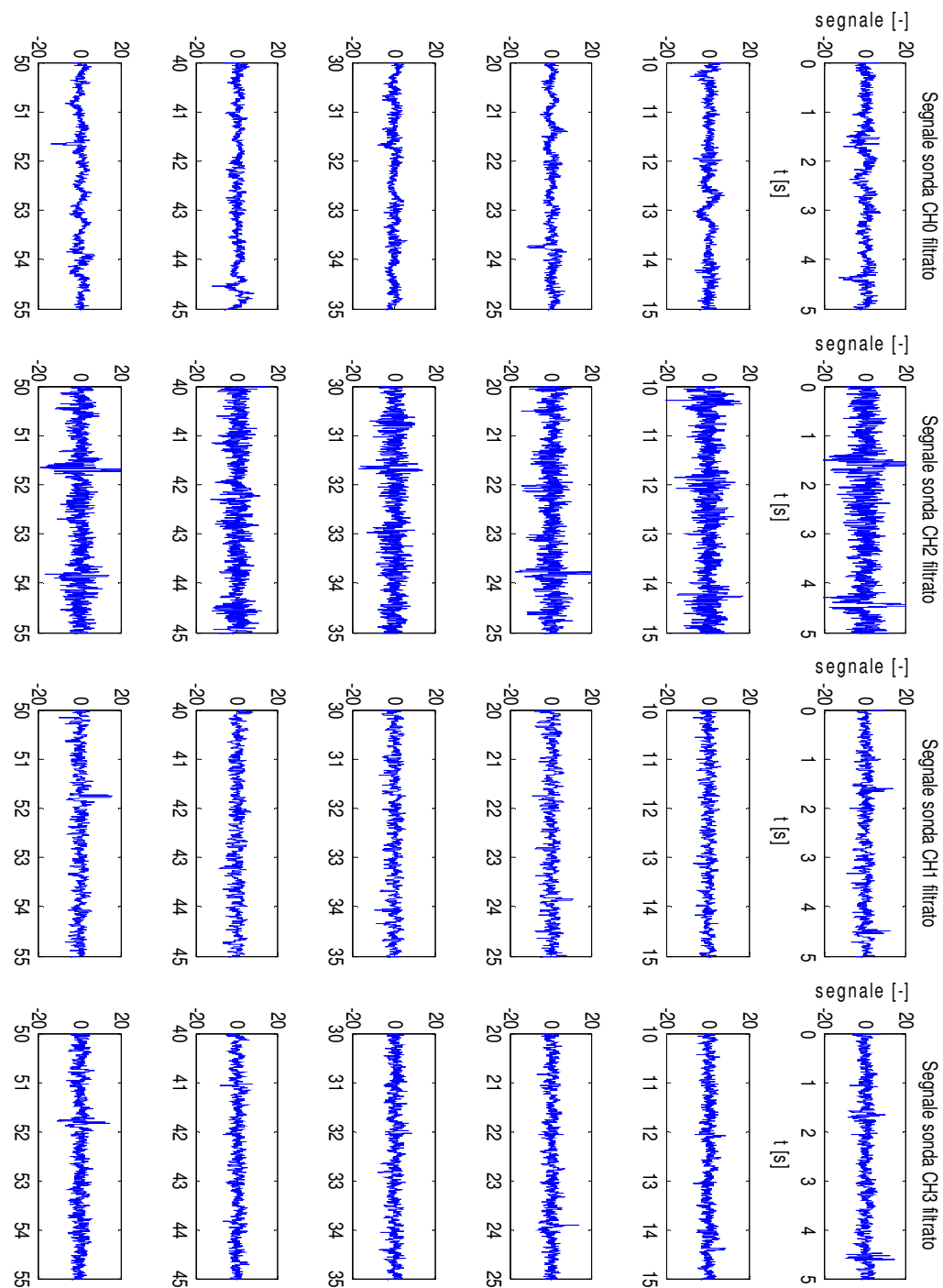
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.3%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.36 giorno 13/04/11

condizioni operative:

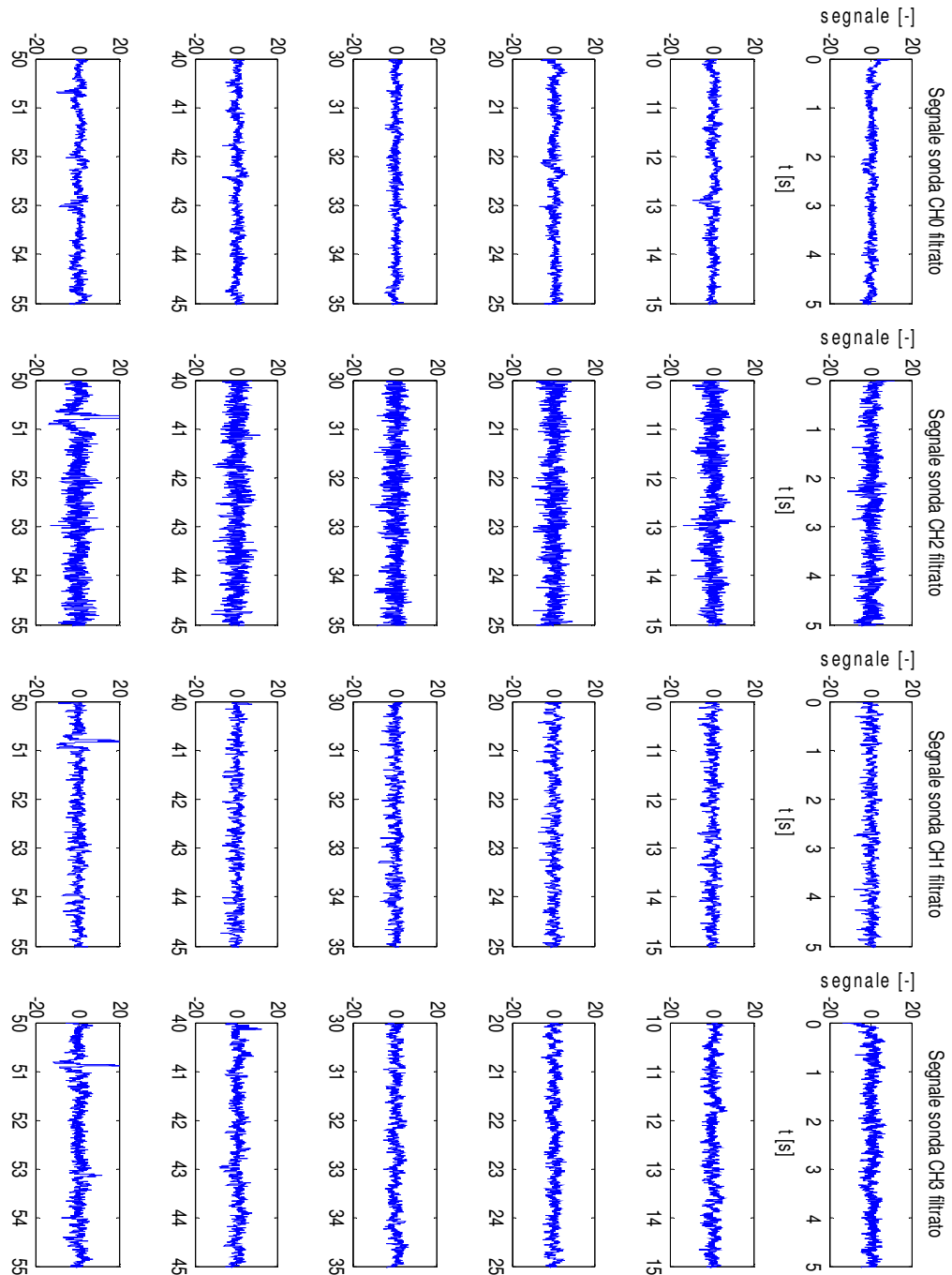
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 11.00 giorno 13/04/11

condizioni operative:

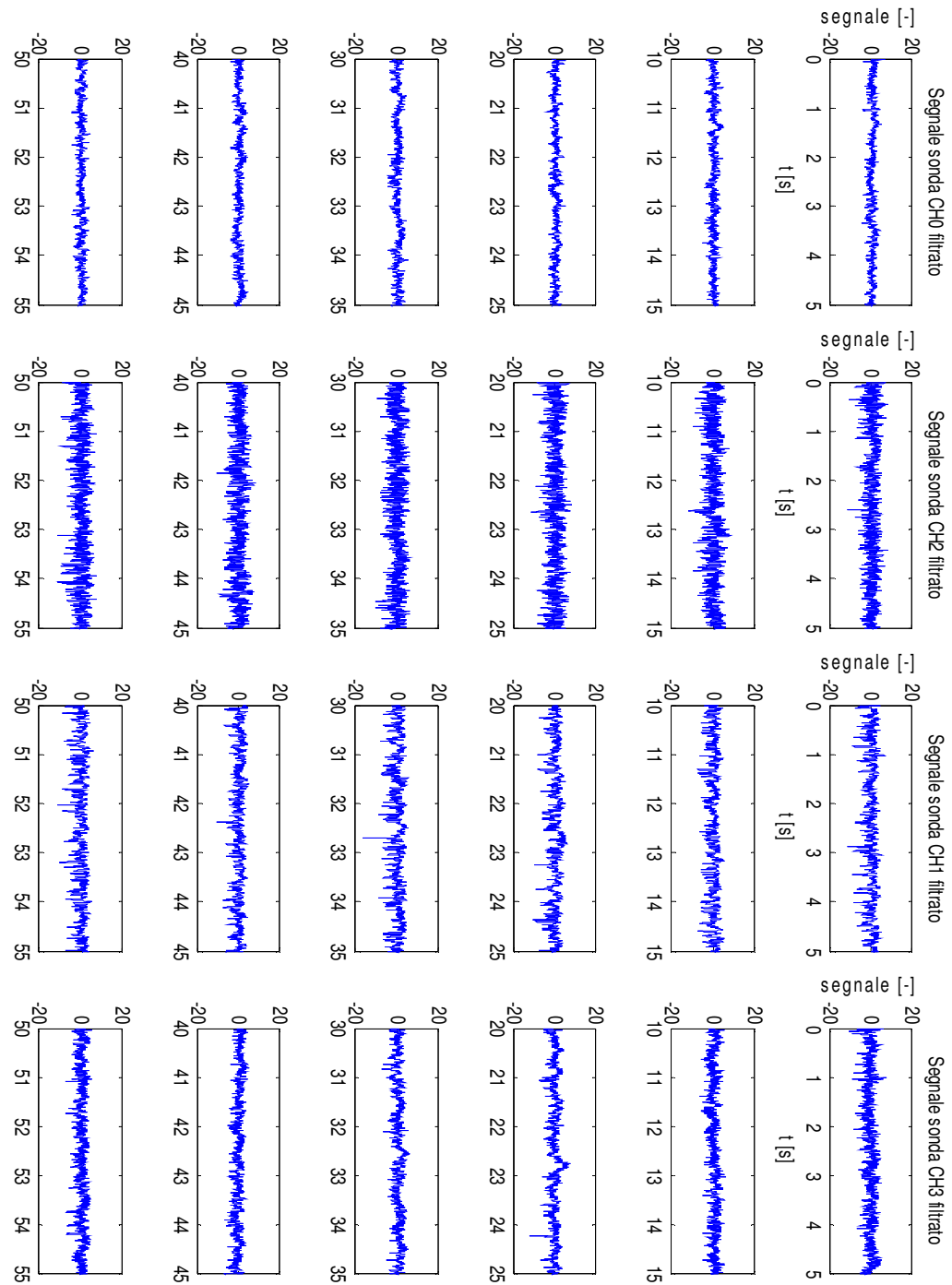
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.25%

temperatura 1100°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 15.46 giorno 13/04/11

condizioni operative:

transitorio: entrata in oxycombustione

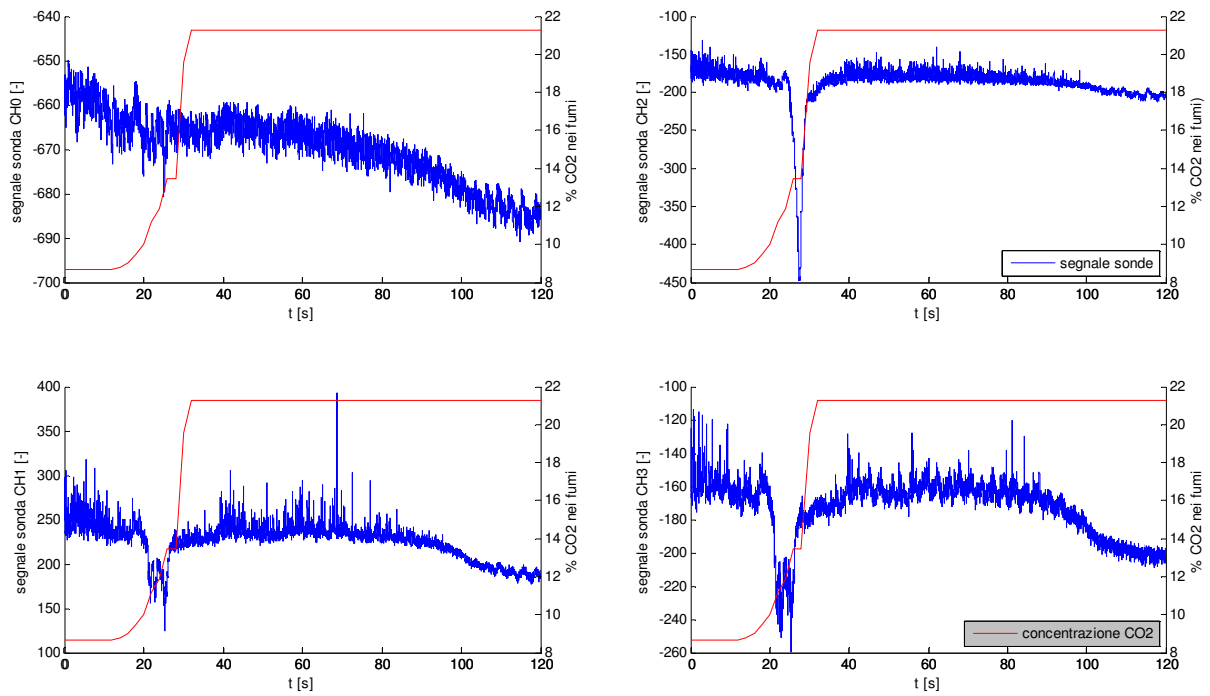
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

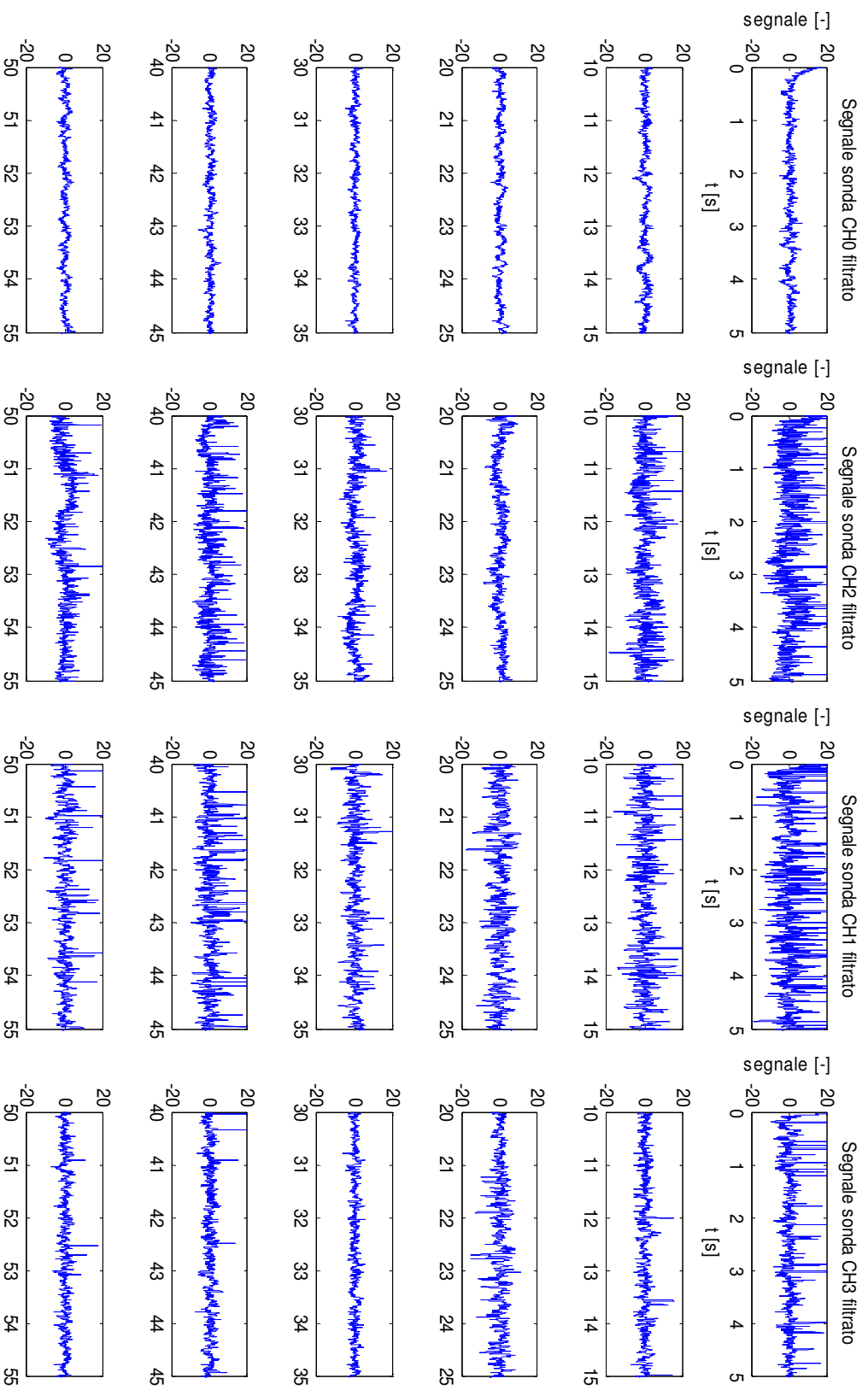
temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



Come valore massimo di fondo scala della CO_2 è stato visualizzato un valore di poco superiore al 21%, in realtà questo è il valore registrato dallo strumento di misura presente poiché rappresenta il suo fondo scala. In realtà la concentrazione effettiva di CO_2 finale corrisponde ad un valore dato dalla frazione da sommare alla concentrazione di ossigeno per ottenere il 100%.



- ore 15.49 giorno 13/04/11

condizioni operative:

oxycombustione stazionaria

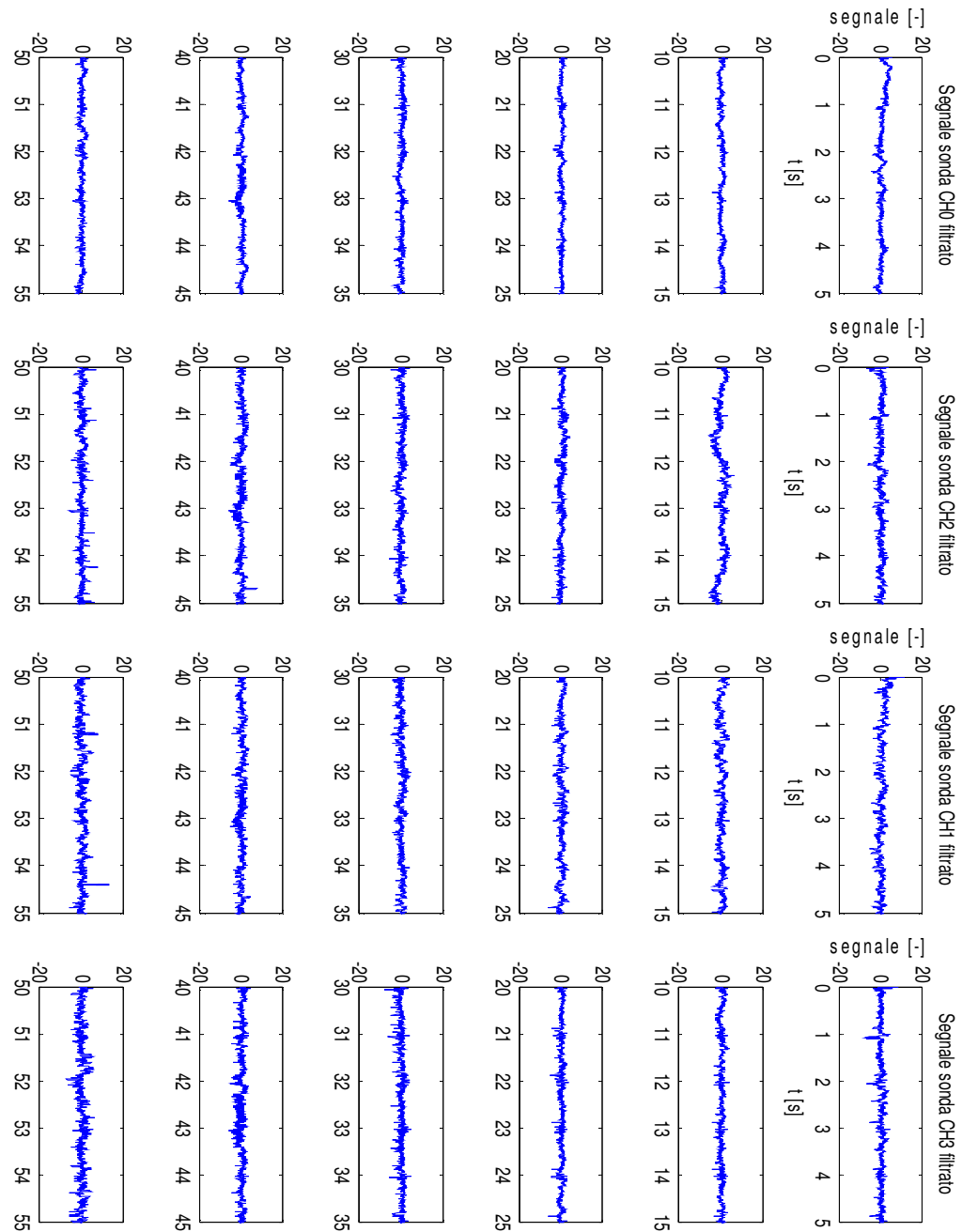
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 15.52 giorno 13/04/11

condizioni operative:

oxycombustione stazionaria

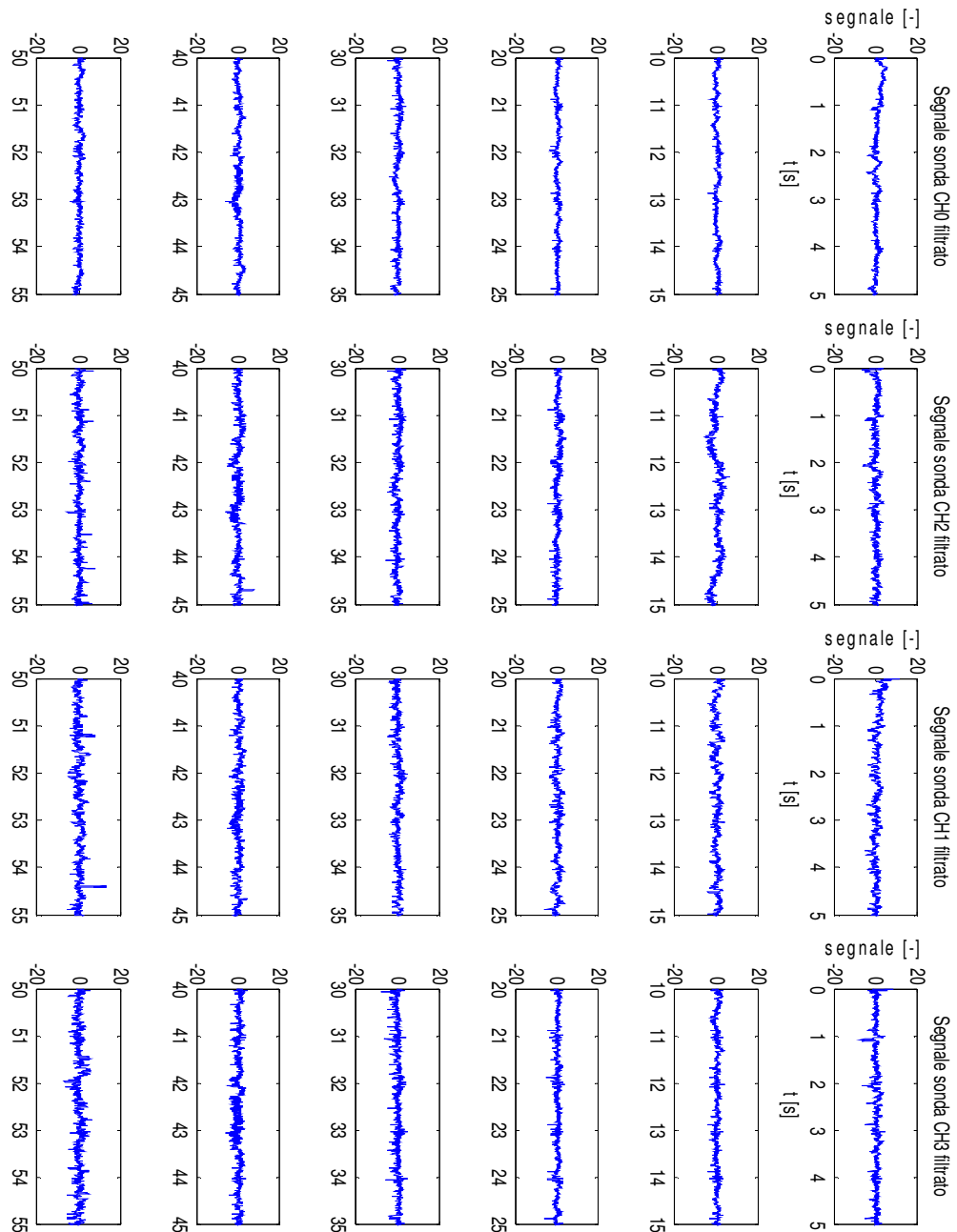
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 in camera di precombustione in posizione assiale, CH2 in camera di precombustione in posizione radiale, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 15.55 giorno 13/04/11

condizioni operative:

transitorio: uscita da oxycombustione

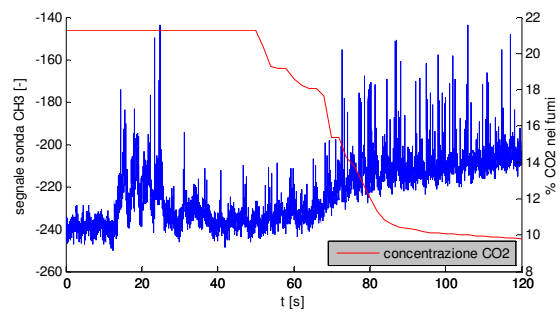
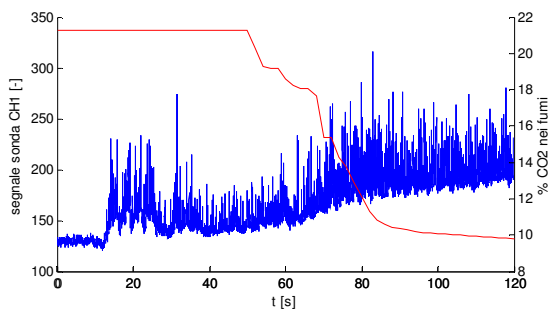
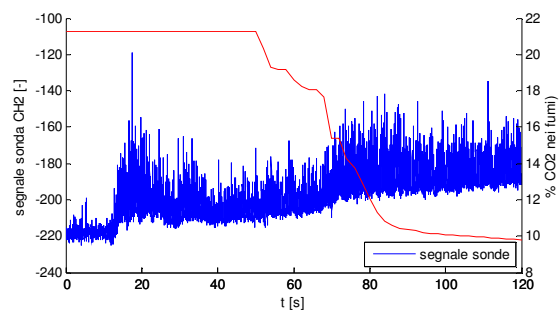
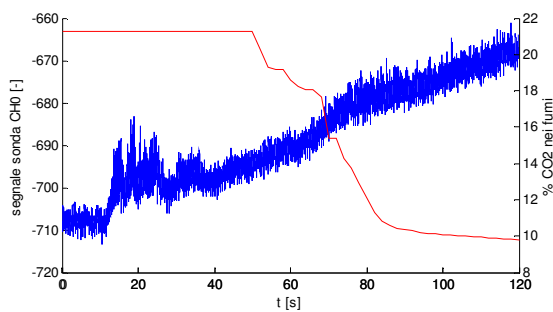
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

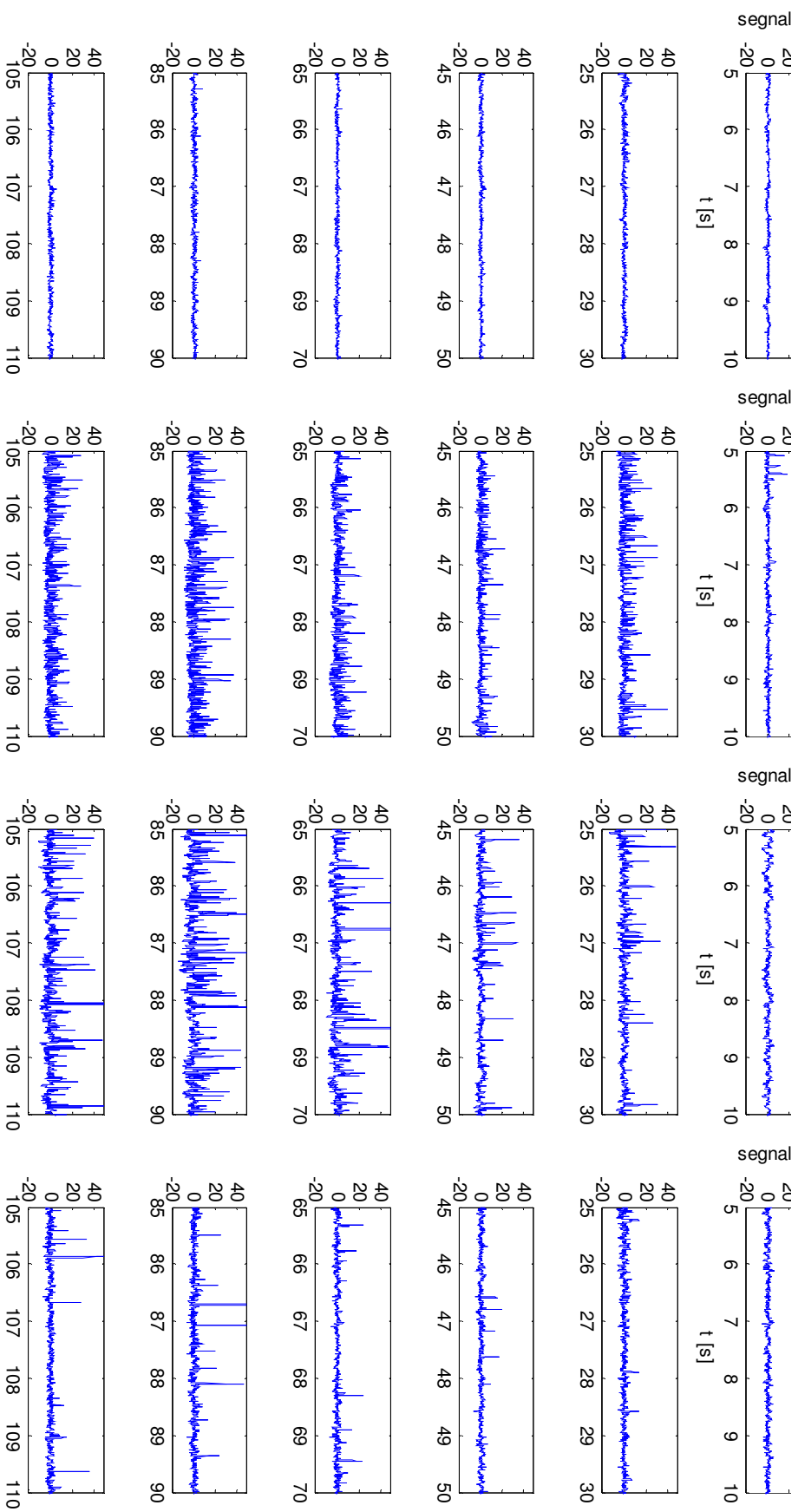
concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 in camera di precombustione in posizione assiale, CH2 in camera di precombustione in posizione radiale, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 16.19 giorno 13/04/11

condizioni operative:

transitorio: entrata in oxycombustione

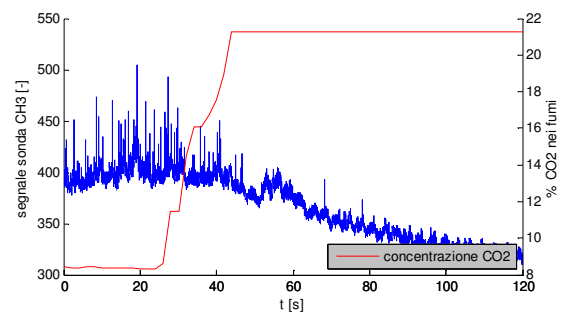
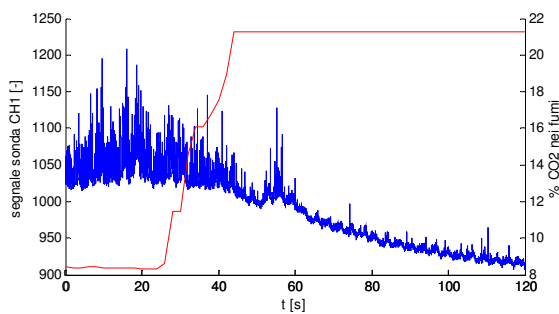
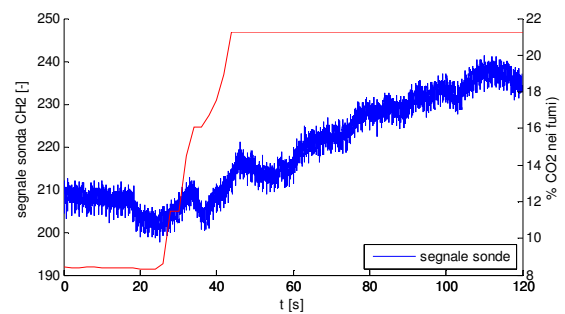
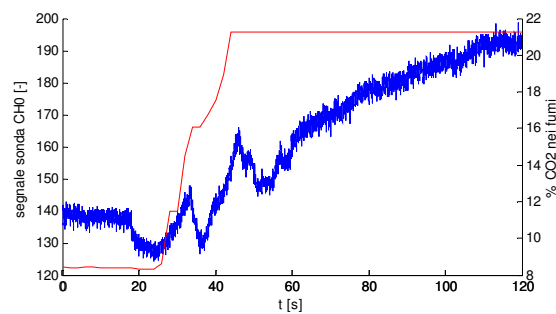
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

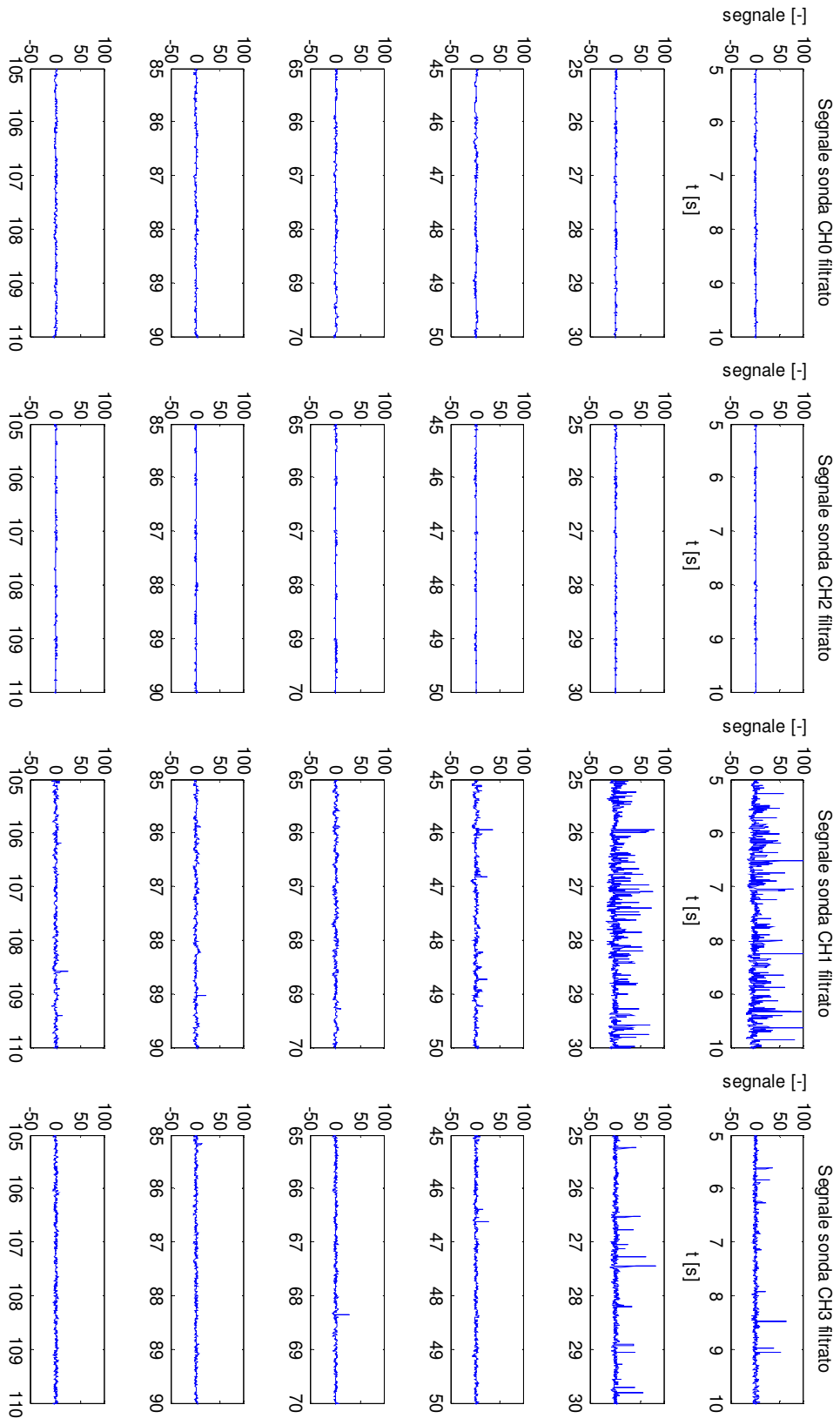
concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 in camera di precombustione in posizione assiale, CH2 in camera di precombustione in posizione radiale, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 16.22 giorno 13/04/11

condizioni operative:

oxycombustione stazionaria

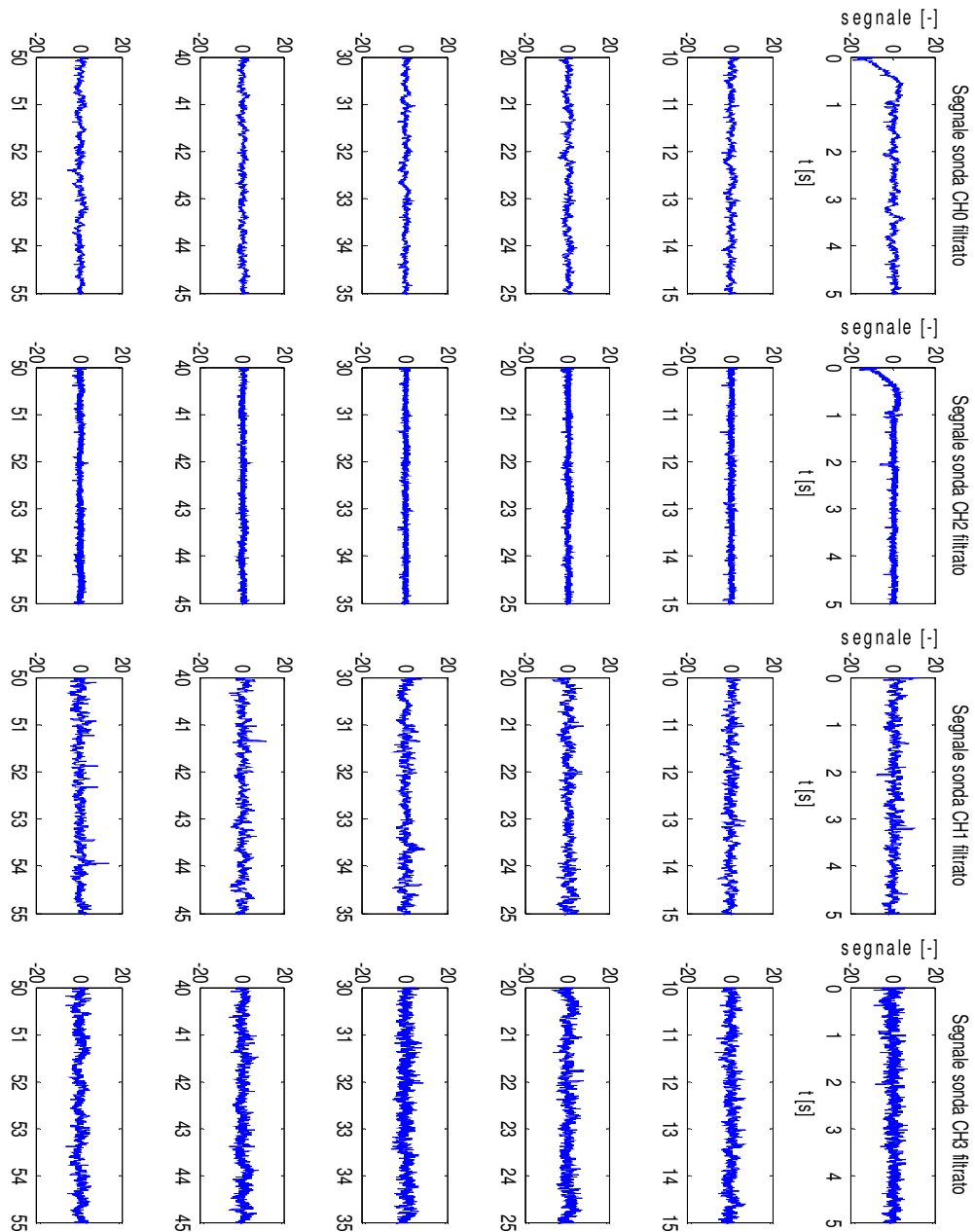
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 in camera di precombustione in posizione assiale, CH2 in camera di precombustione in posizione radiale, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 16.24 giorno 13/04/11

condizioni operative:

transitorio: uscita da oxycombustione

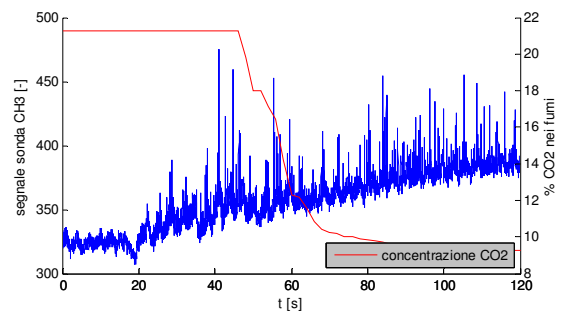
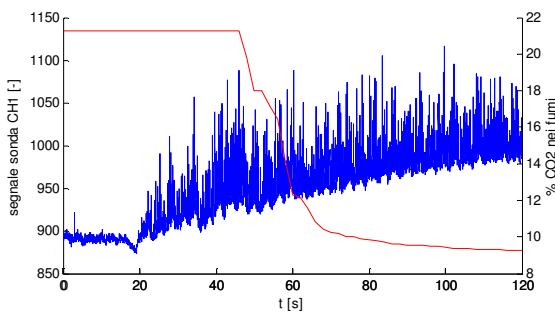
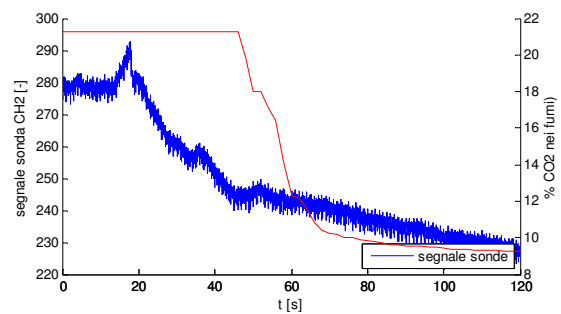
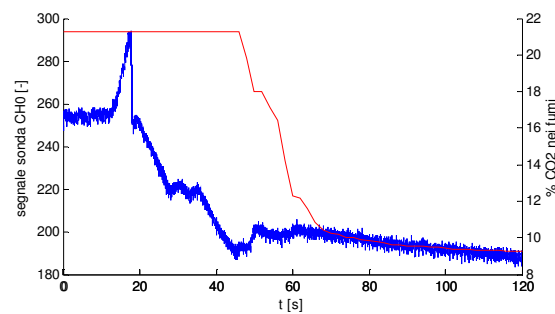
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

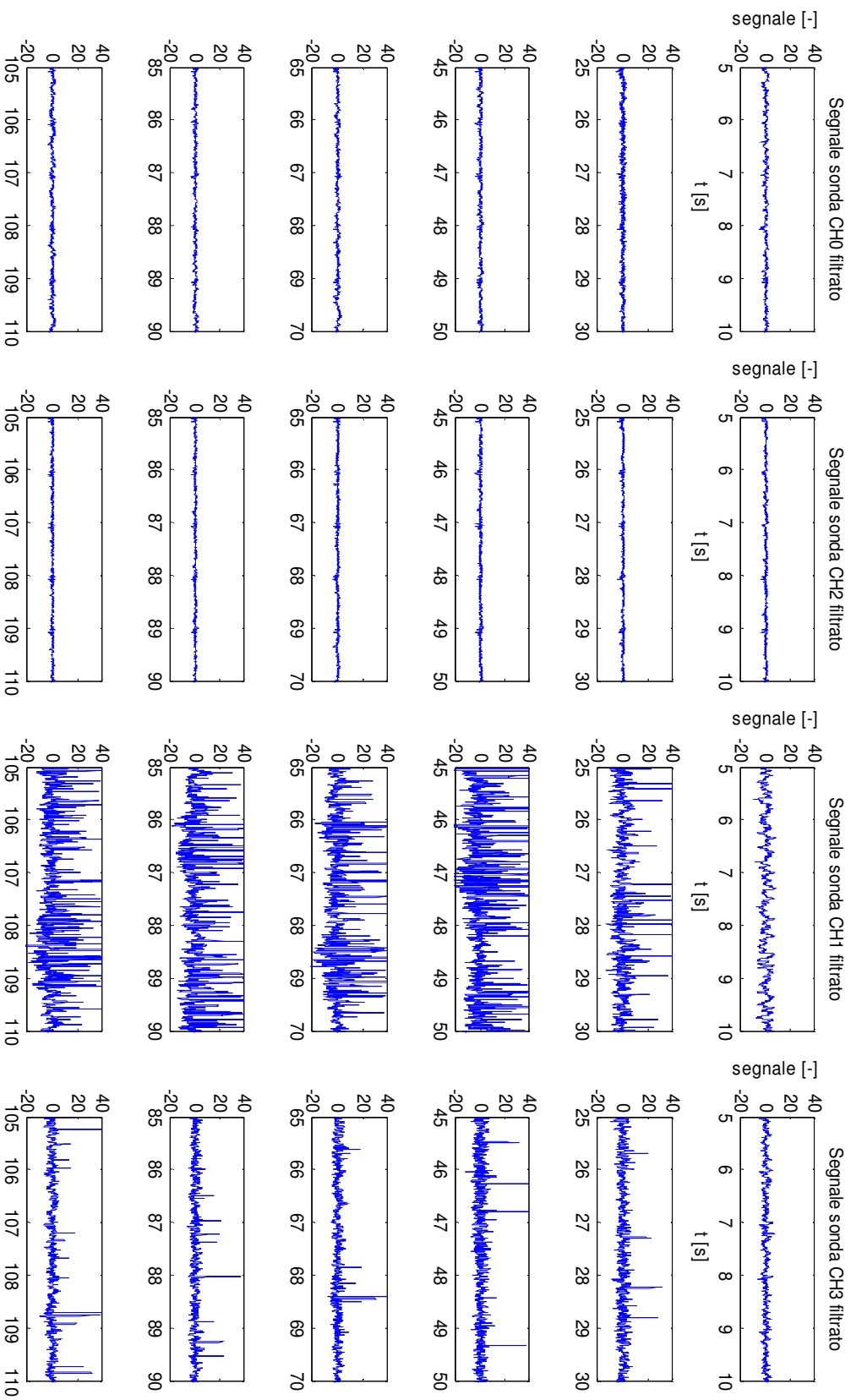
concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 in camera di precombustione in posizione assiale, CH2 in camera di precombustione in posizione radiale, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 14.22 giorno 14/04/11

condizioni operative:

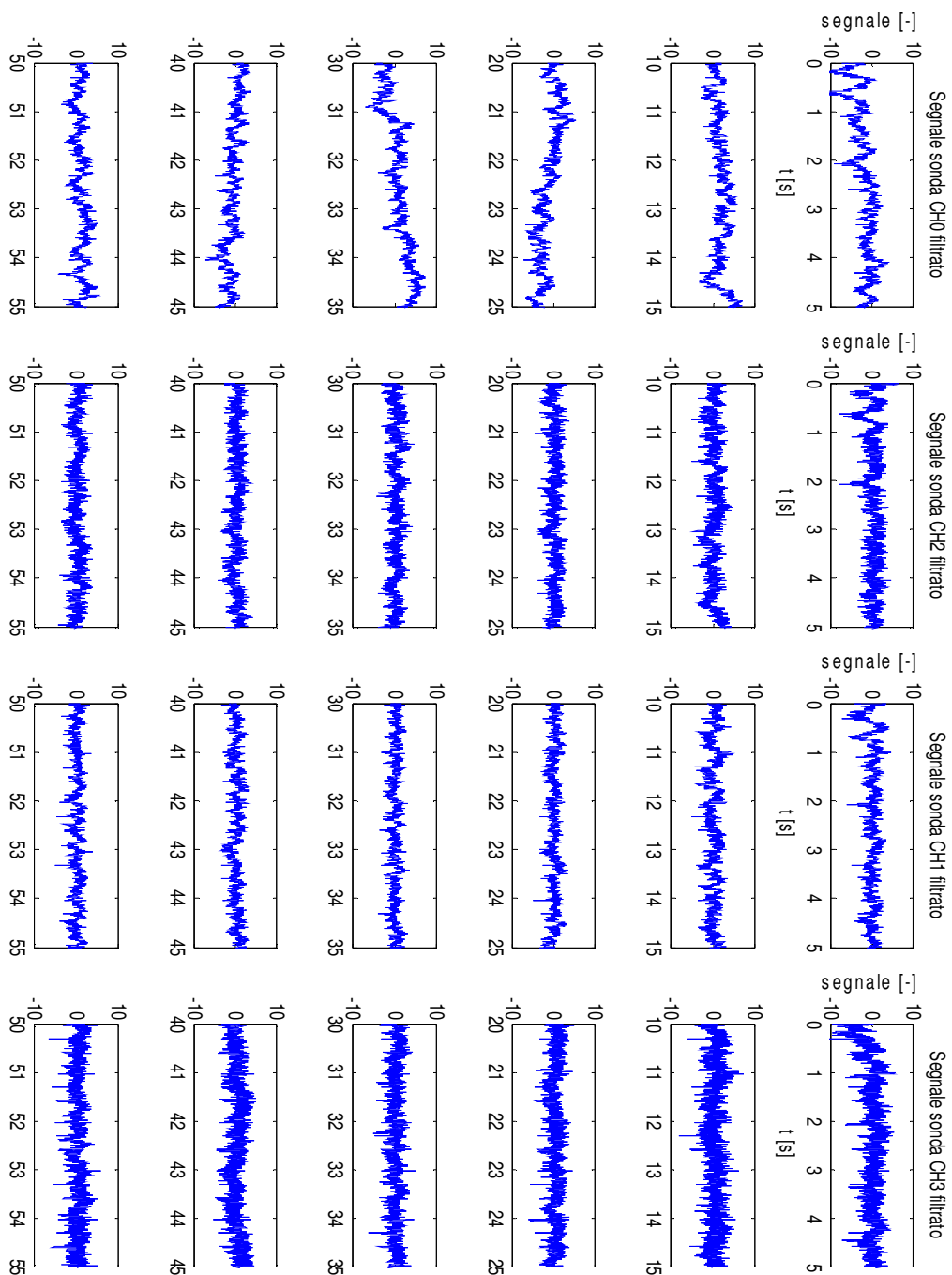
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



2.1.2. Prove in transitorio ad alimentazione continua

Si riportano in questo caso i segnali originali registrati e gli andamenti a 5 secondi per evidenziare la variazione del segnale in presenza di combustibile.

- ore 17.05 giorno 12/04/11

condizioni operative:

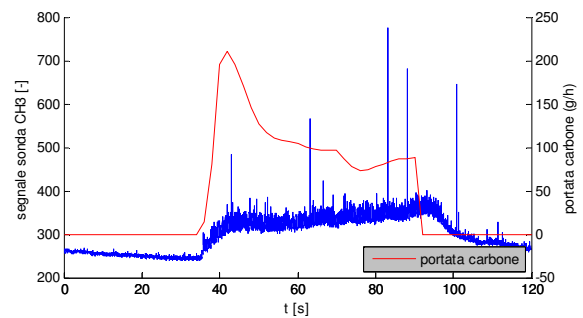
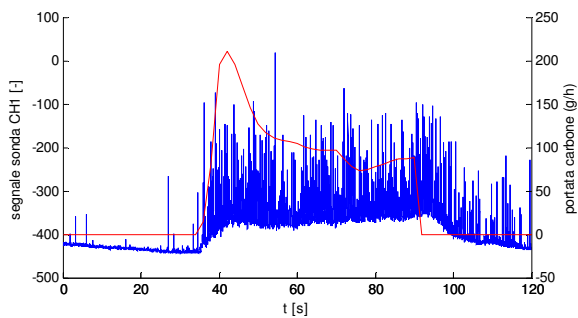
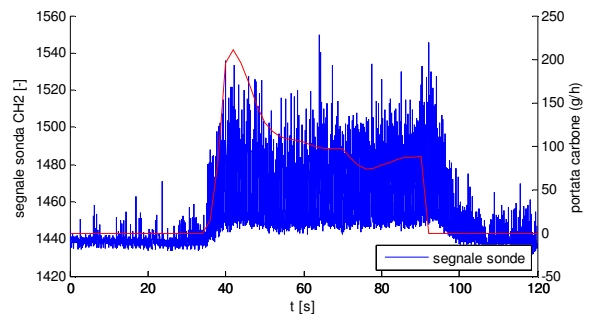
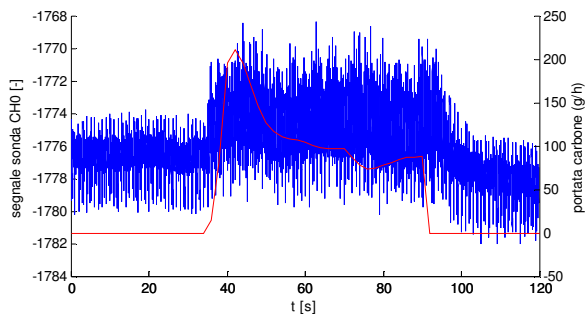
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

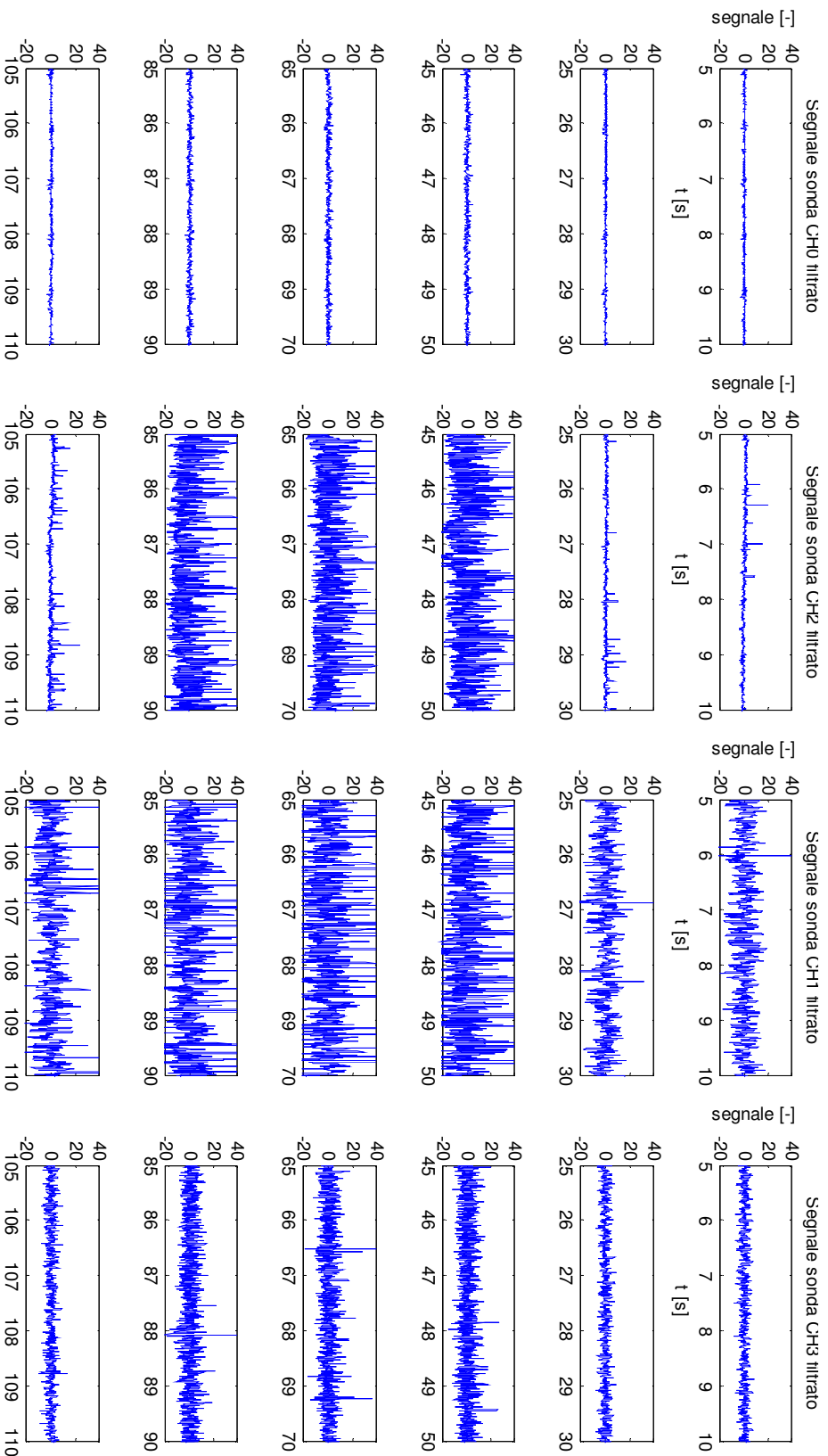
concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 09.57 giorno 13/04/11

condizioni operative:

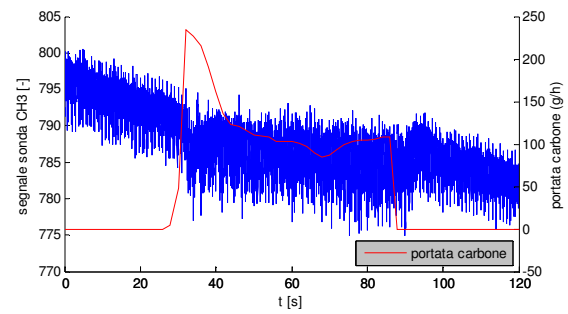
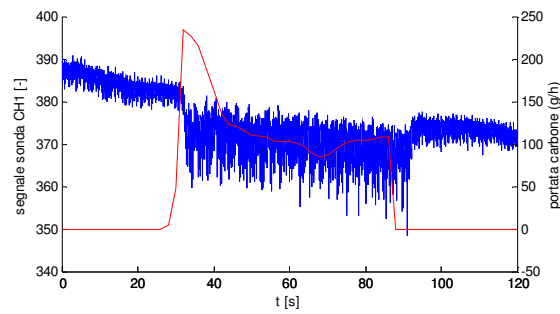
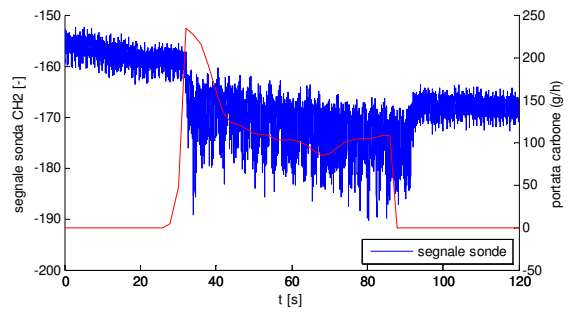
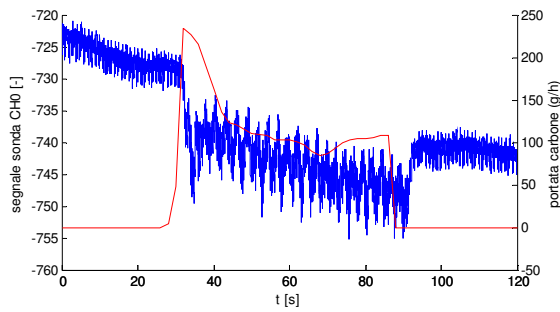
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

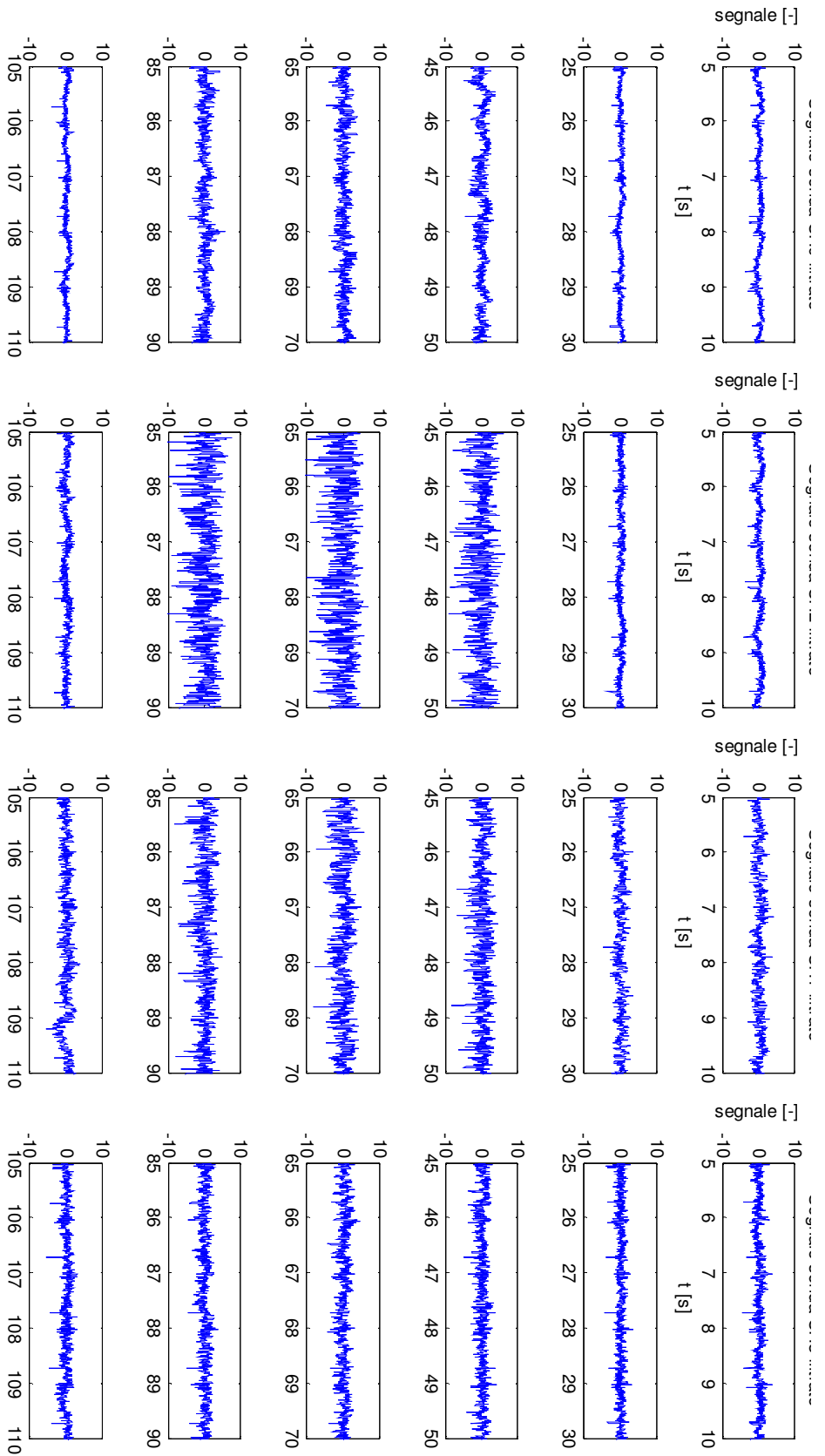
concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 10.27 giorno 13/04/11

condizioni operative:

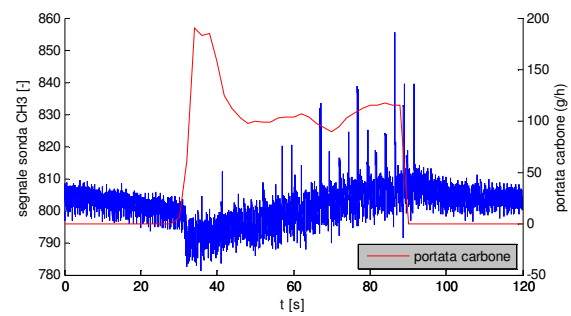
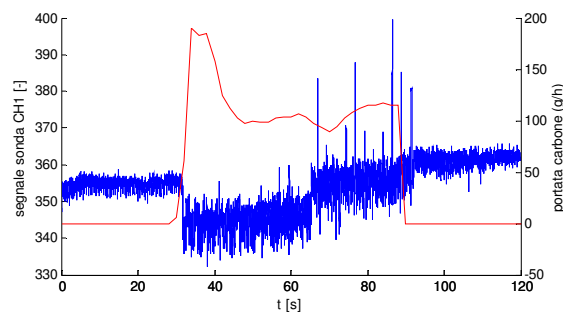
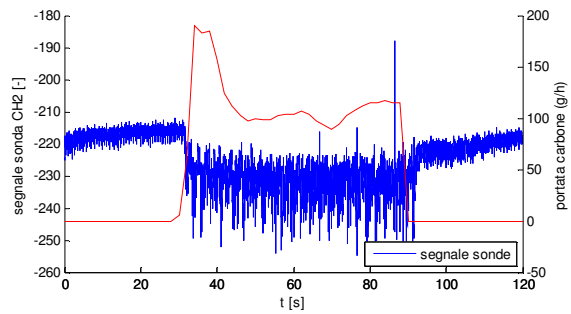
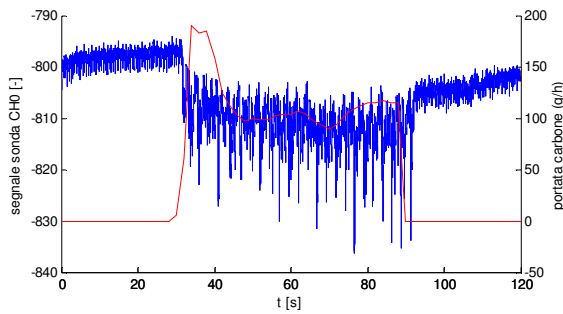
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

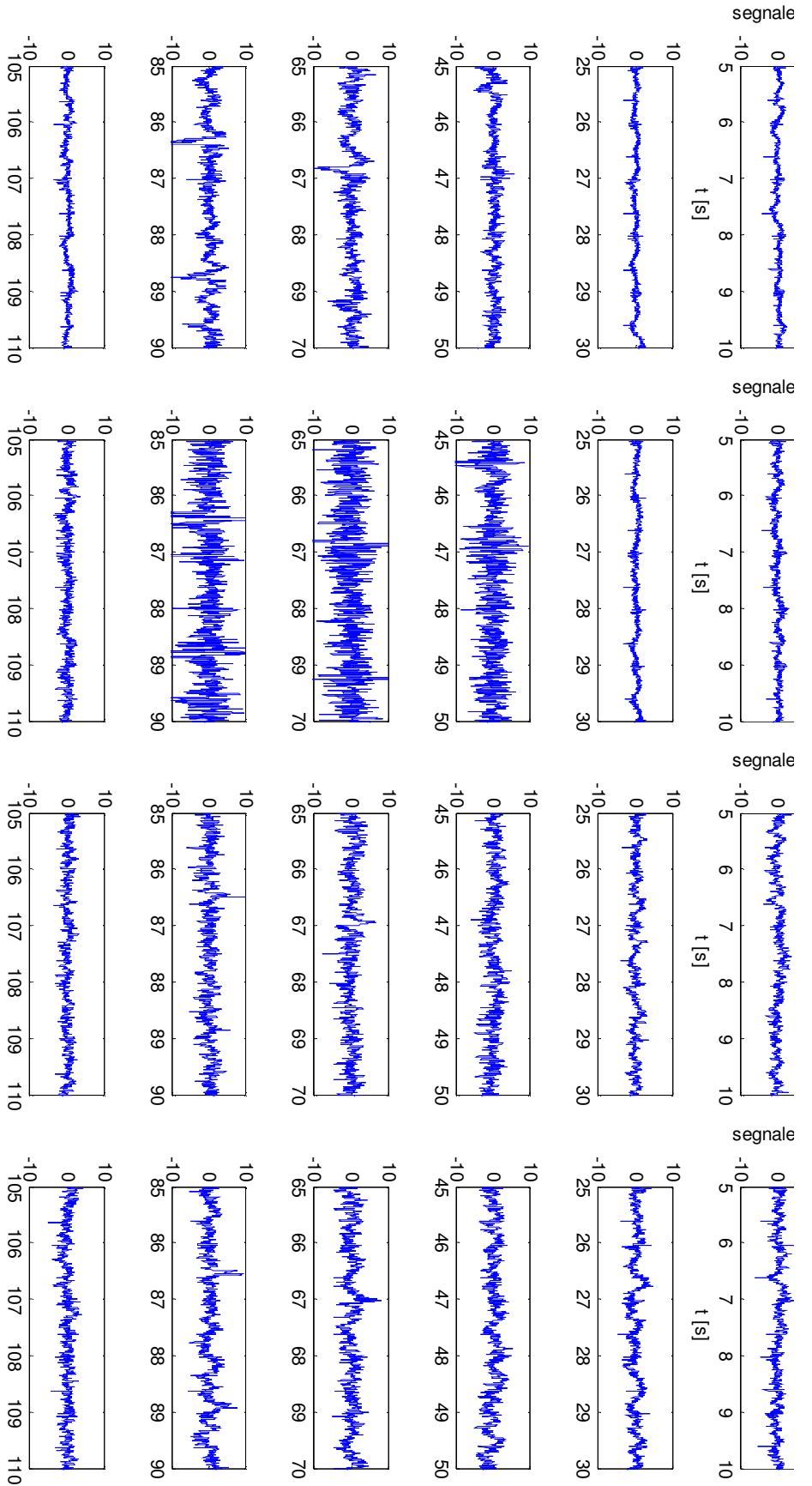
concentrazione di O_2 nei fumi 3.3%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 10.38 giorno 13/04/11

condizioni operative:

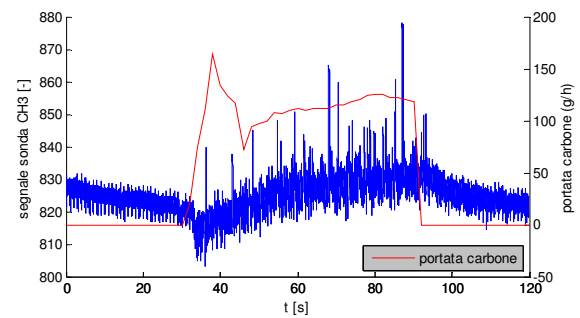
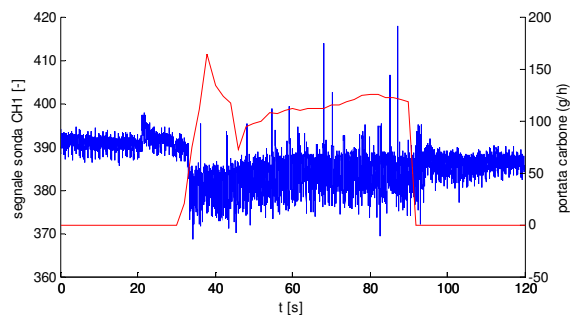
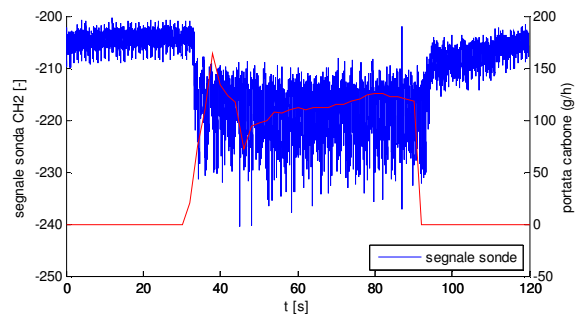
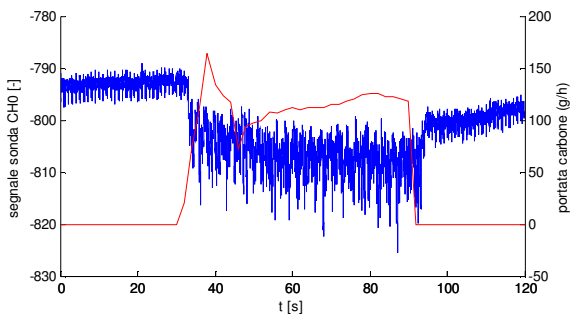
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

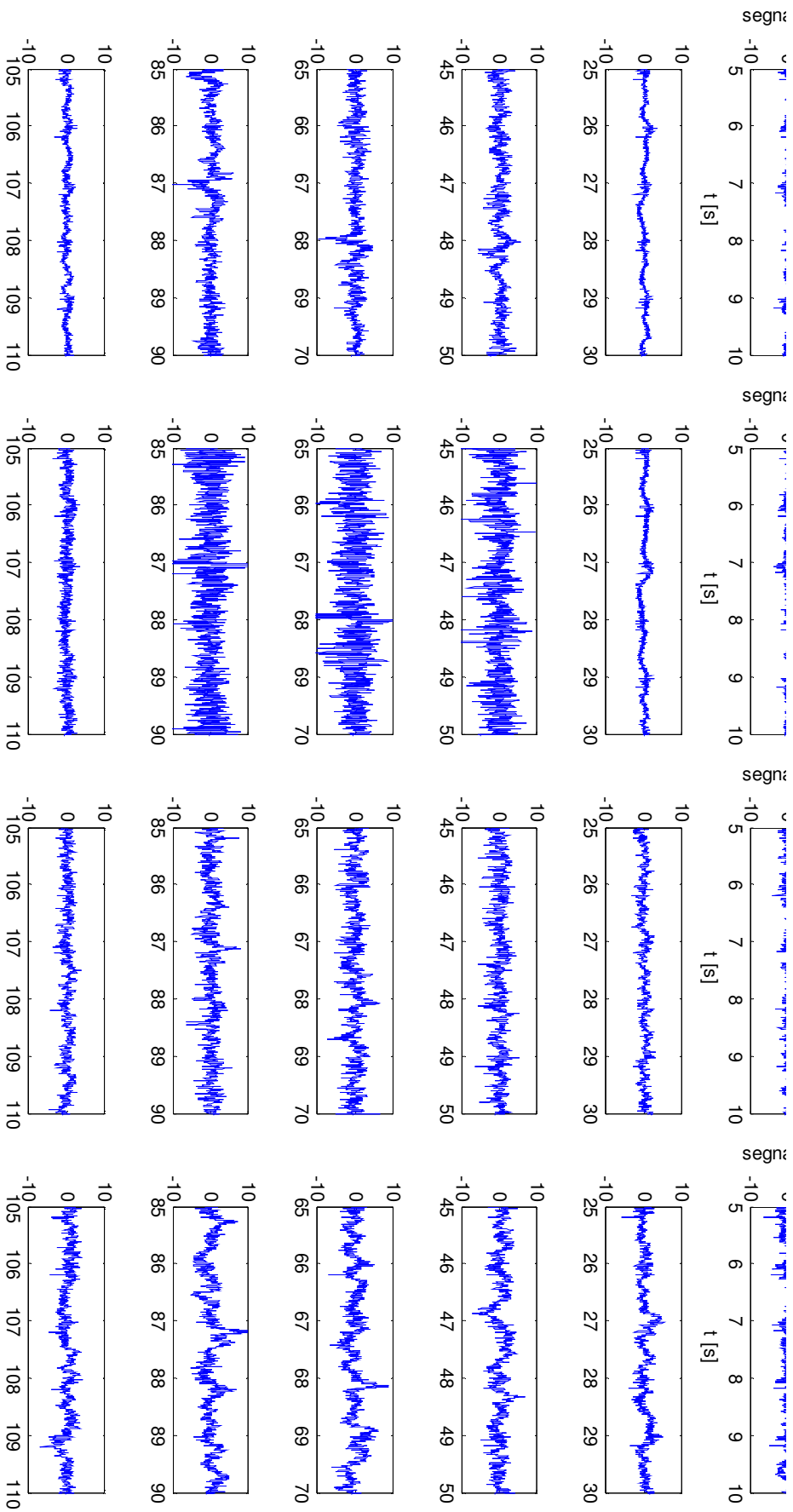
concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 14.24 giorno 14/04/11

condizioni operative:

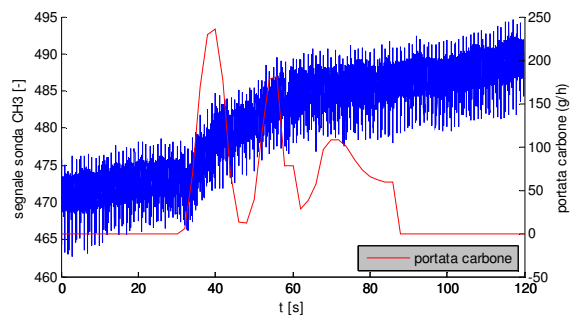
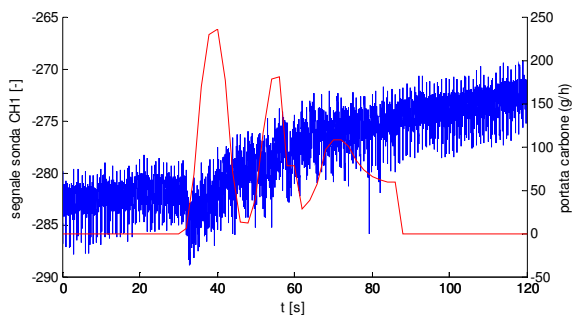
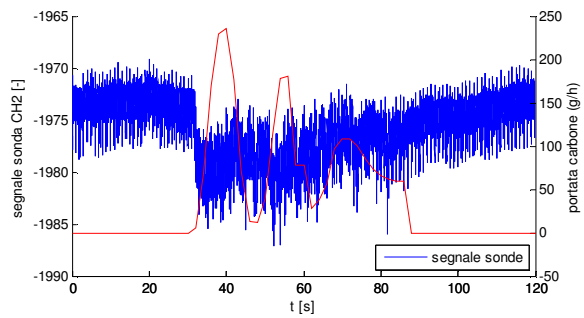
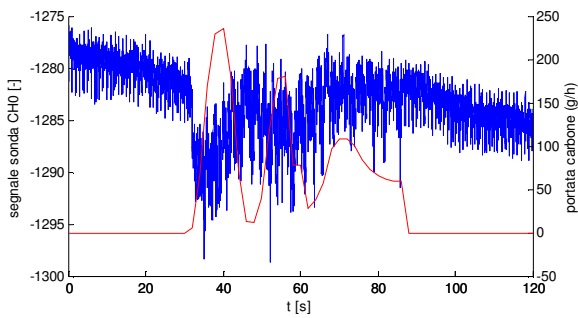
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

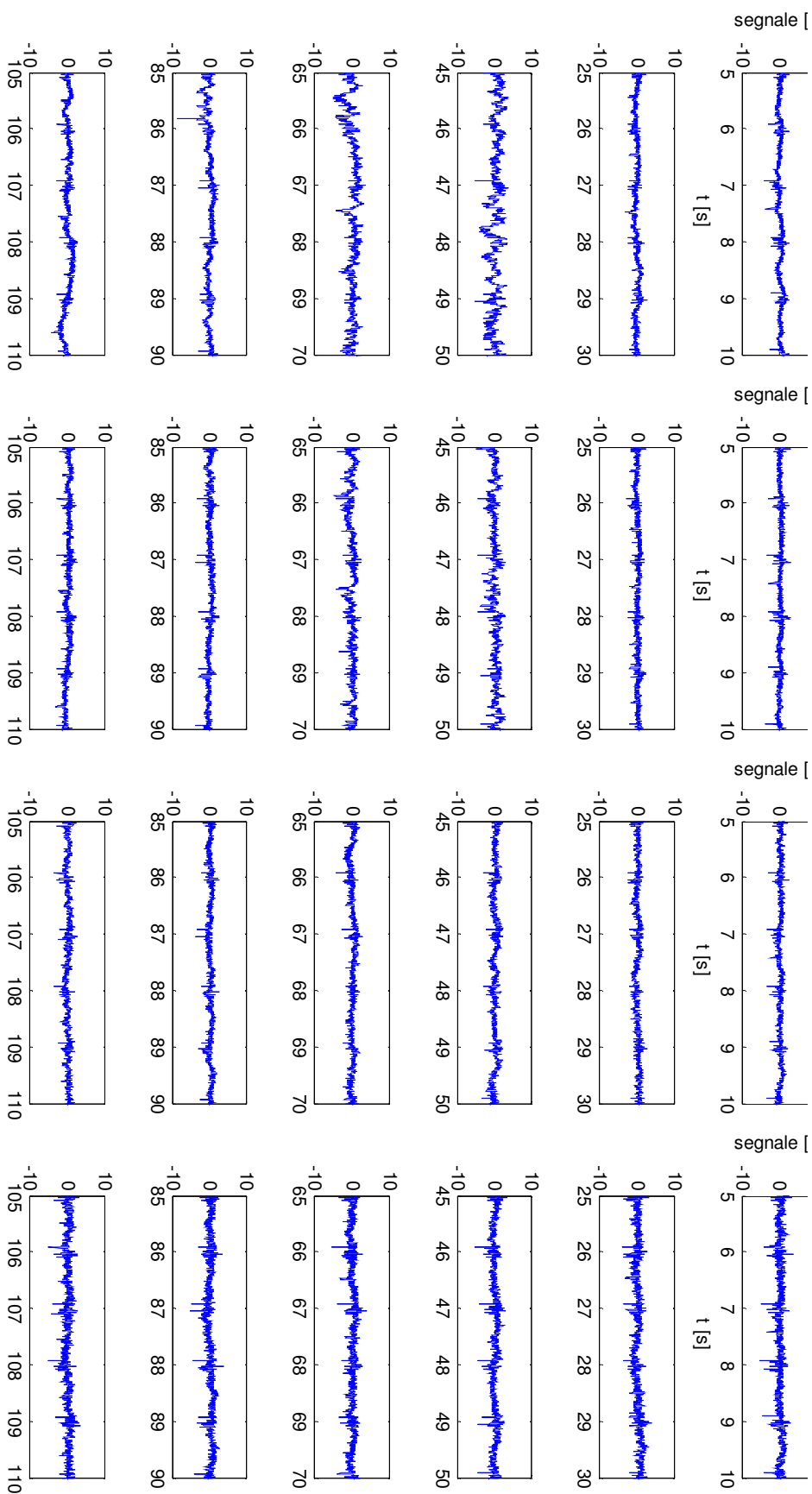
concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





2.1.3. Prove pulsate

Si riportano per ogni prova le condizioni operative, il dettaglio del segnale registrato dalle sonde per una dose di combustibile e una visione più ampia su 3 dosi per evidenziare come si ripetano sempre gli stessi andamenti nel tempo.

- ore 15.50 giorno 12/04/11

condizioni operative:

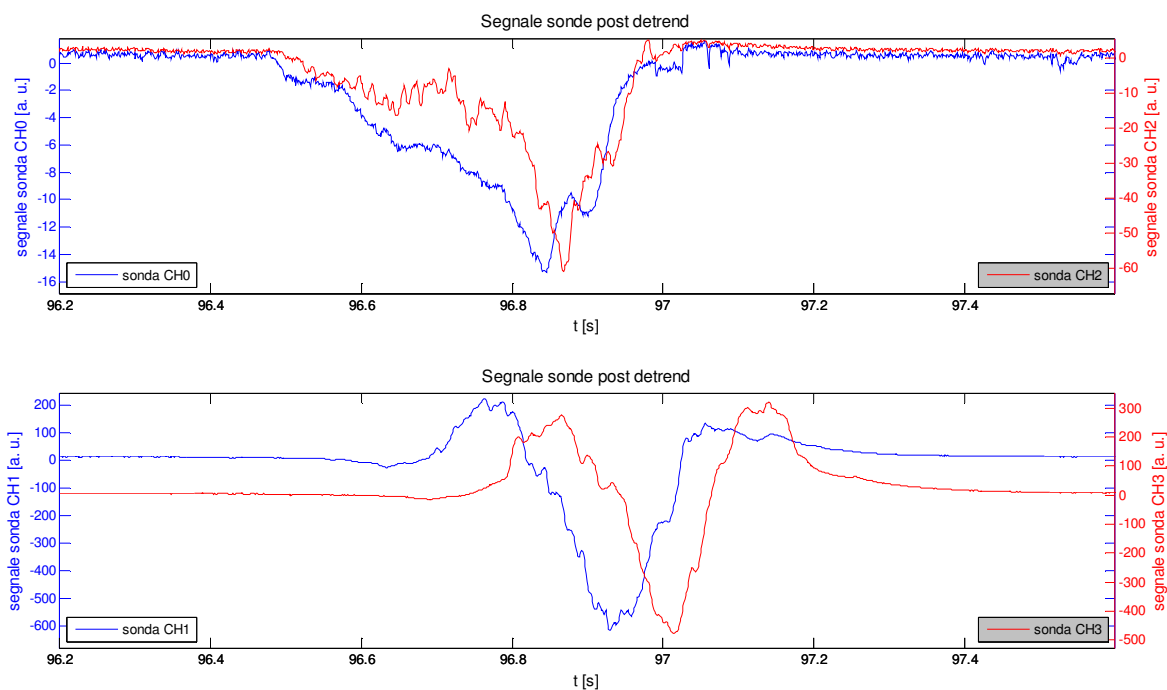
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 16.01 giorno 12/04/11

condizioni operative:

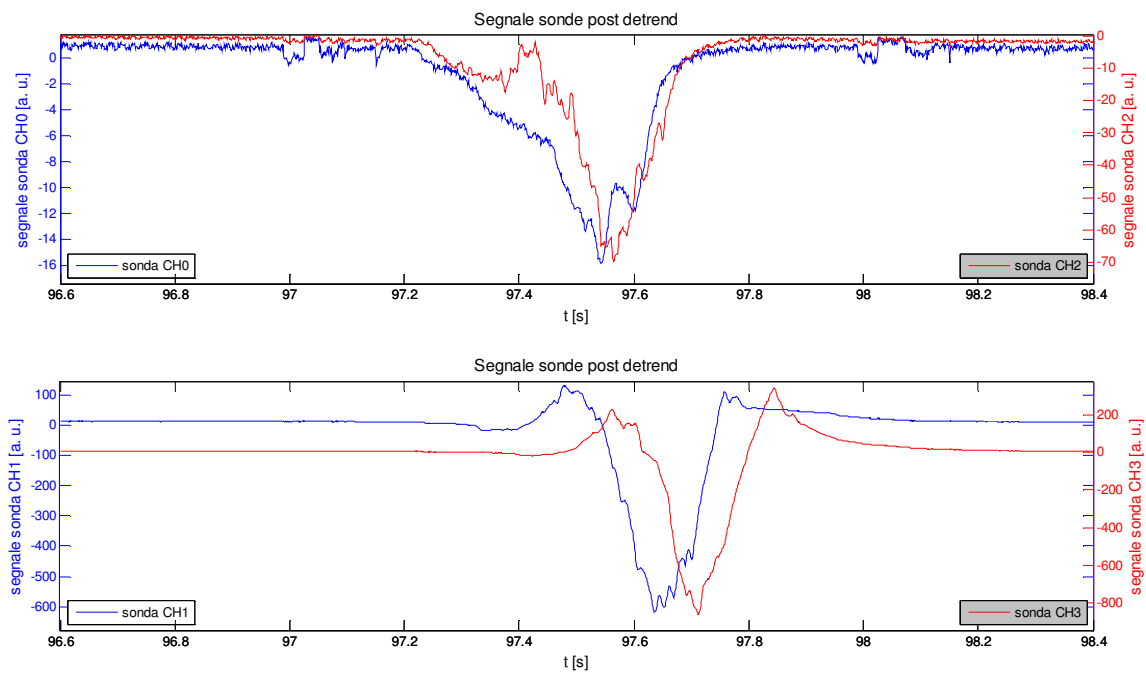
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.6%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 16.39 giorno 12/04/11

condizioni operative:

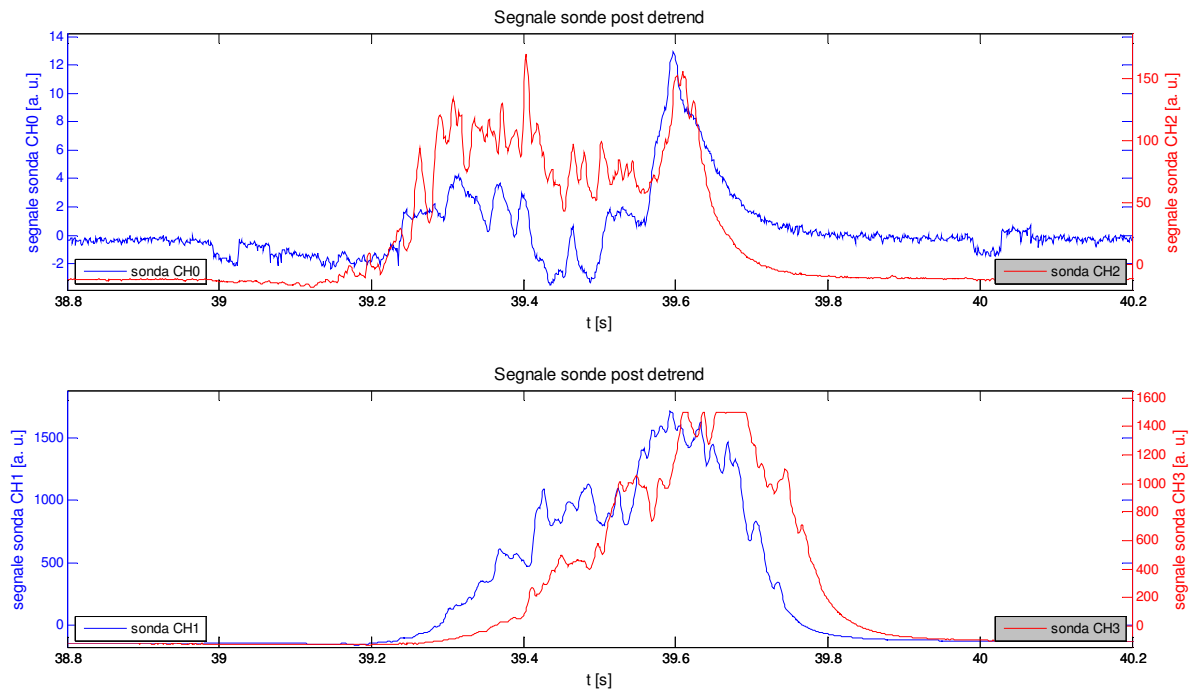
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 3.3%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 17.35 giorno 12/04/11

condizioni operative:

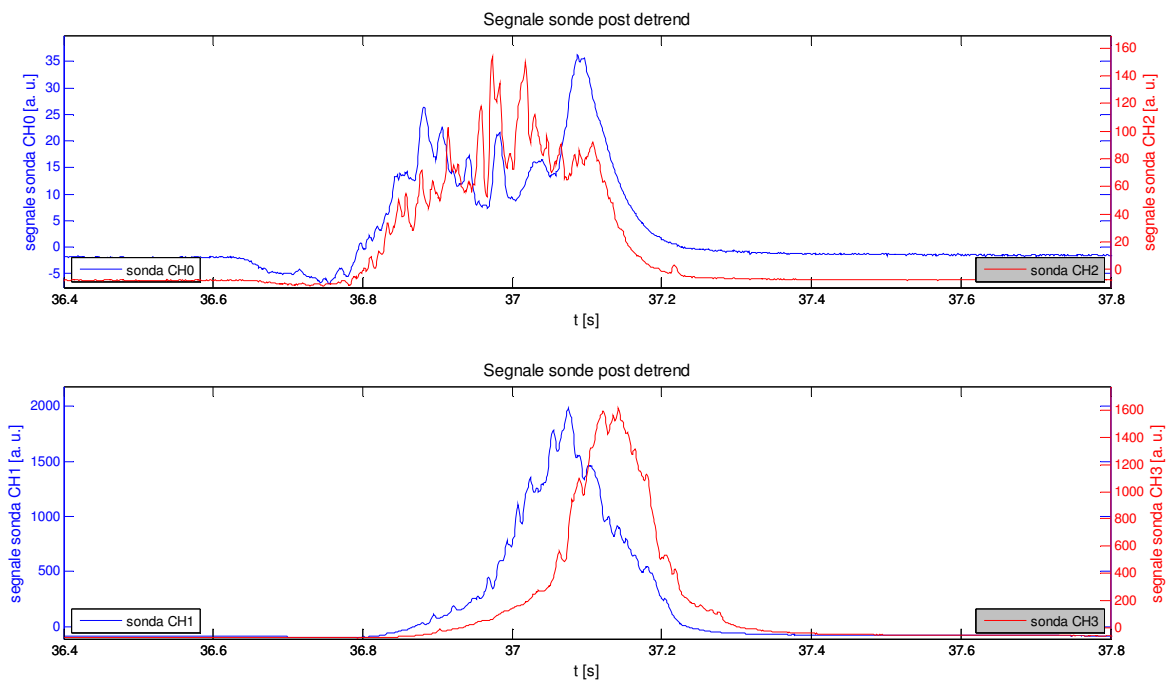
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.6%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.05 giorno 13/04/11

condizioni operative:

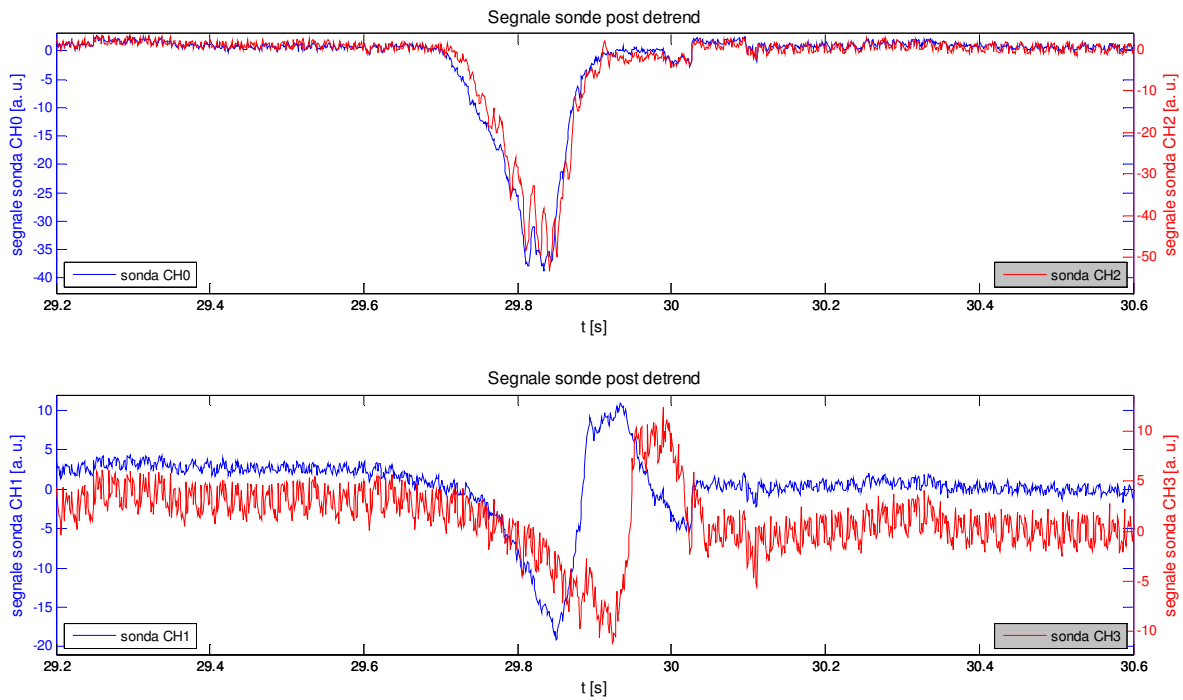
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.09 giorno 13/04/11

condizioni operative:

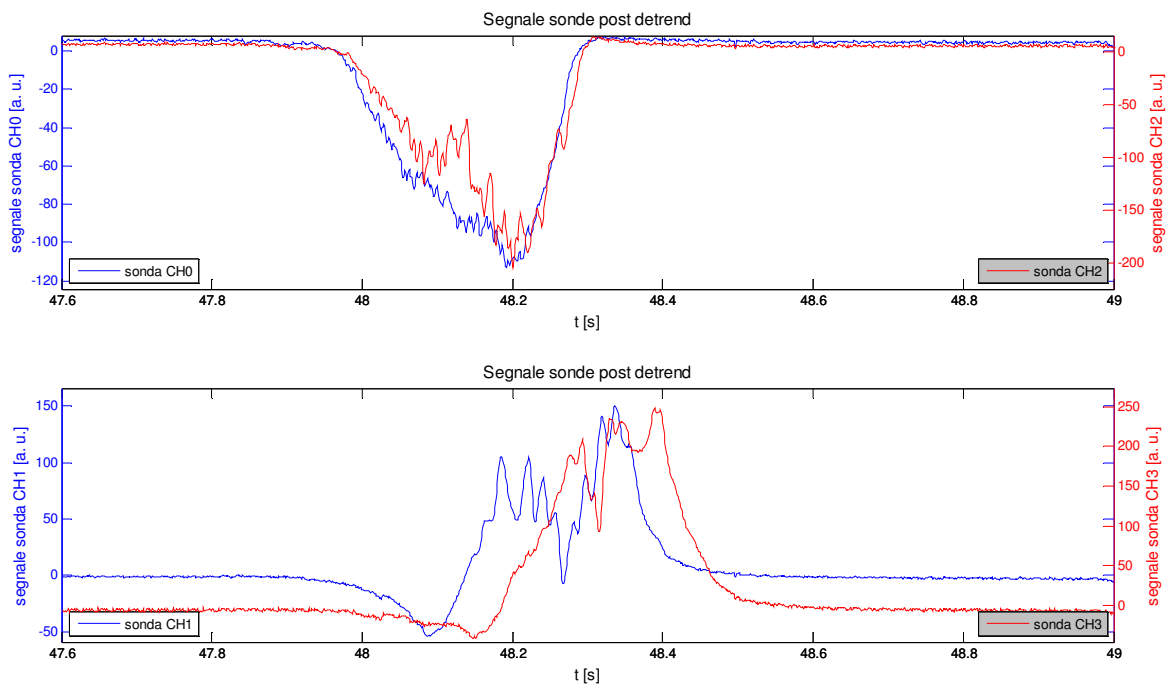
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.19 giorno 13/04/11

condizioni operative:

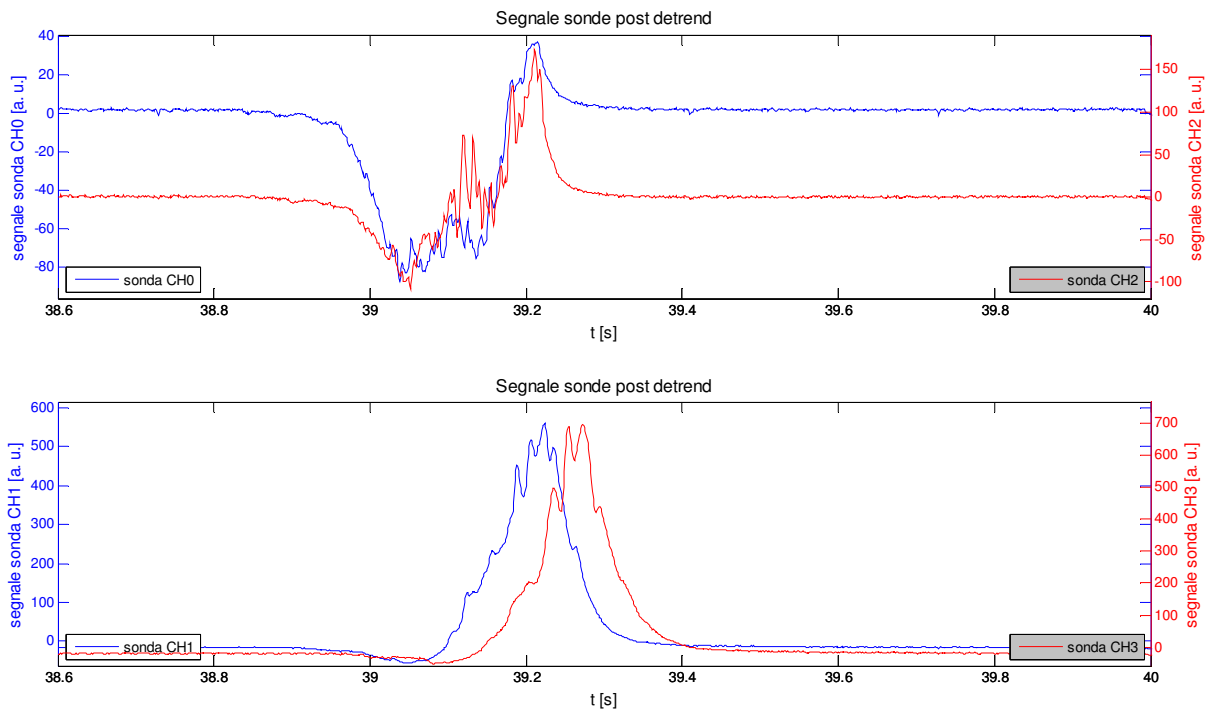
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.3%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.45 giorno 13/04/11

condizioni operative:

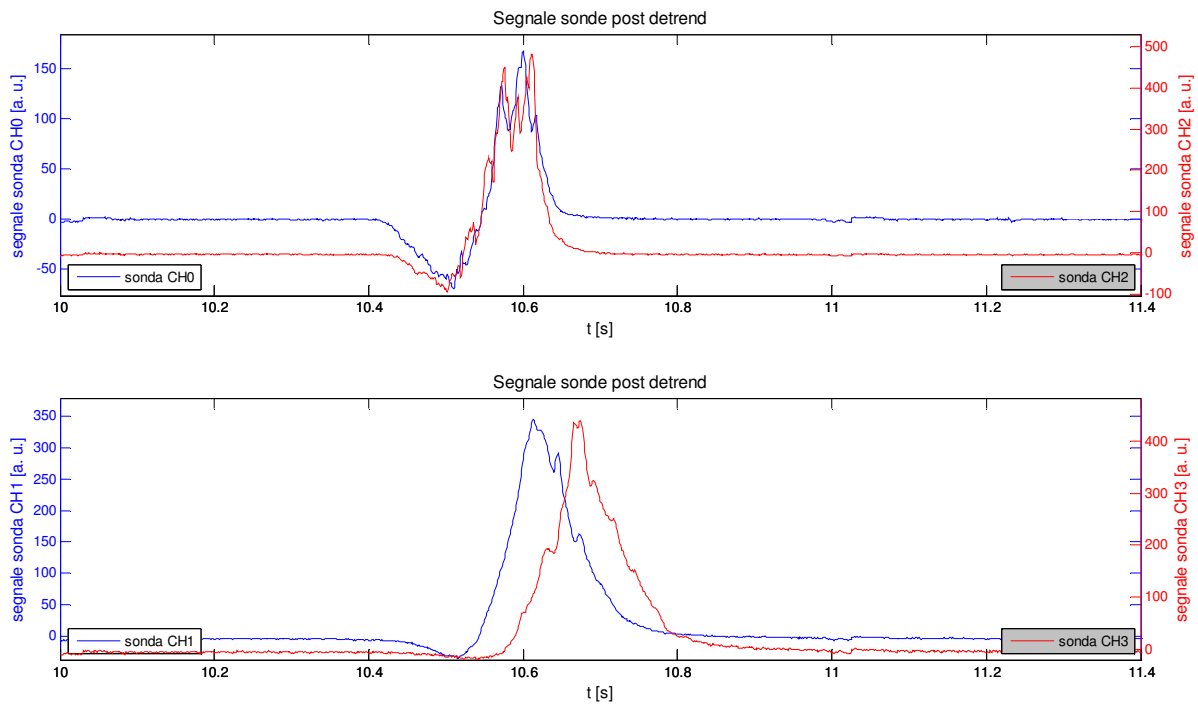
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.55 giorno 13/04/11

condizioni operative:

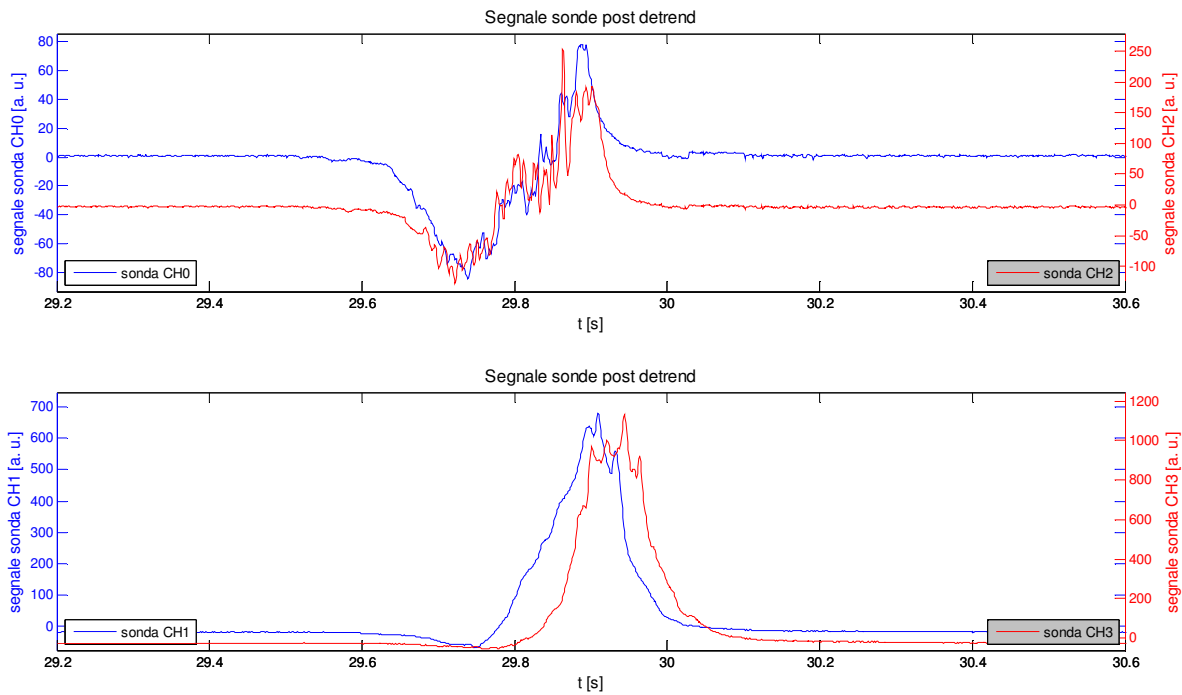
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.25%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 14.29 giorno 14/04/11

condizioni operative:

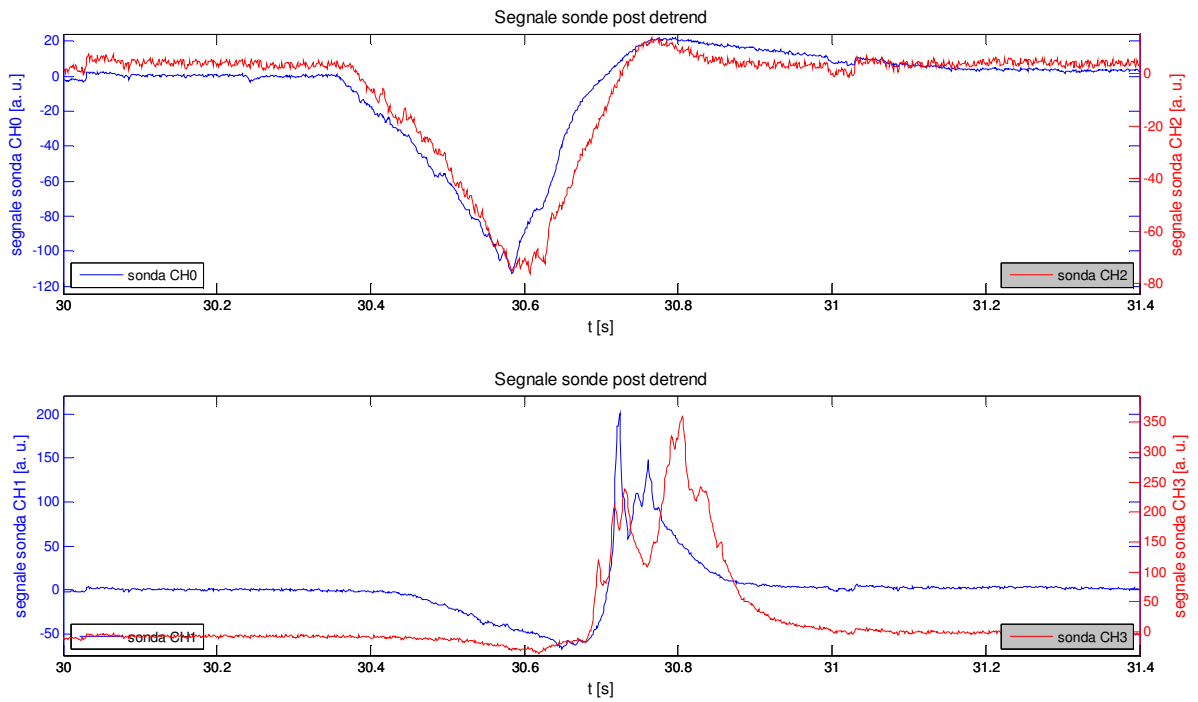
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 16.08 giorno 14/04/11

condizioni operative:

combustione volumetrica nel precombustore

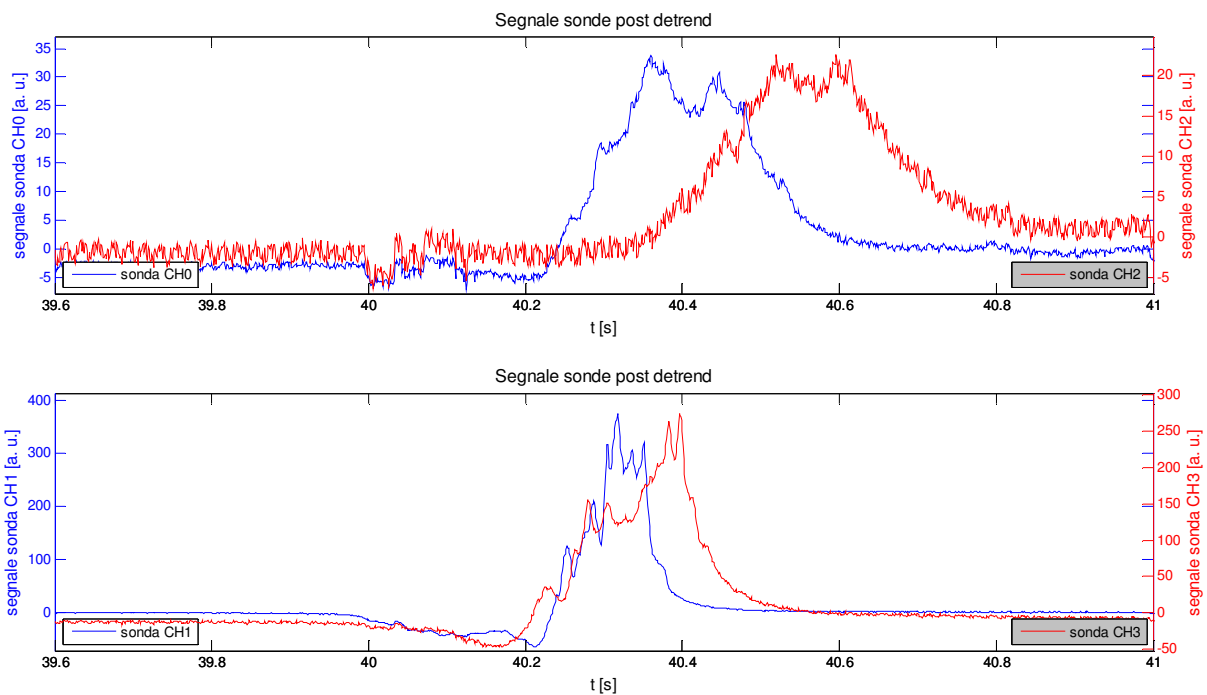
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 10, CH2 porta 12, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 16.14 giorno 14/04/11

condizioni operative:

combustione volumetrica nel precombustore e riduzione del gas di trasporto

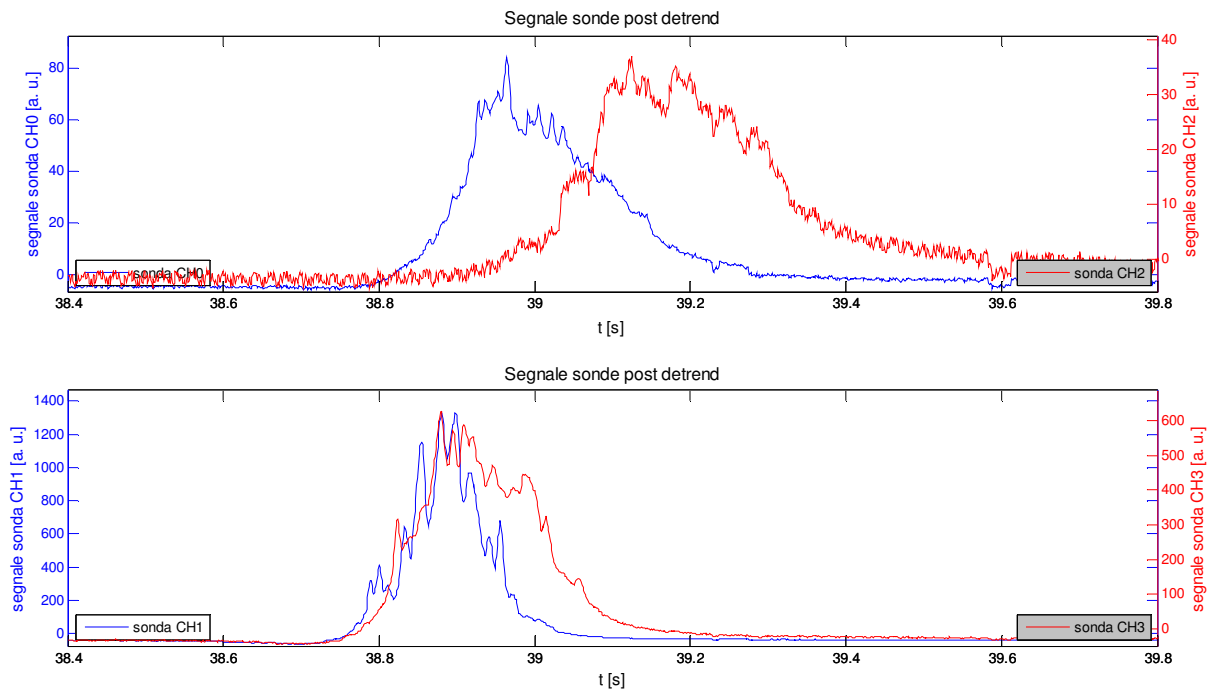
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 10, CH2 porta 12, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 16.42 giorno 14/04/11

condizioni operative:

combustione volumetrica nel precombustore

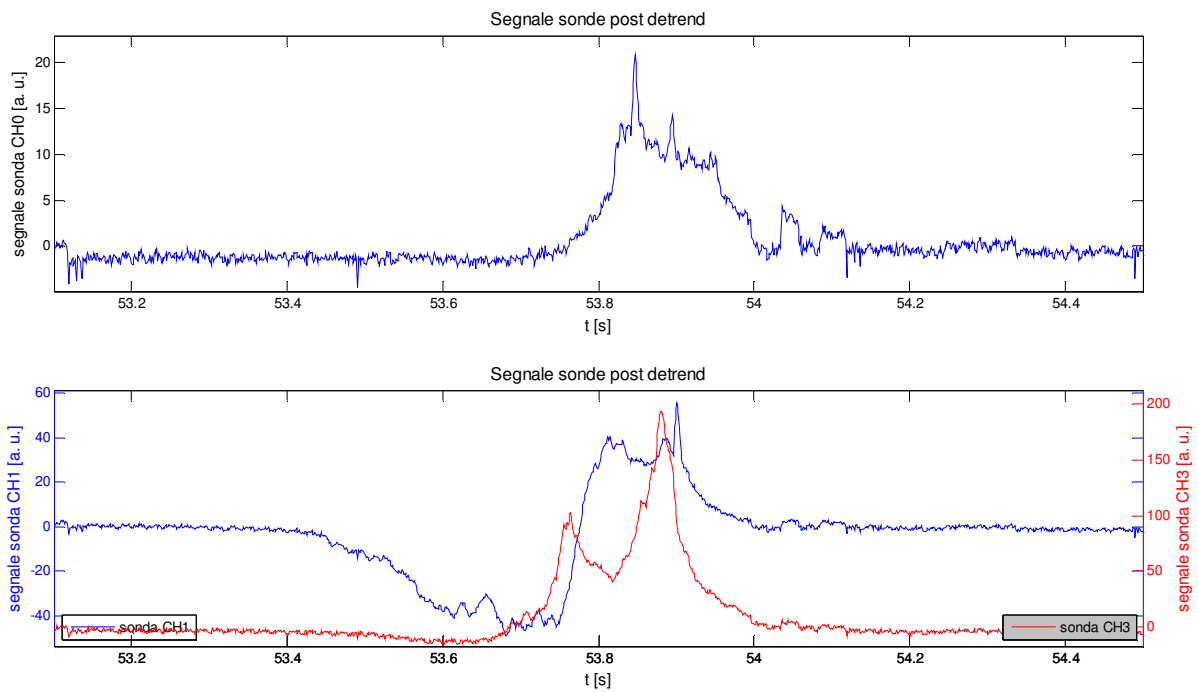
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

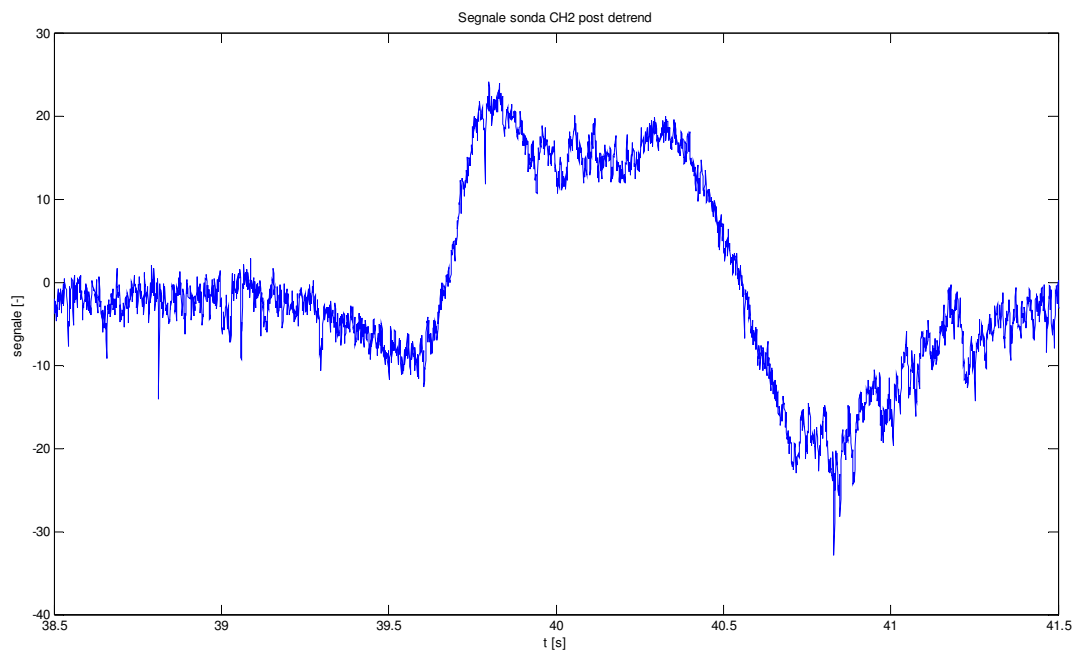
concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 10, CH2 sul fondo del reattore, CH1 porta 8, CH3 porta 9





2.1.4. Prove in transitorio ad alimentazione pulsata

Si riportano in questo caso i segnali originali registrati, non si riportano invece i dettagli sui singoli passaggi di combustibile visto che sono del tutto identici ai corrispondenti ad alimentazione pulsata.

- ore 16.15 giorno 12/04/11

condizioni operative:

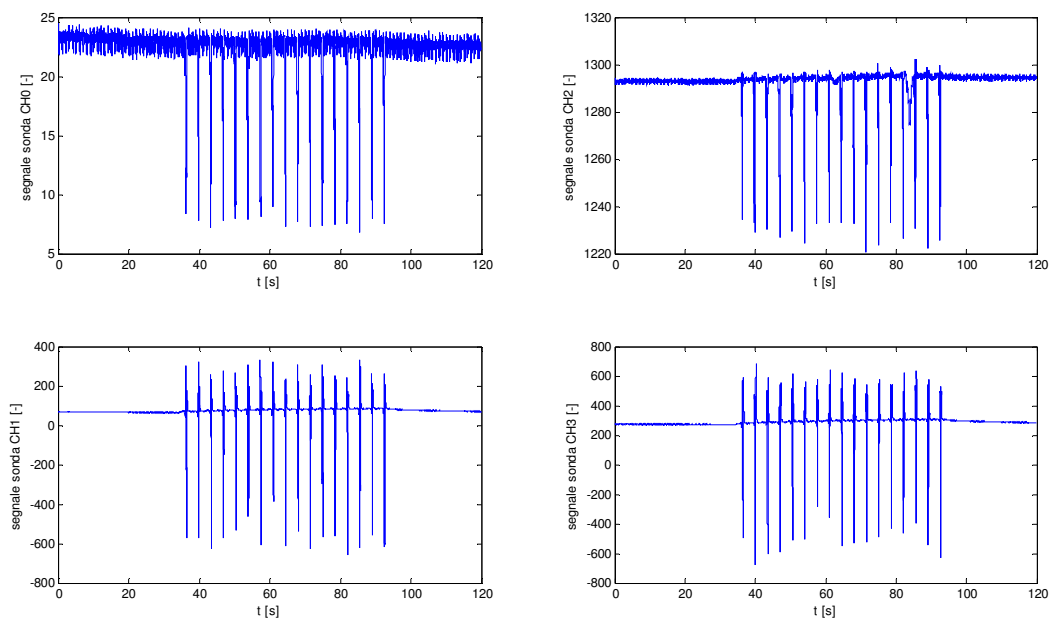
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

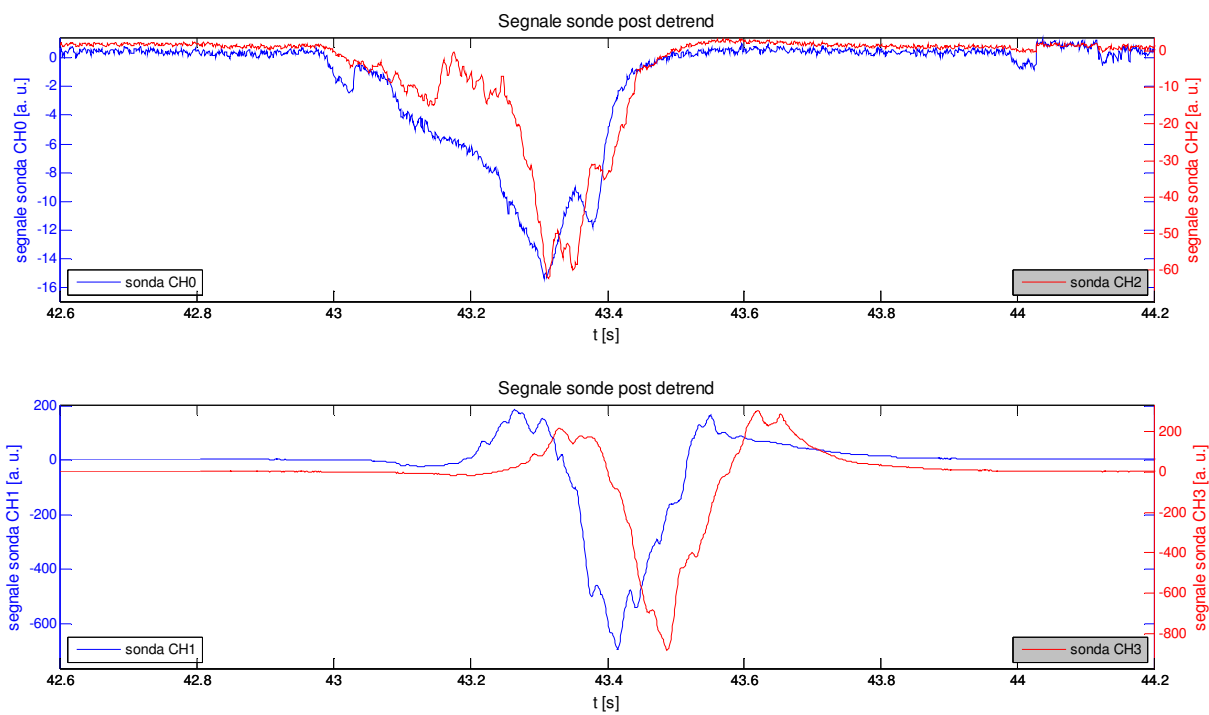
concentrazione di O_2 nei fumi 0.6%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 16.36 giorno 12/04/11

condizioni operative:

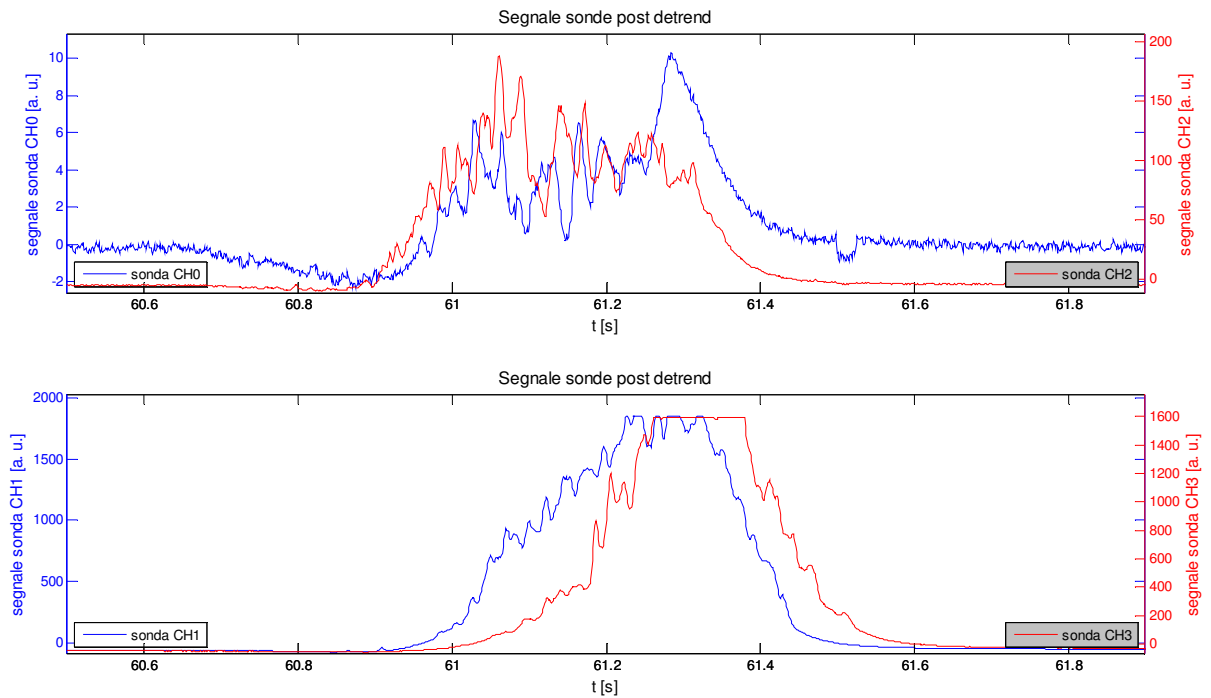
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 3.3%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 17.37 giorno 12/04/11

condizioni operative:

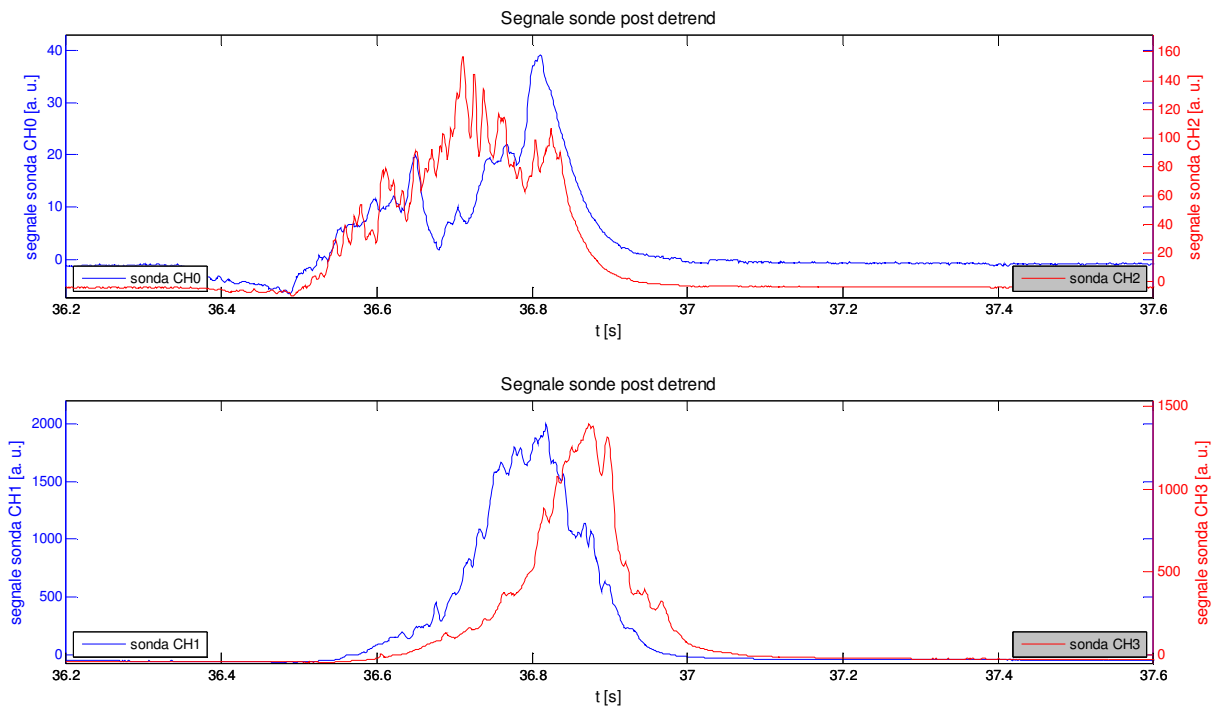
carbone S. A. tal quale granulometria > 125 μm

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.11 giorno 13/04/11

condizioni operative:

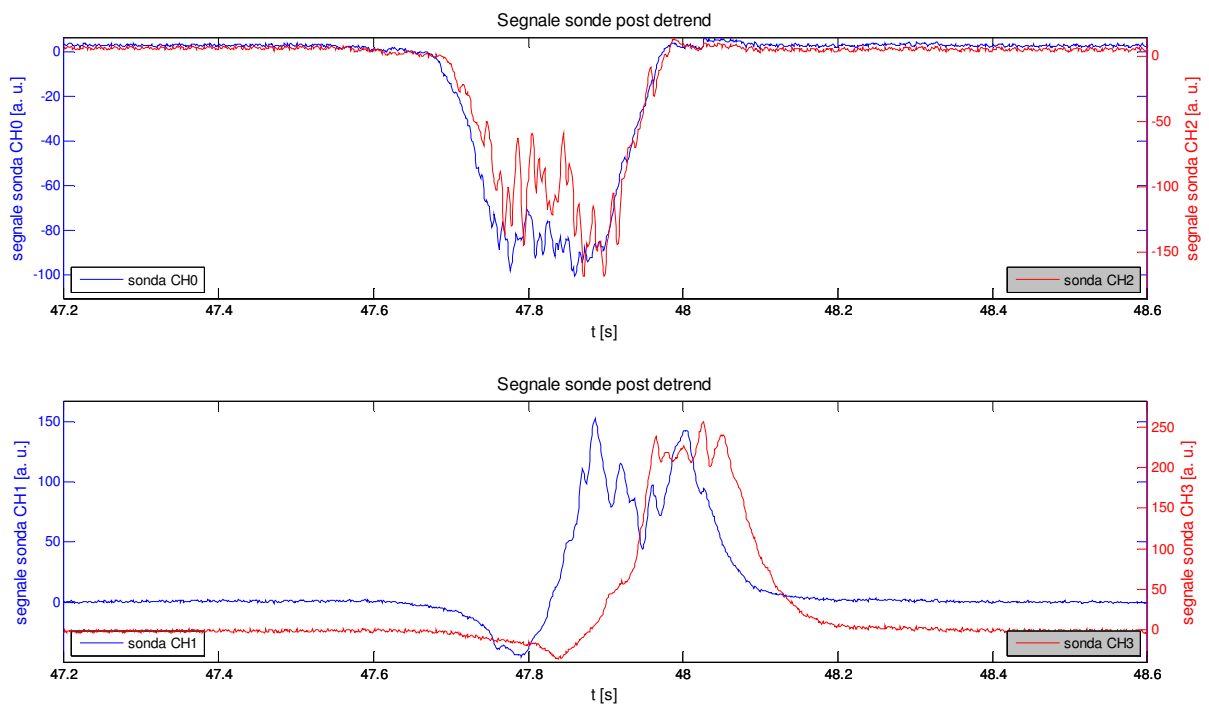
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.20 giorno 13/04/11

condizioni operative:

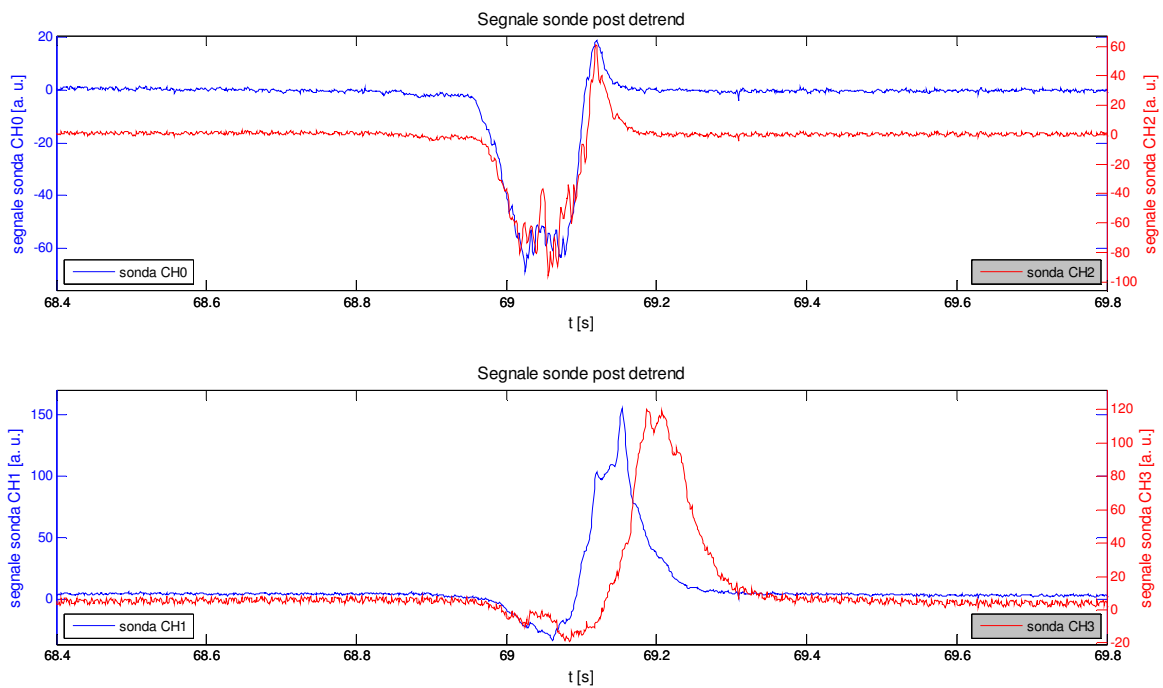
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.3%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 10.47 giorno 13/04/11

condizioni operative:

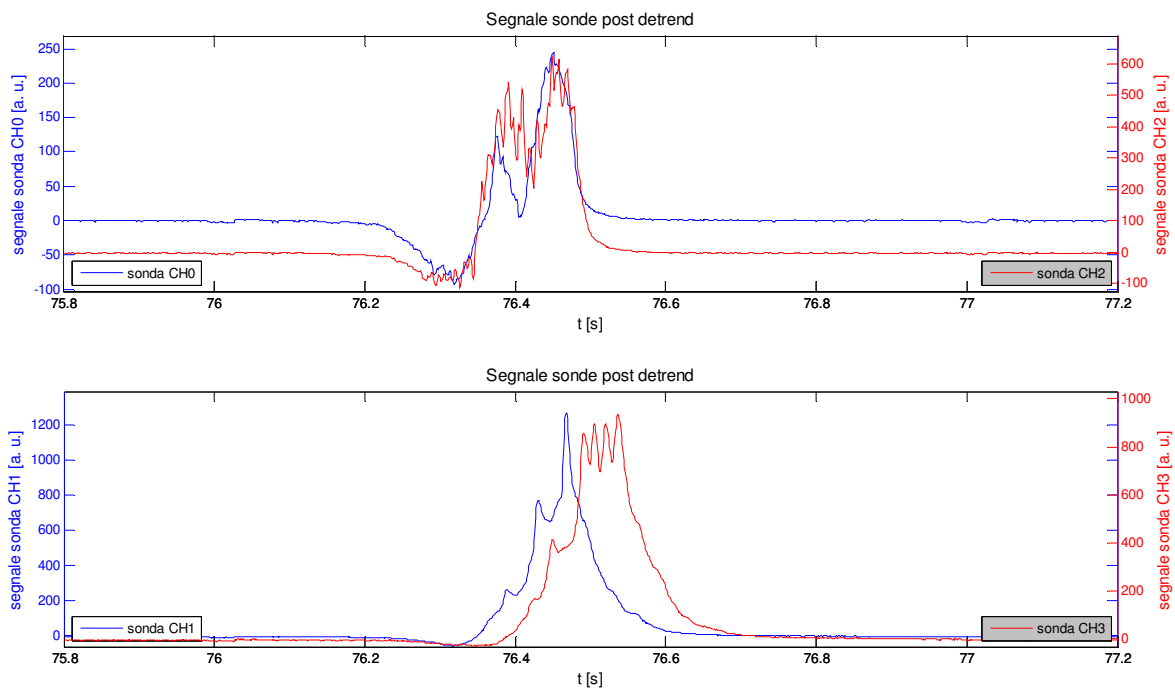
carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 14.34 giorno 14/04/11

condizioni operative:

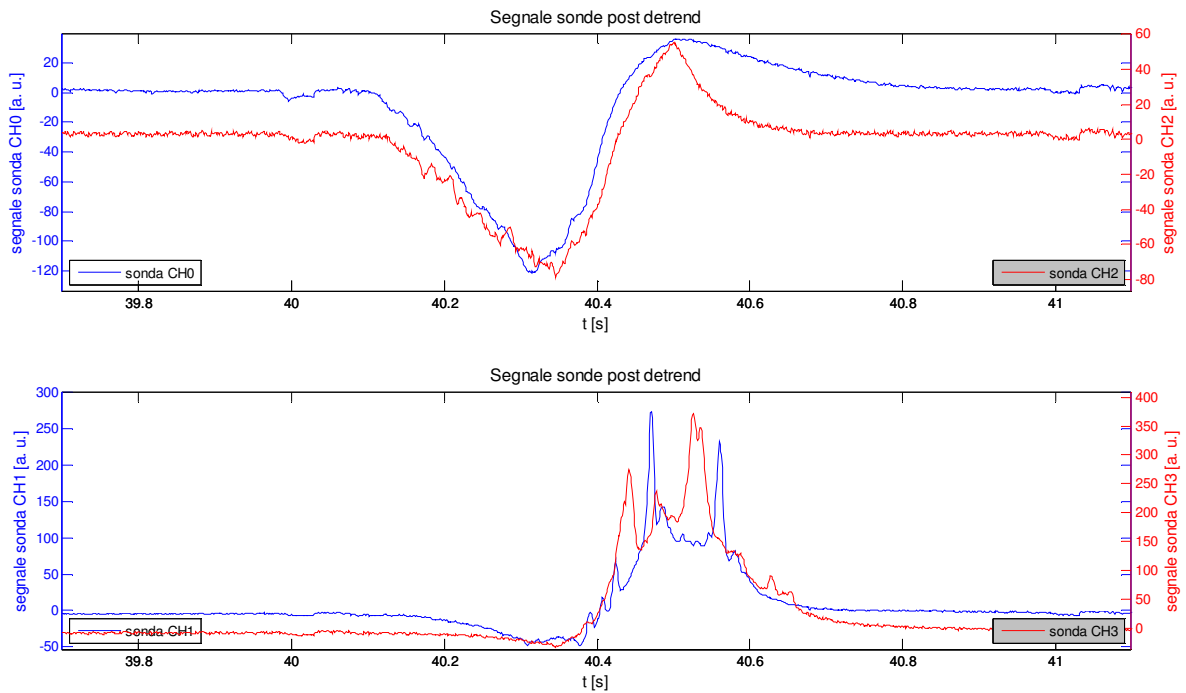
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 14.42 giorno 14/04/11

condizioni operative:

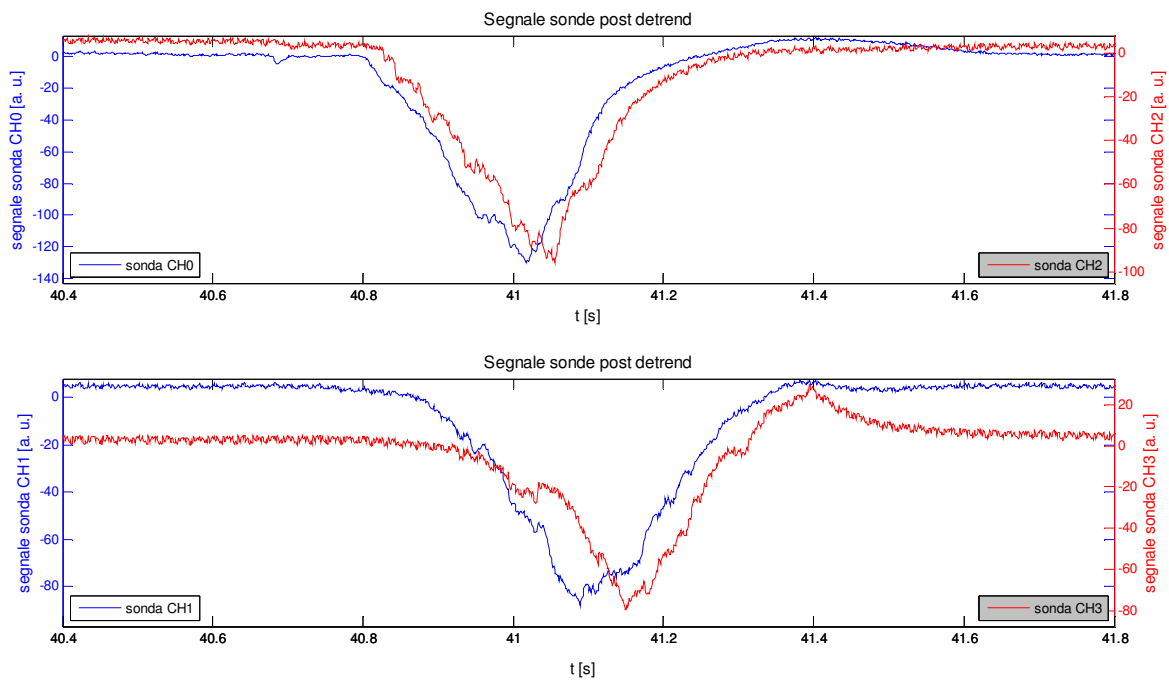
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 15.17 giorno 14/04/11

condizioni operative:

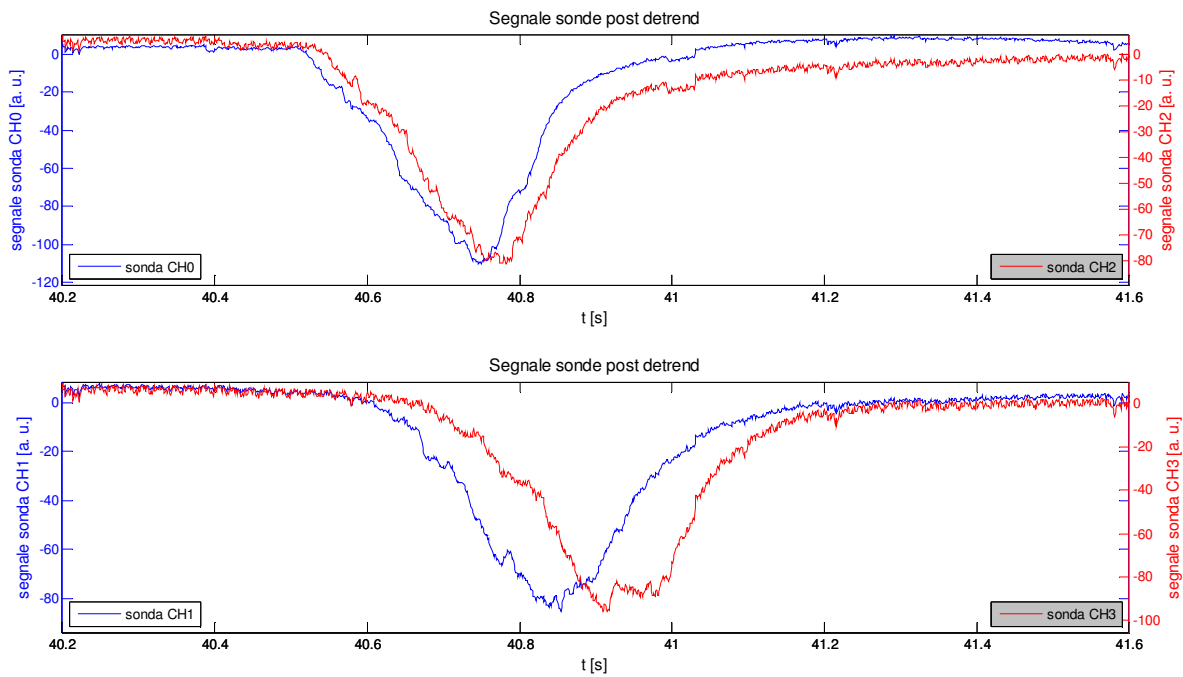
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 15.41 giorno 14/04/11

condizioni operative:

transitorio da combustione volumetrica a oxycombustione

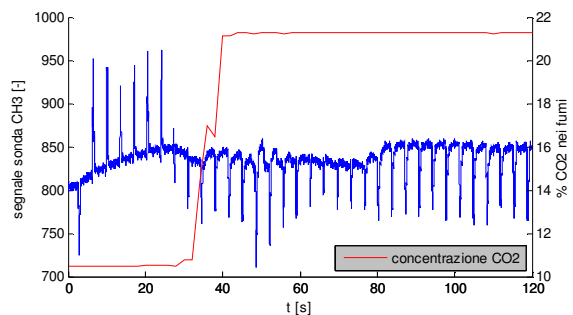
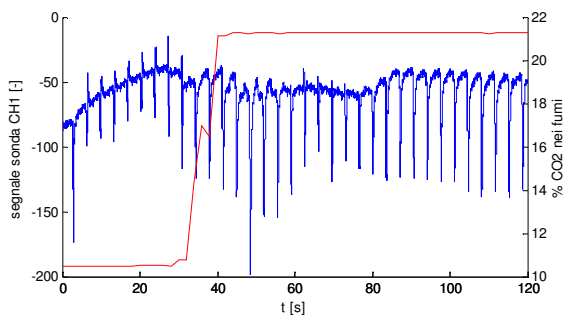
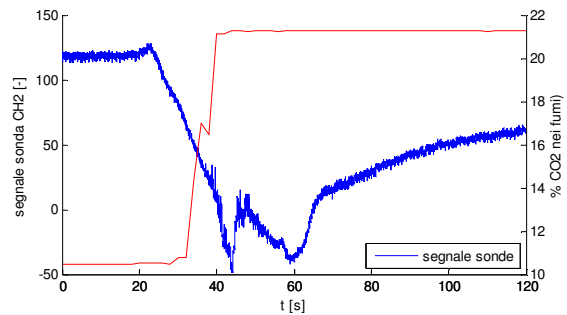
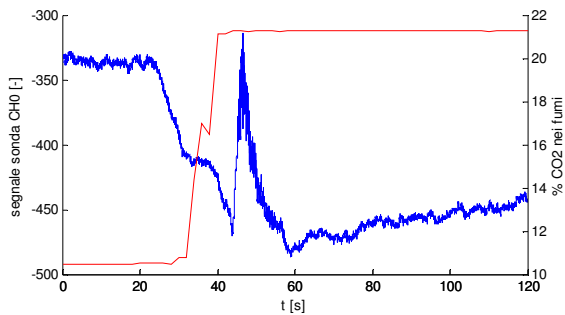
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 in camera di precombustione in posizione assiale, CH2 in camera di precombustione in posizione radiale, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 15.44 giorno 14/04/11

condizioni operative:

transitorio da oxycombustione a combustione volumetrica

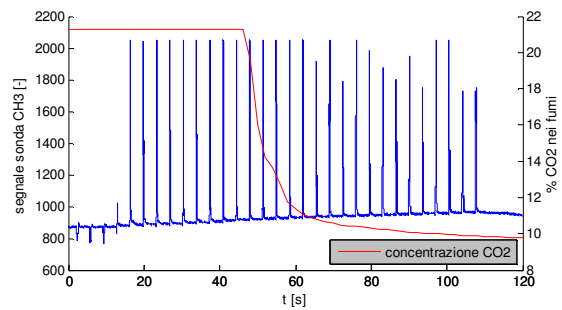
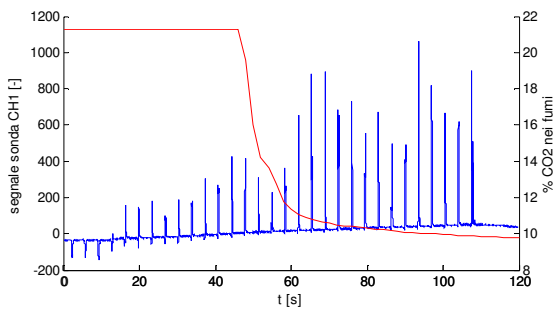
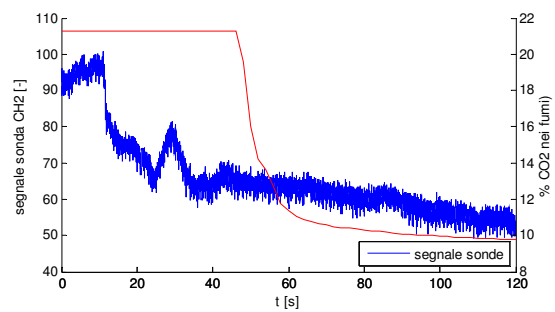
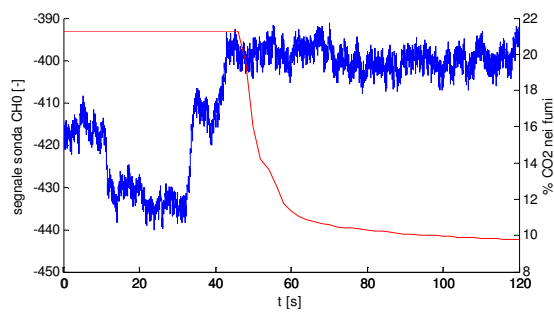
carbone S. A. tal quale granulometria $> 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 in camera di precombustione in posizione assiale, CH2 in camera di precombustione in posizione radiale, CH1 porta 8, CH3 porta 9



2.2. Char di carbone

2.2.1. *Prove continue*

Si riportano andamenti del segnale elaborato in intervalli di 5 secondi.

- ore 11.50 giorno 13/04/11

condizioni operative:

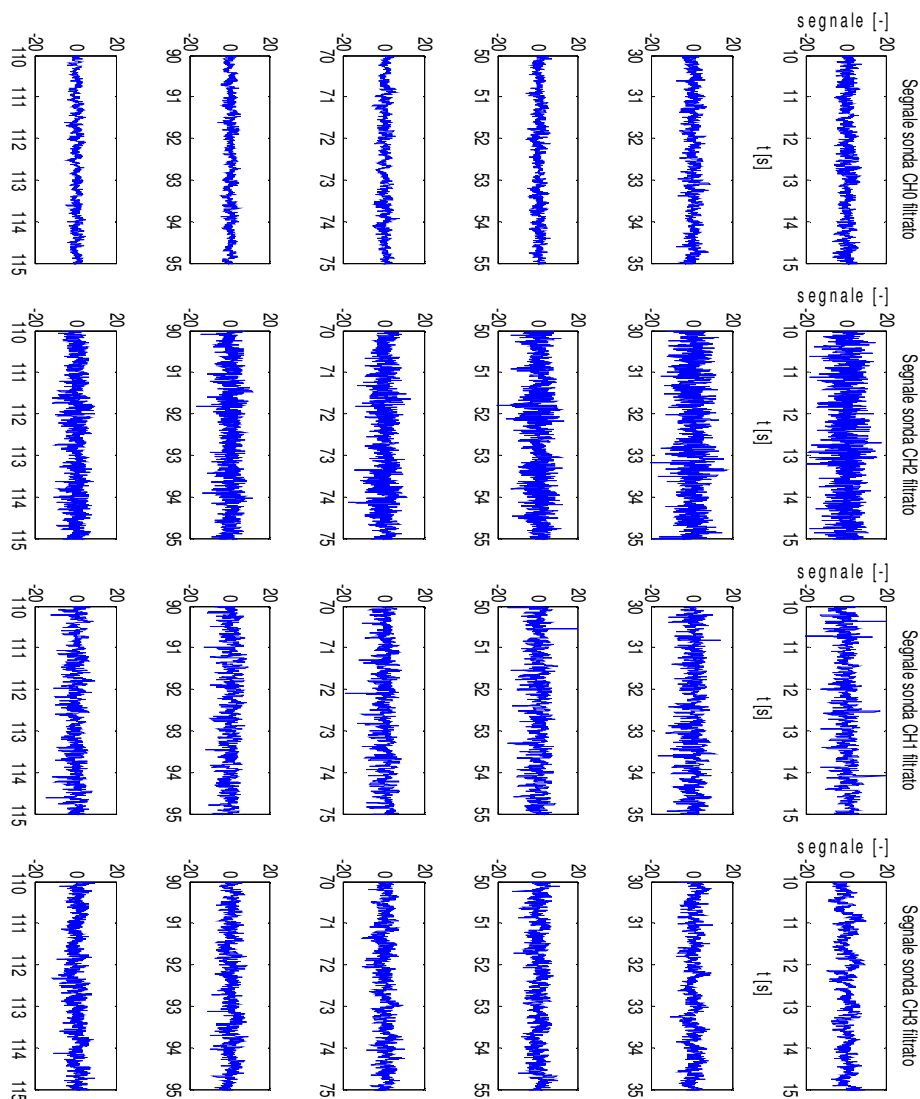
char di carbone S. A. granulometria $90 < x < 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.25%

temperatura 1100°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 12.00 giorno 13/04/11

condizioni operative:

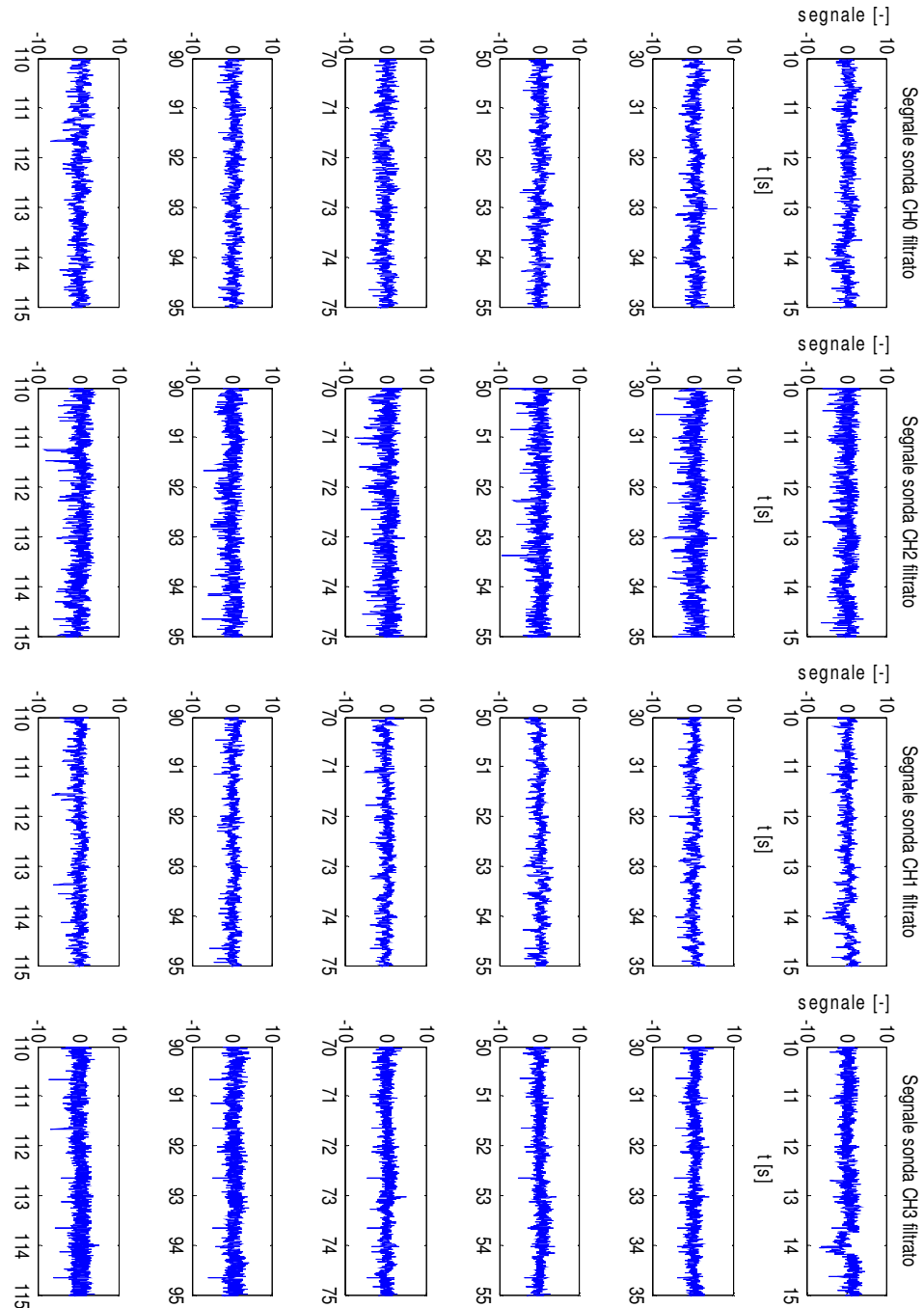
char di carbone S. A. granulometria $90 < x < 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.25%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 14.45 giorno 13/04/11

condizioni operative:

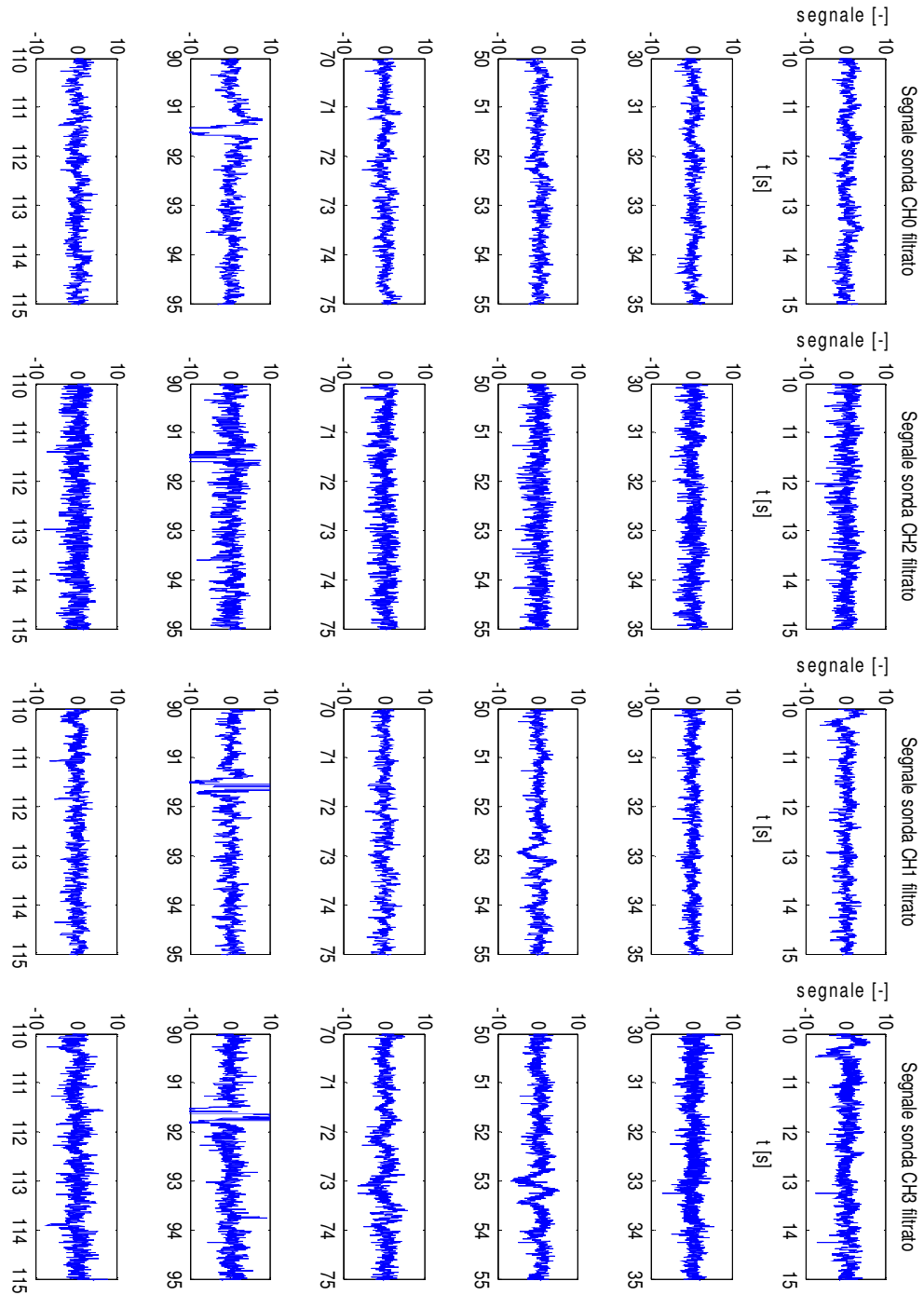
char di carbone S. A. granulometria $45 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.25%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 14.56 giorno 13/04/11

condizioni operative:

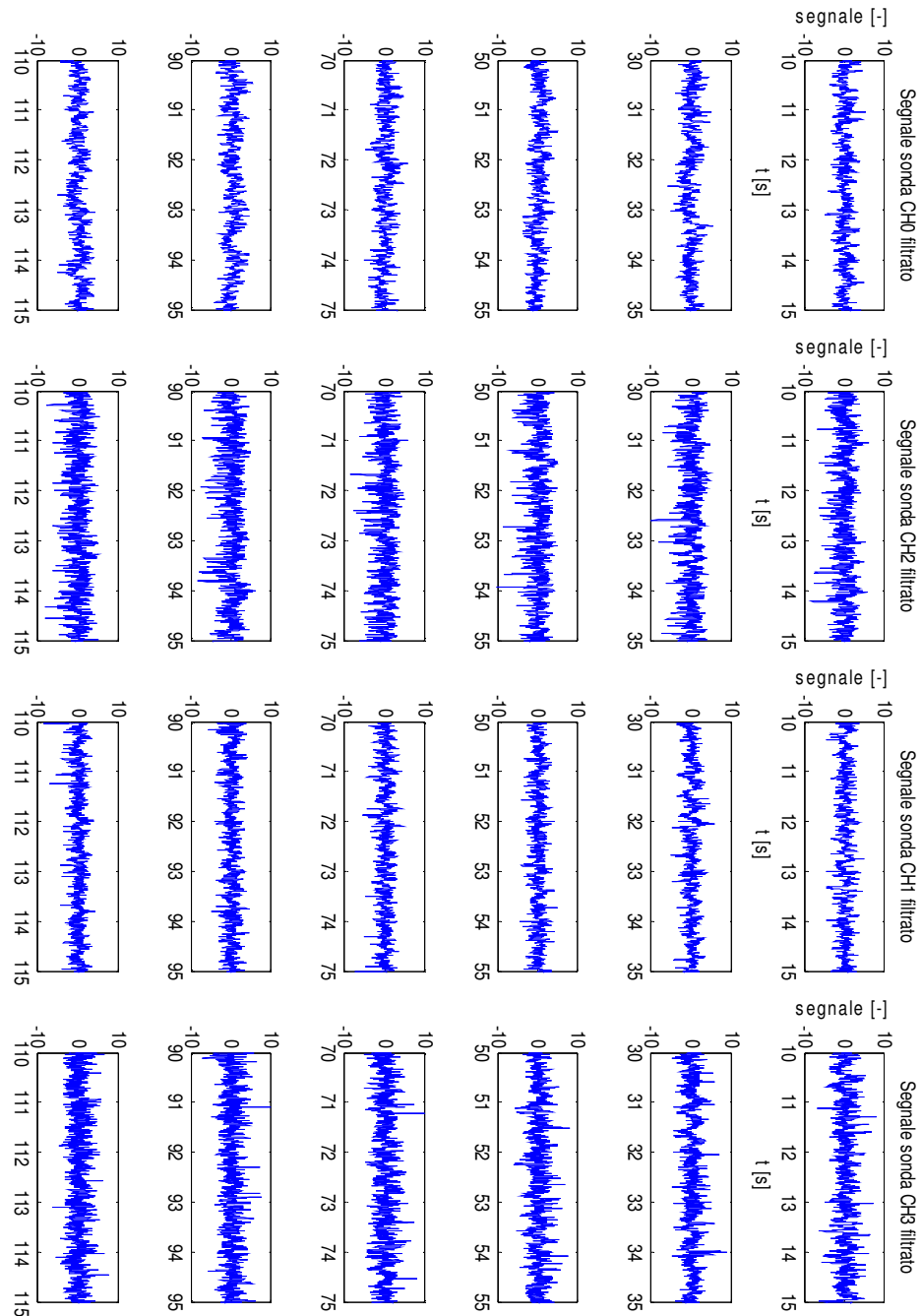
char di carbone S. A. granulometria $45 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.25%

temperatura 1100°C

trasporto azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



2.2.2. Prove in transitorio ad alimentazione continua

Una sola prova con questo tipo di alimentazione è stata effettuata, se ne riportano i valori del segnale registrato dalle sonde e gli andamenti a 5 secondi.

- ore 14.51 giorno 13/04/11

condizioni operative:

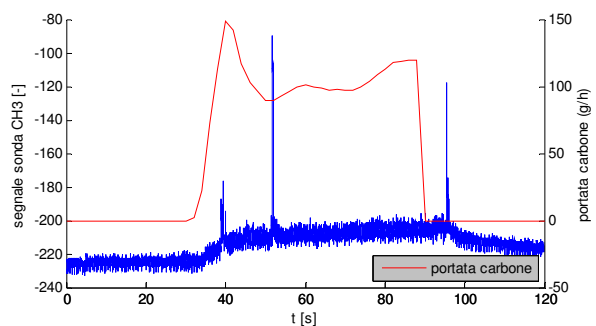
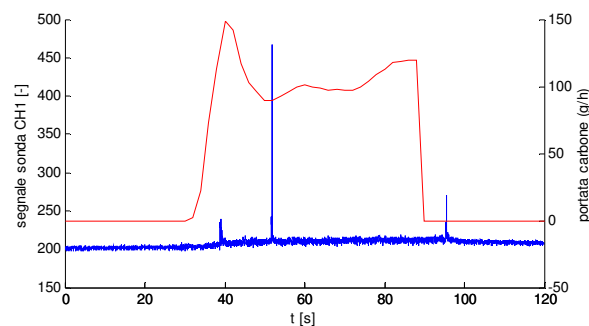
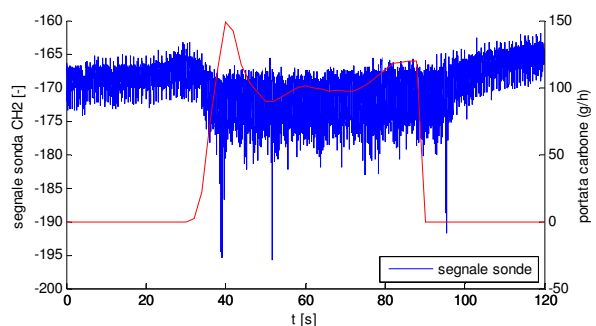
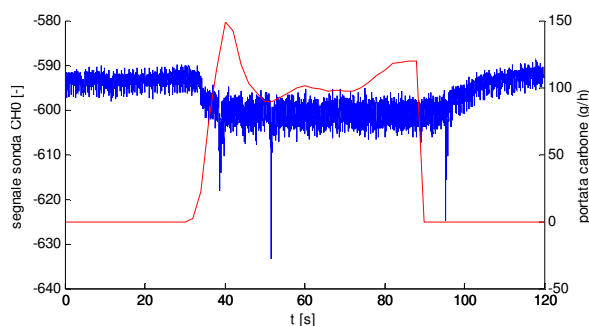
char di carbone S. A. granulometria $45 < x < 90 \mu\text{m}$

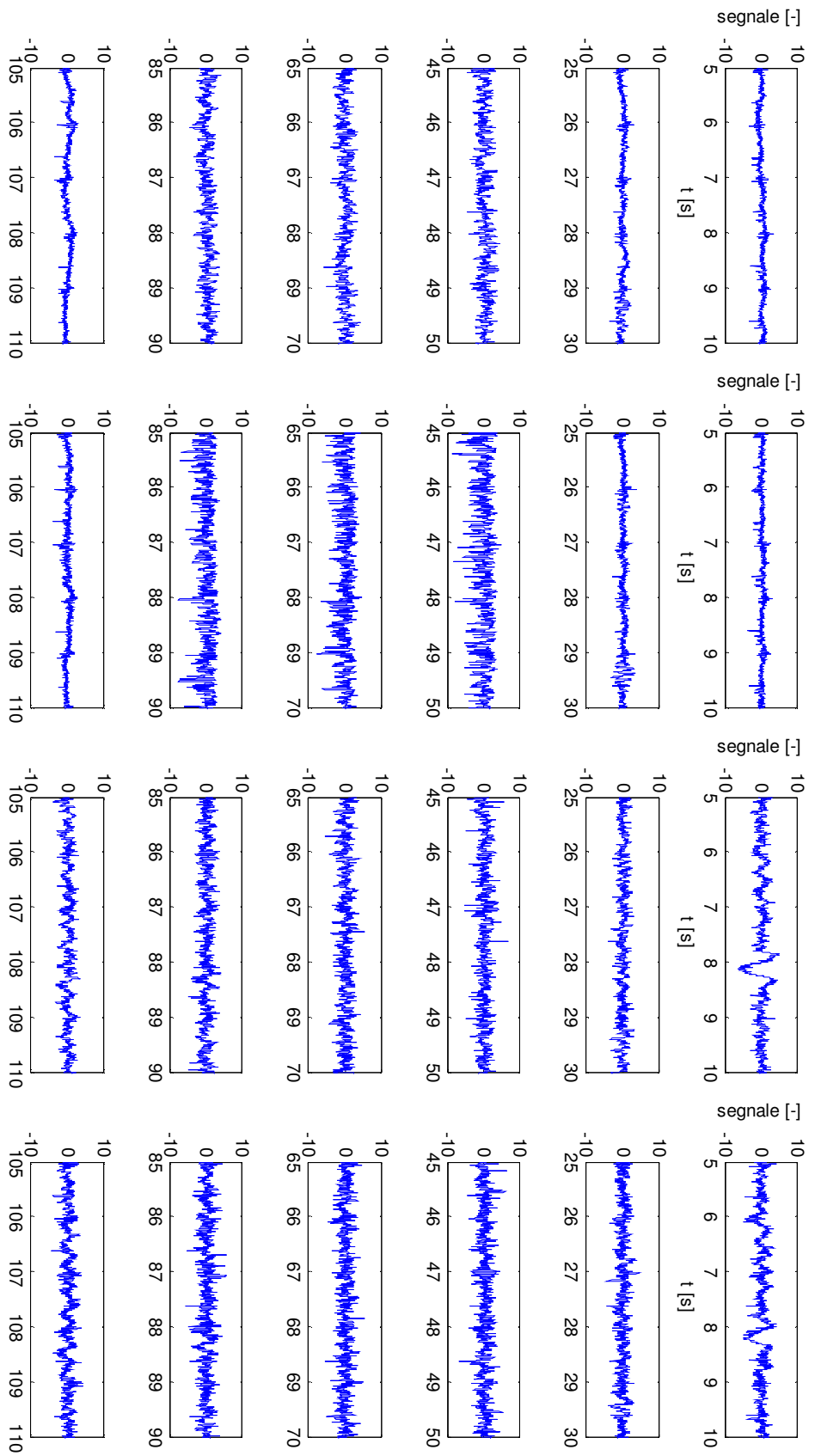
concentrazione di O_2 nei fumi 6.25%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





2.2.3. Prove pulsate

Si riportano i dettagli sul passaggio di una dose di combustibile e della ripetibilità nel tempo del segnale.

- ore 12.07 giorno 13/04/11

condizioni operative:

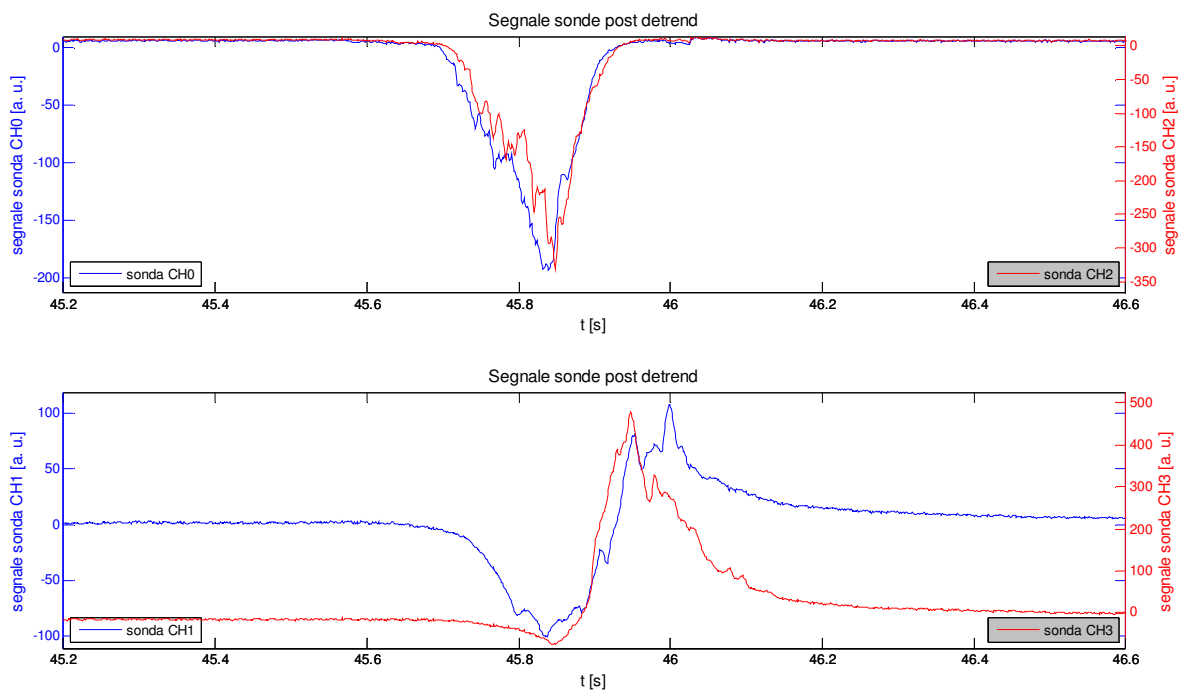
char di carbone S. A. granulometria $90 < x < 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 14.29 giorno 13/04/11

condizioni operative:

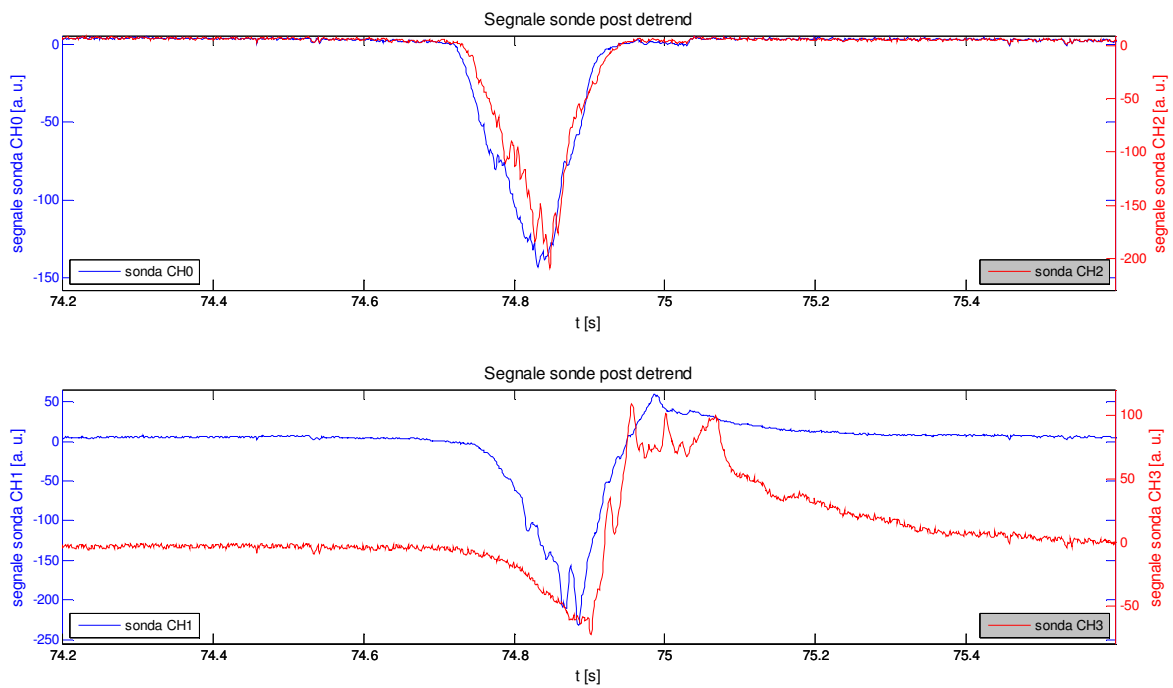
char di carbone S. A. granulometria $45 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



2.2.4. Prove in transitorio ad alimentazione pulsata

Delle prove così effettuate si riportano i soli valori del segnale globalmente registrato dalle sonde, visto che nel dettaglio i segnali al passaggio del combustibile sono del tutto identici alle corrispondenti prove precedenti.

- ore 12.11 giorno 13/04/11

condizioni operative:

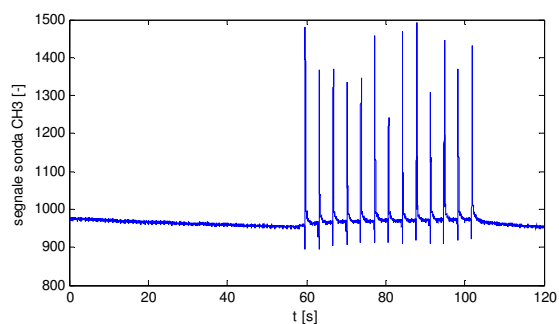
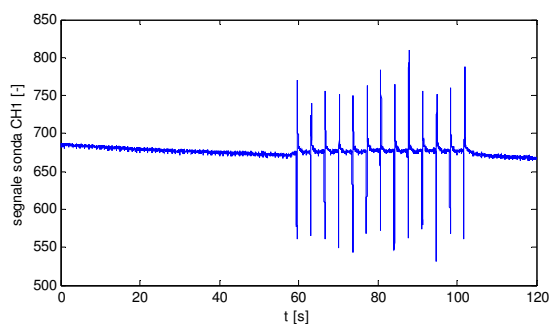
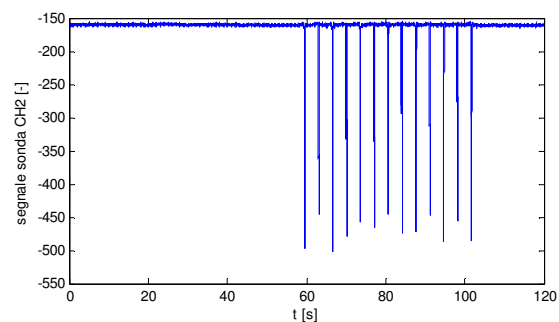
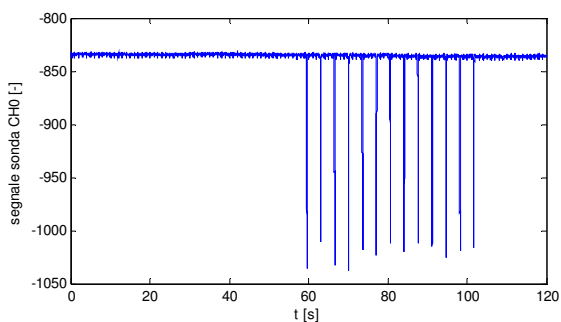
char di carbone S. A. granulometria $90 < x < 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 14.34 giorno 13/04/11

condizioni operative:

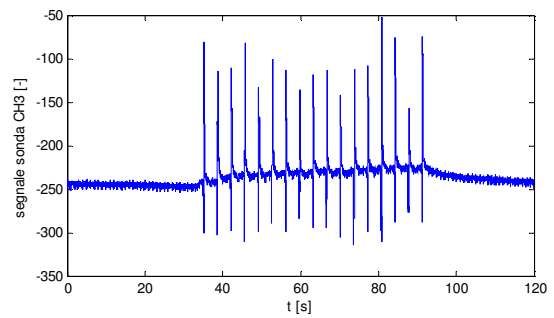
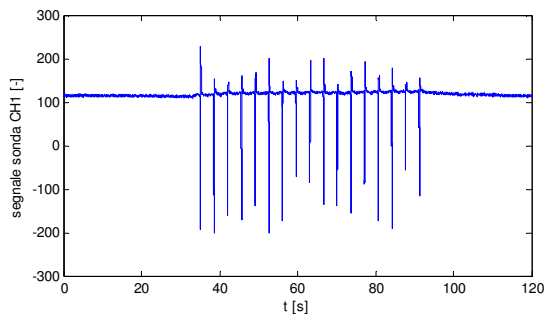
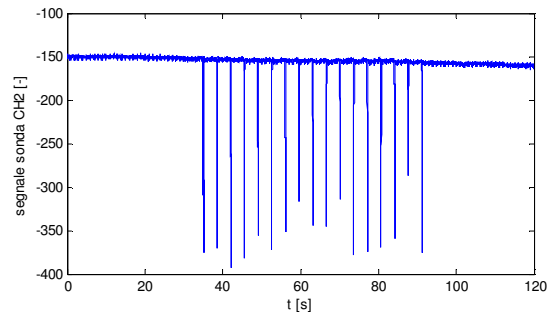
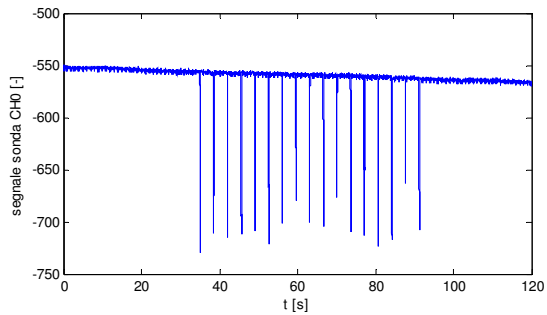
char di carbone S. A. granulometria $45 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.2%

temperatura 1100°C

trasporto aria e azoto

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



2.3. Biomassa

2.3.1. Prove continue

Si riportano per le varie prove le condizioni operative e gli andamenti dei segnali elaborati per brevi periodi di 5 secondi.

- ore 10.50 giorno 14/04/11

condizioni operative:

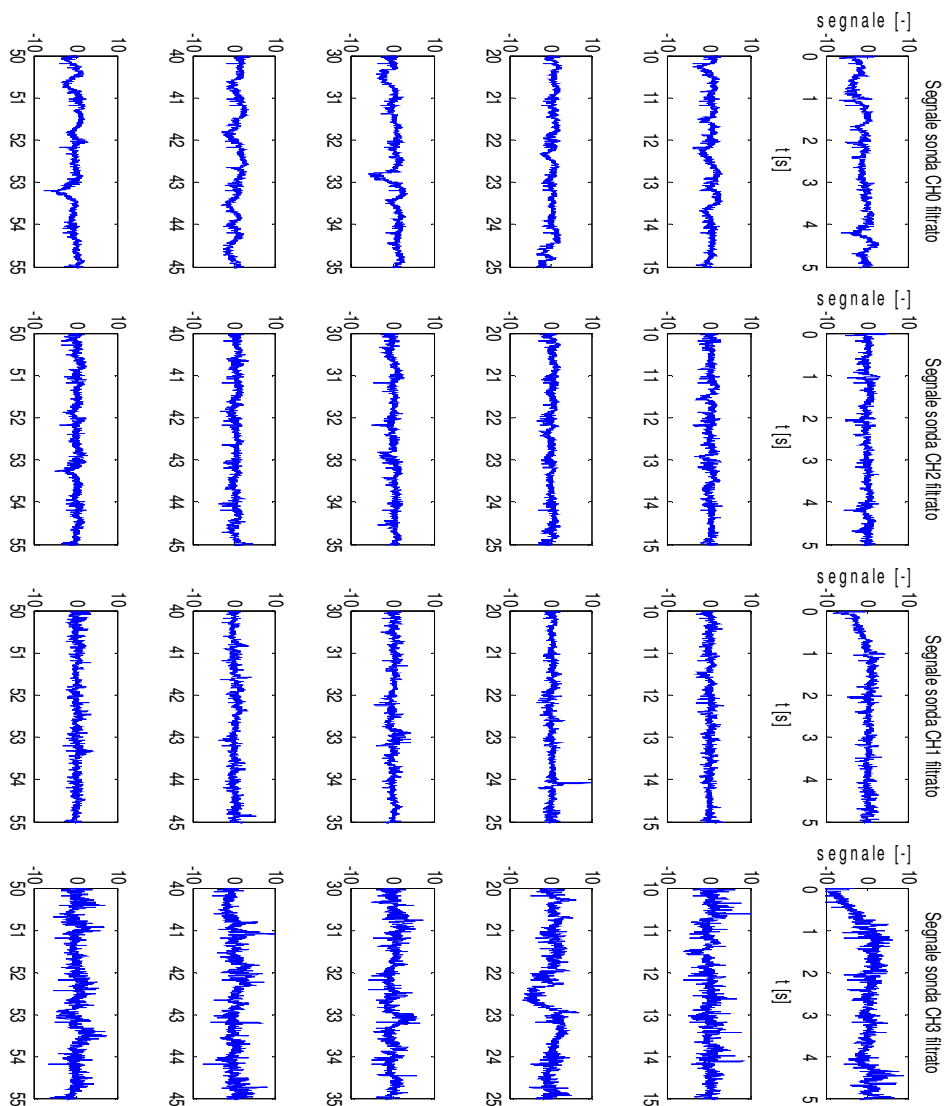
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 11.02 giorno 14/04/11

condizioni operative:

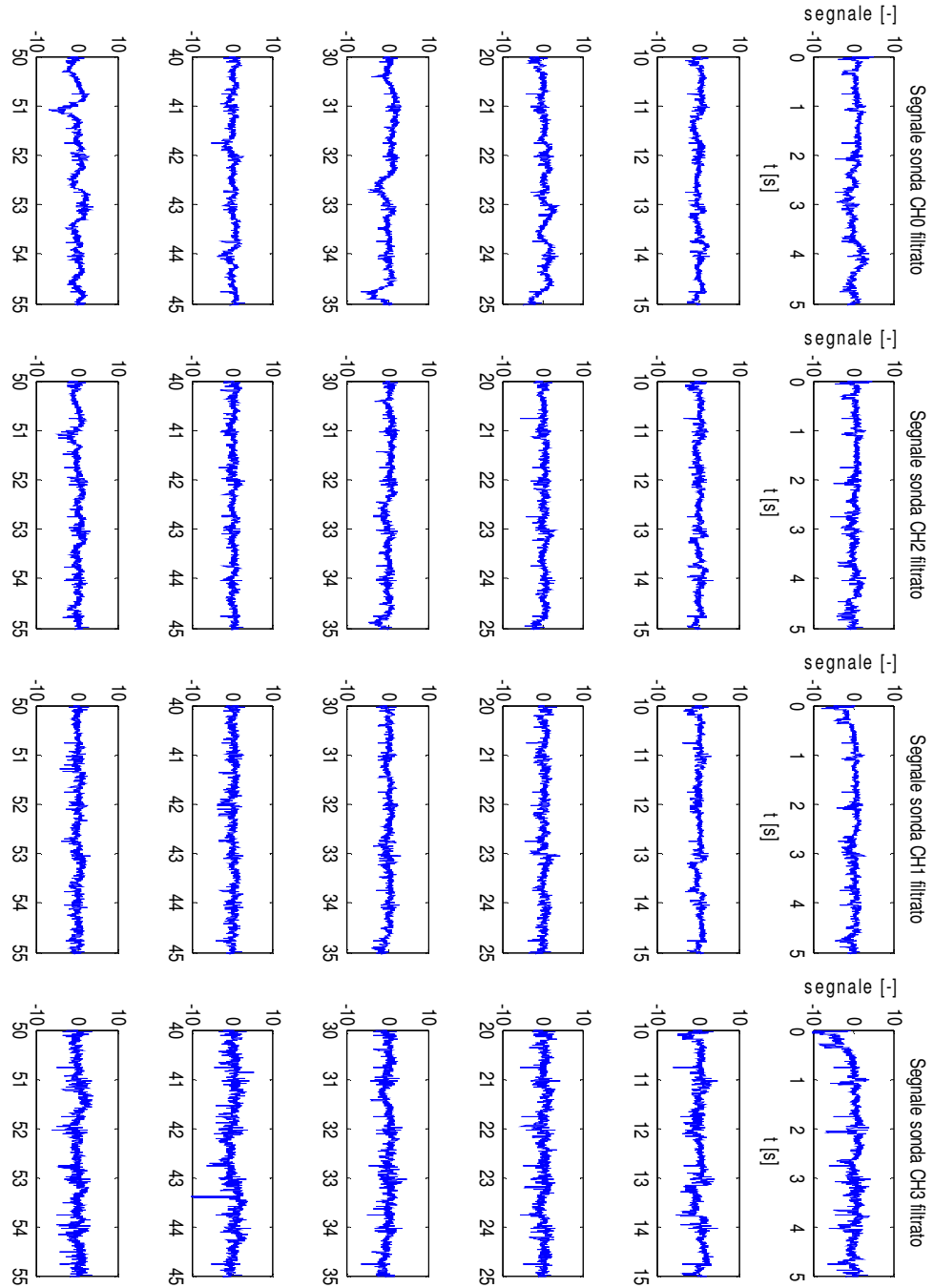
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 3.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 11.46 giorno 14/04/11

condizioni operative:

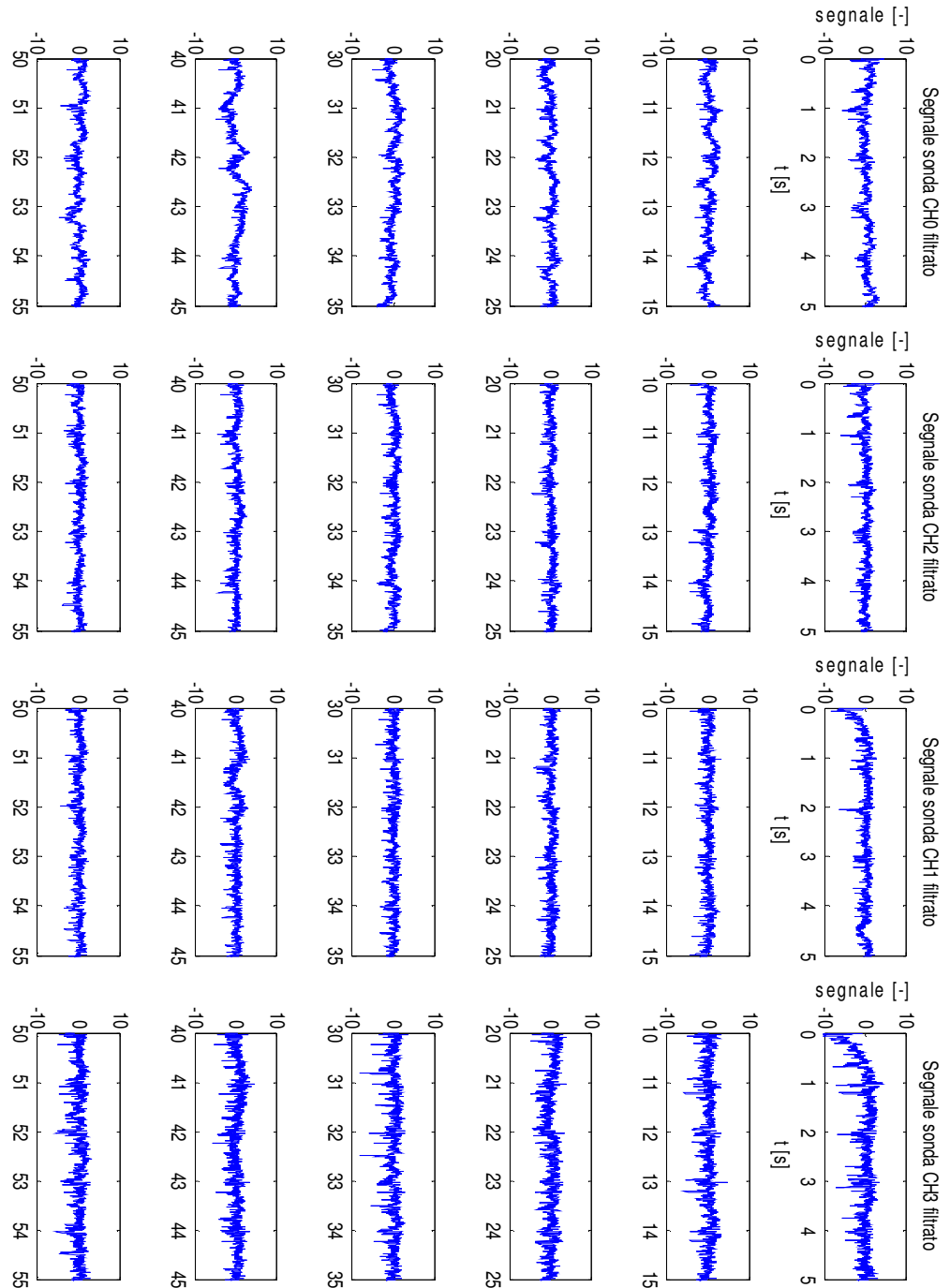
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



2.3.2. Prove in transitorio ad alimentazione continua

Di queste prove si riportano i valori registrati dalle sonde e gli andamenti a 5 secondi.

- ore 10.53 giorno 14/04/11

condizioni operative:

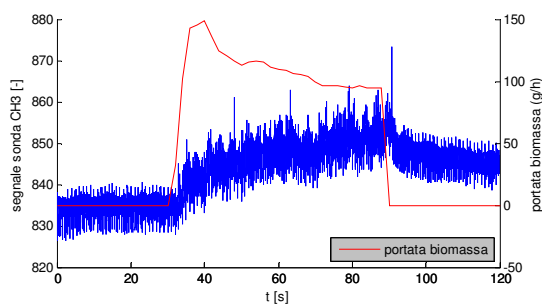
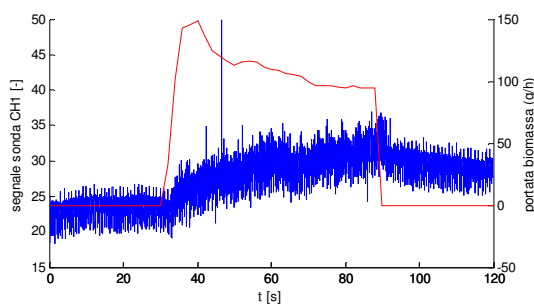
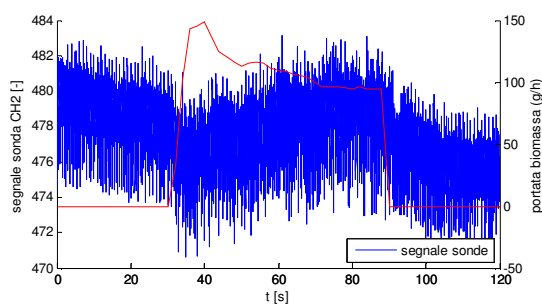
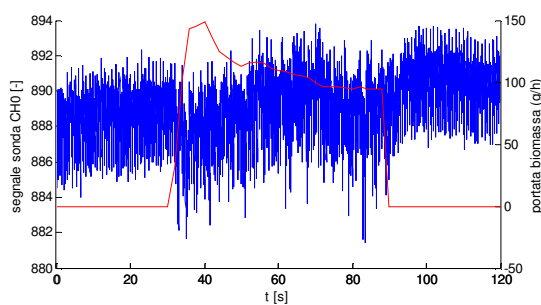
semi di girasole spremuti e macinati

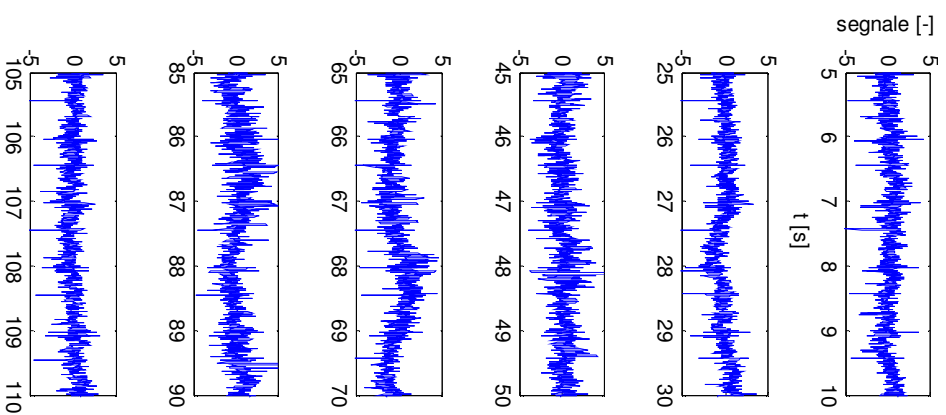
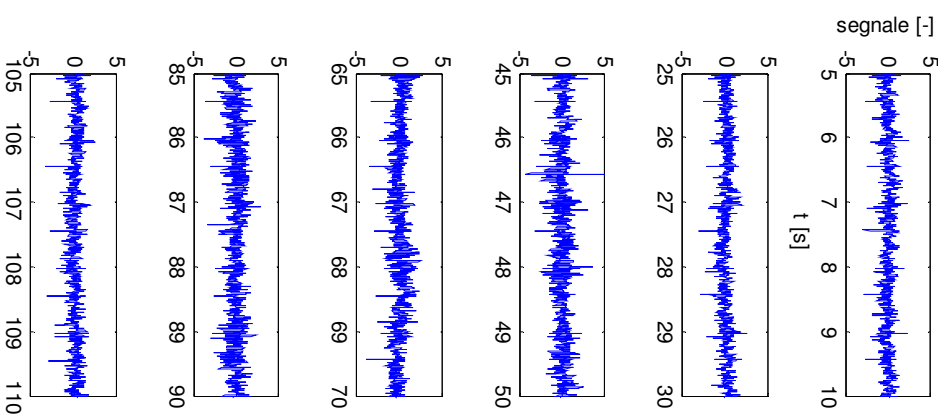
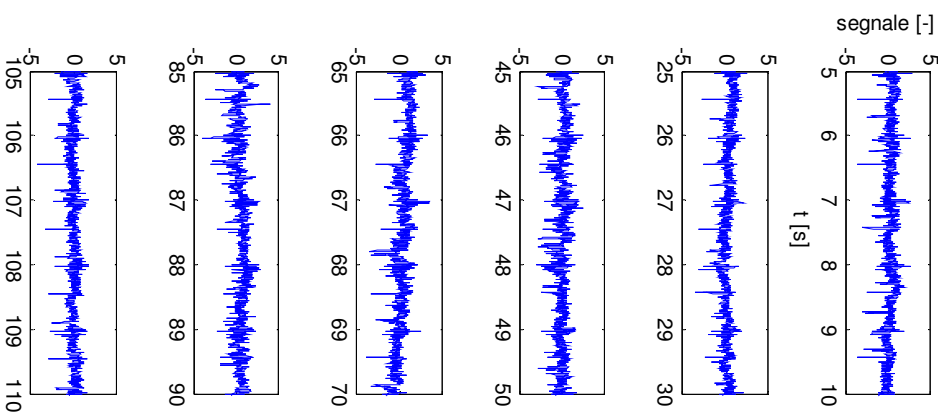
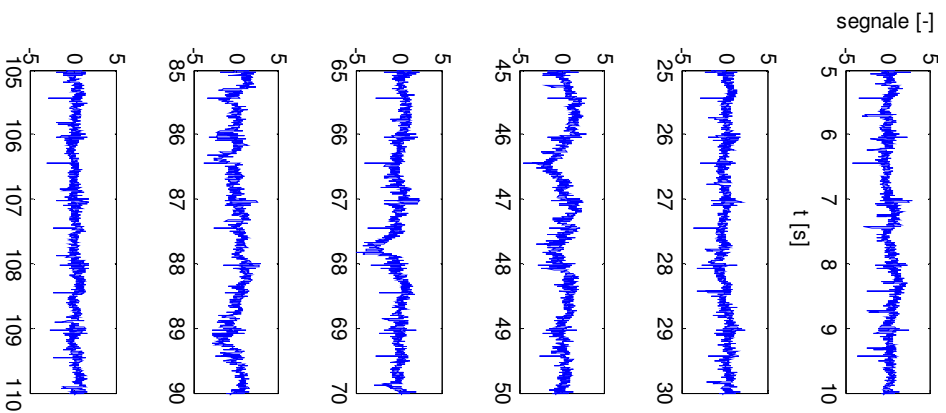
concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 11.20 giorno 14/04/11

condizioni operative:

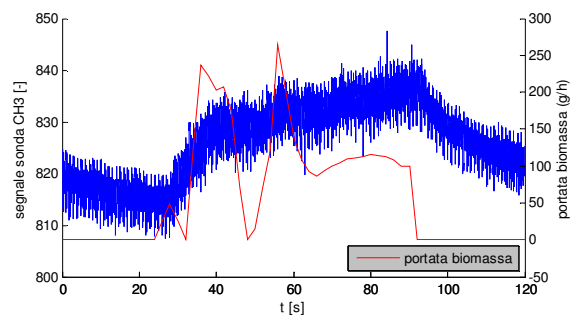
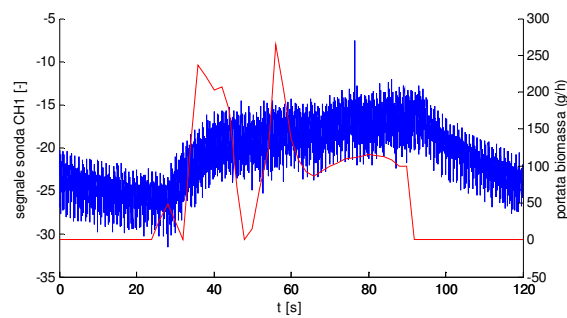
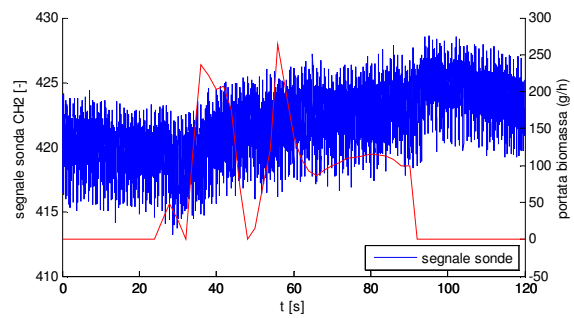
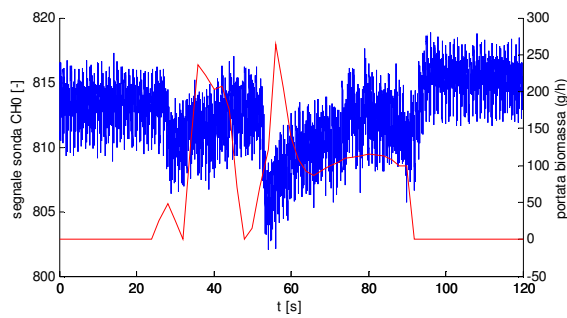
semi di girasole spremuti e macinati

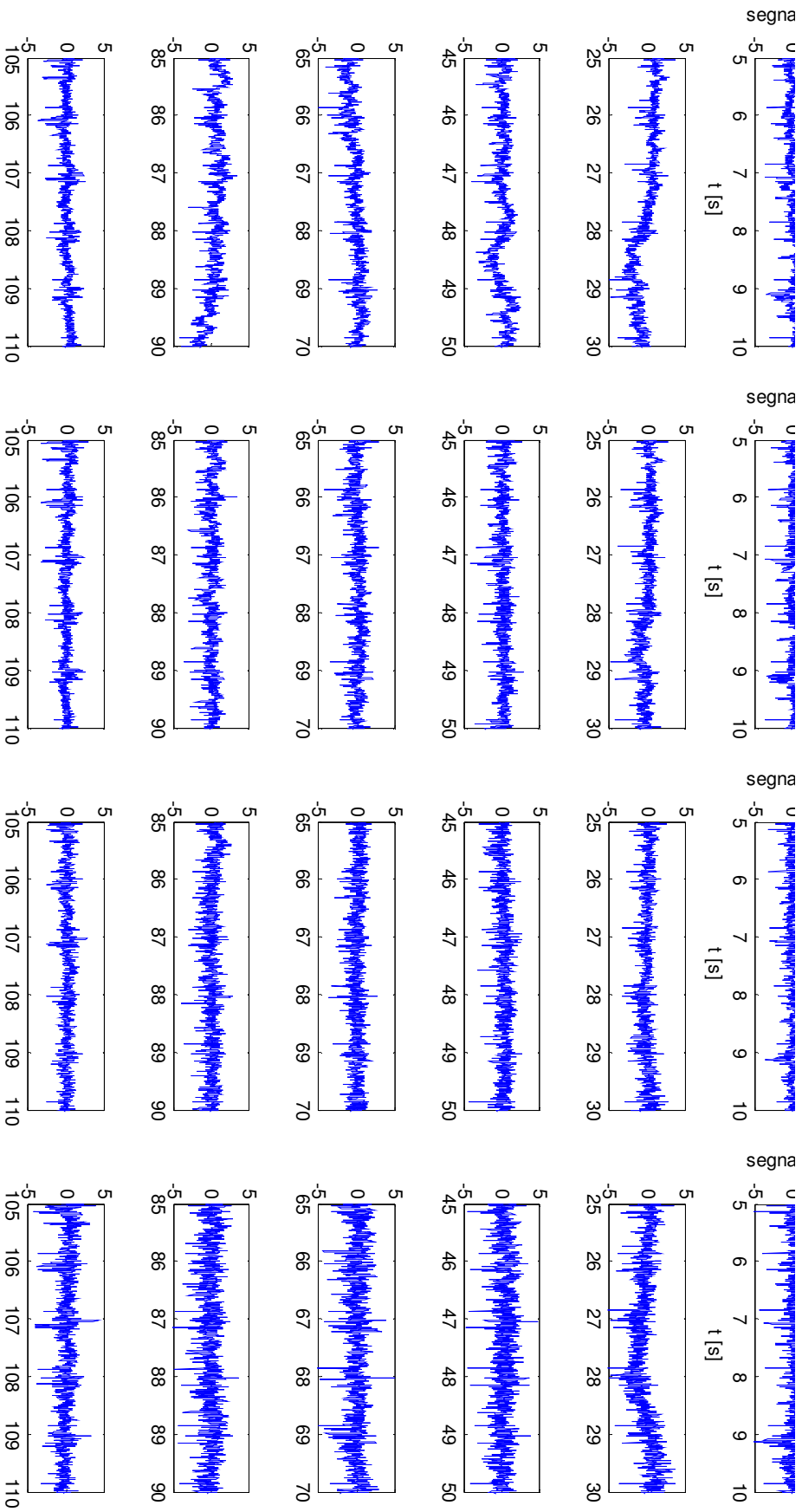
concentrazione di O_2 nei fumi 3.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





- ore 11.49 giorno 14/04/11

condizioni operative:

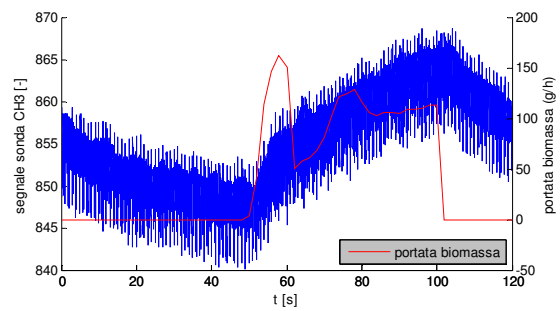
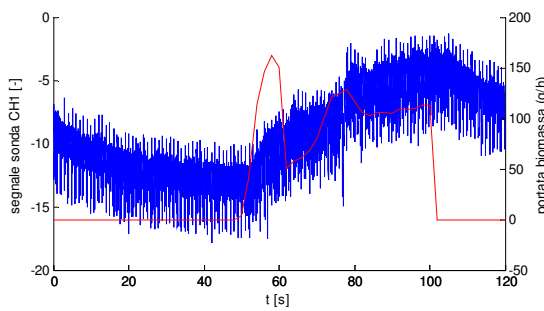
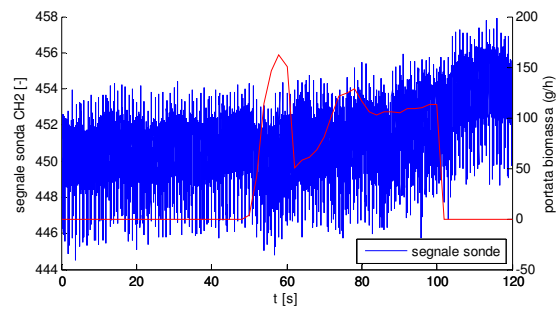
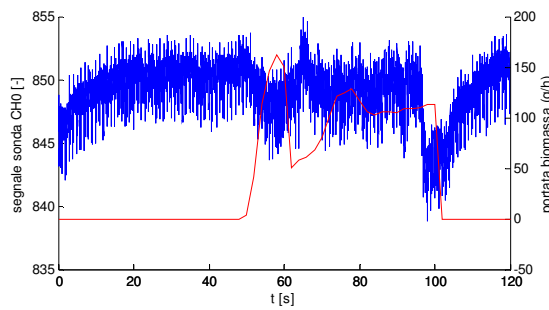
semi di girasole spremuti e macinati

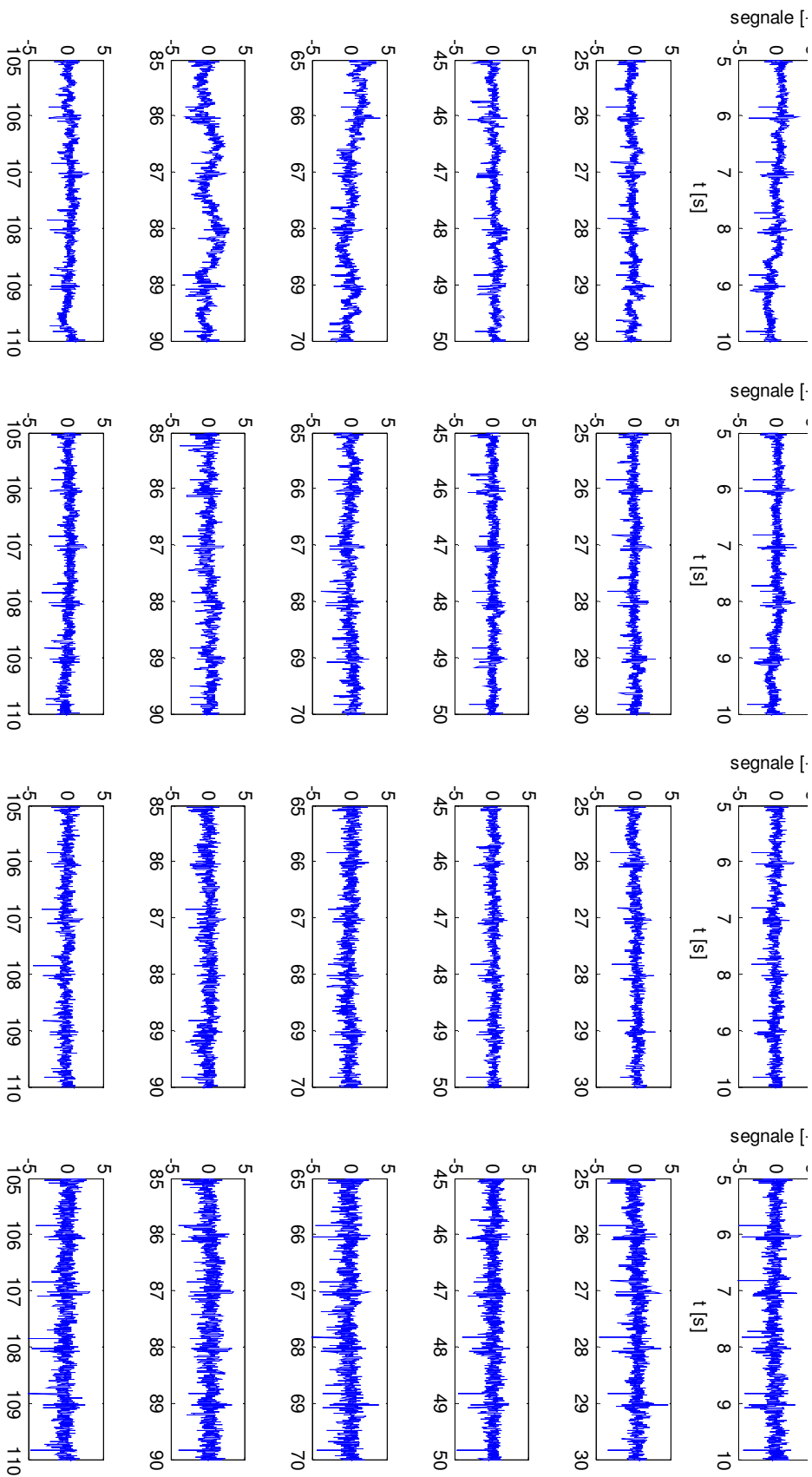
concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9





2.3.3. Prove pulsate

Si riportano i dettagli sul passaggio di una dose di combustibile e della ripetibilità nel tempo del segnale.

- ore 10.39 giorno 14/04/11

condizioni operative:

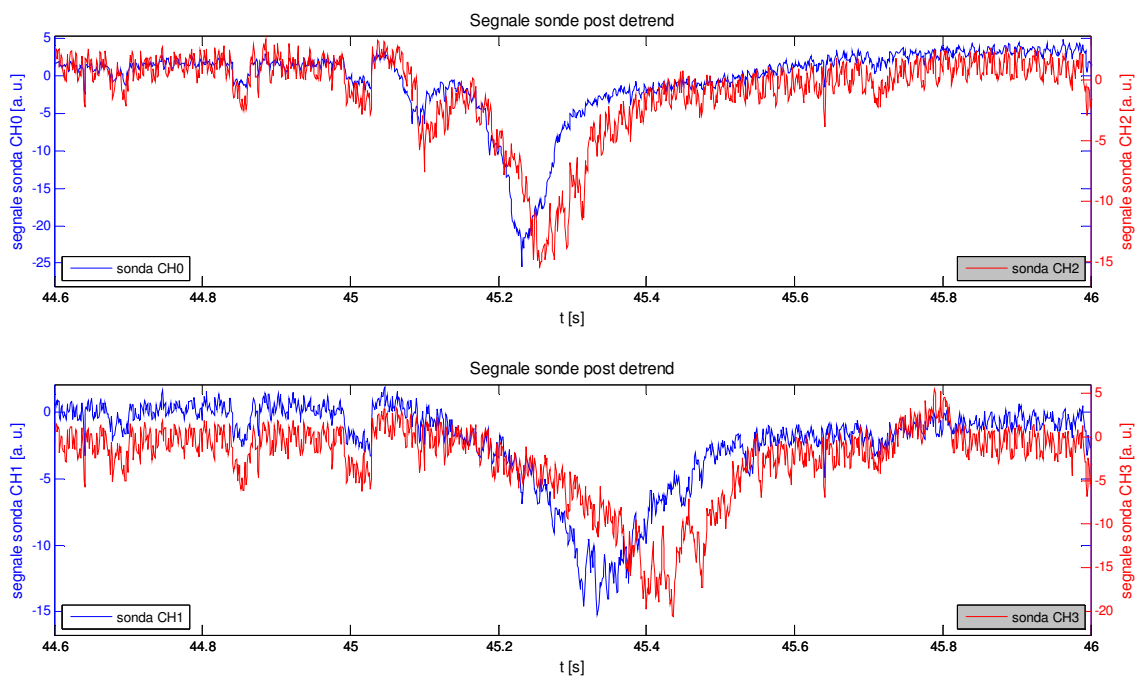
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 11.26 giorno 14/04/11

condizioni operative:

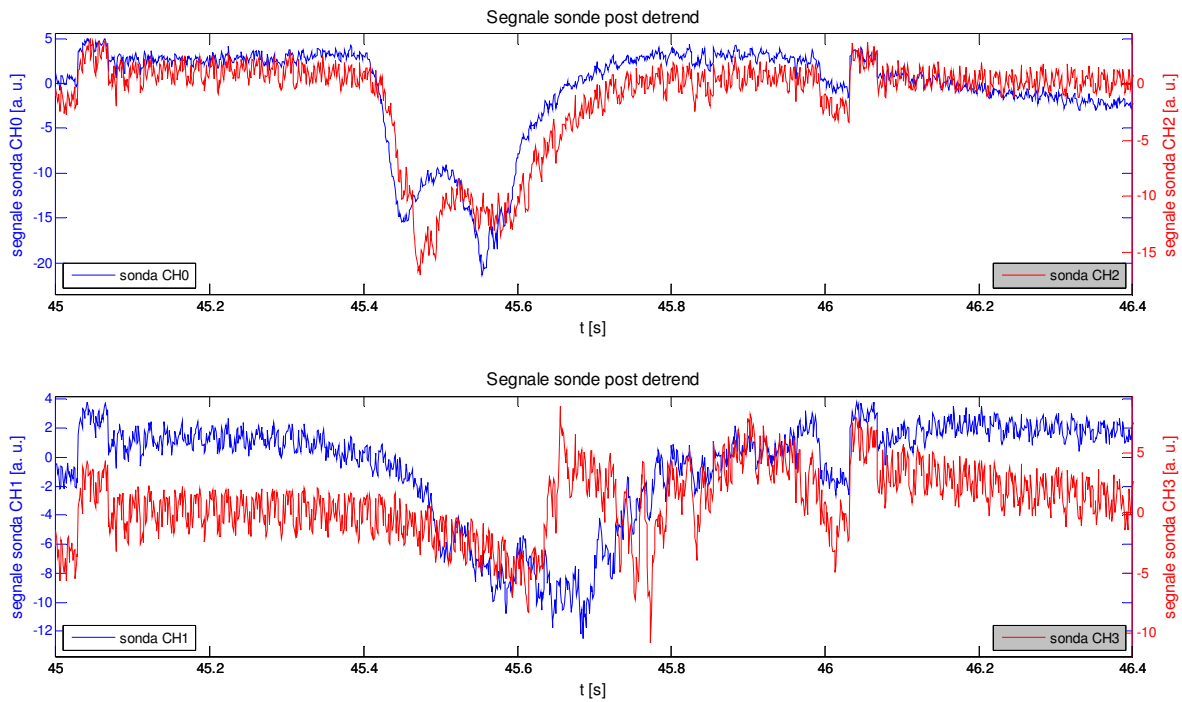
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 3.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 11.38 giorno 14/04/11

condizioni operative:

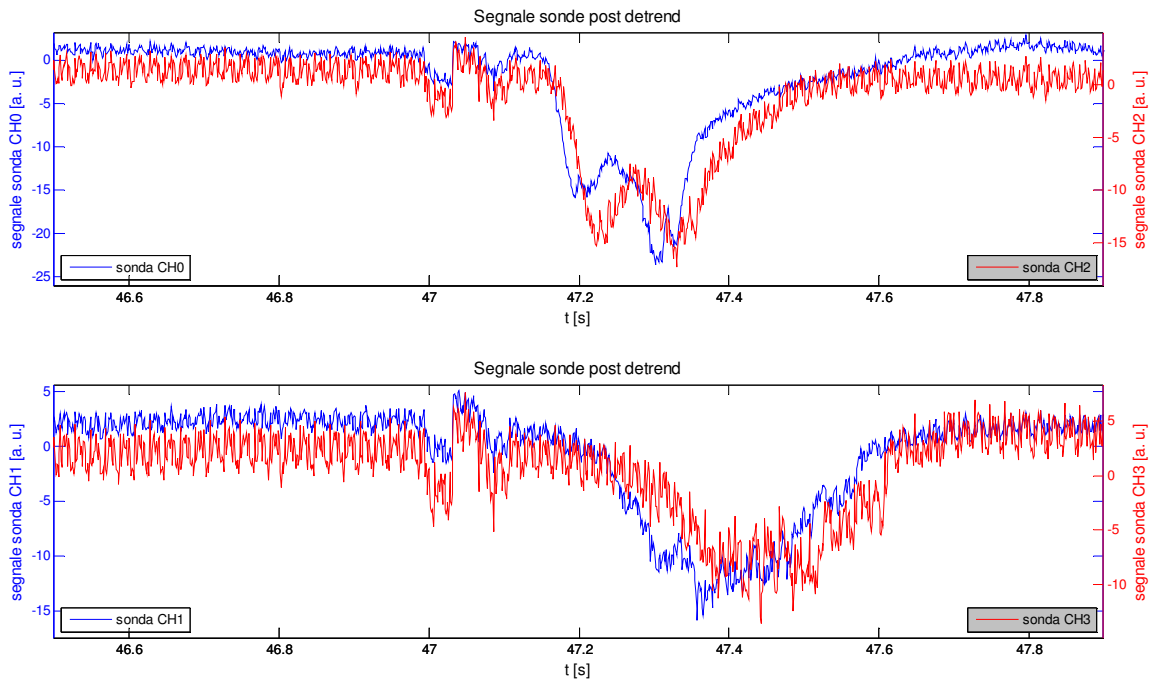
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



2.3.4. Prove in transitorio ad alimentazione pulsata

Di queste prove si riportano i segnali originali registrati dalle sonde.

- ore 10.42 giorno 14/04/11

condizioni operative:

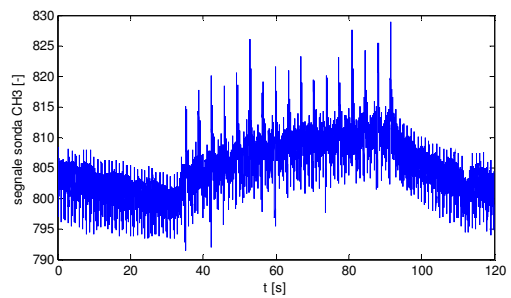
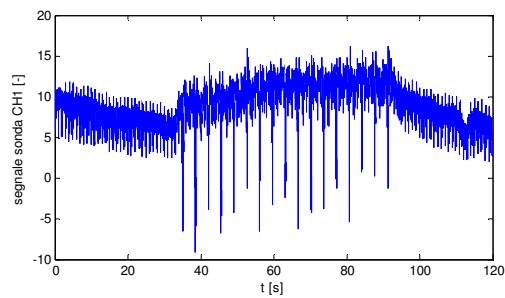
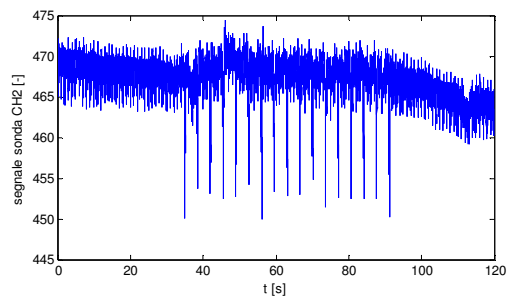
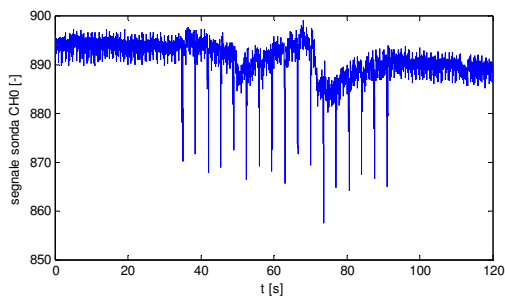
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 11.27 giorno 14/04/11

condizioni operative:

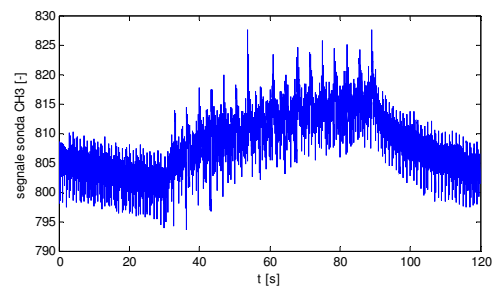
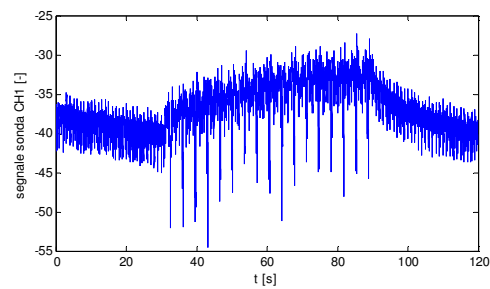
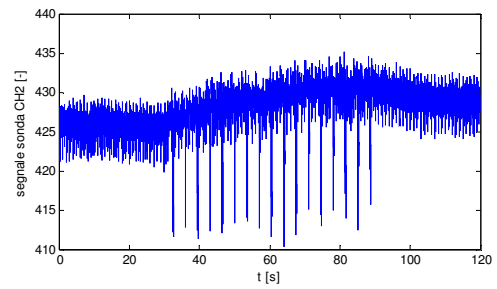
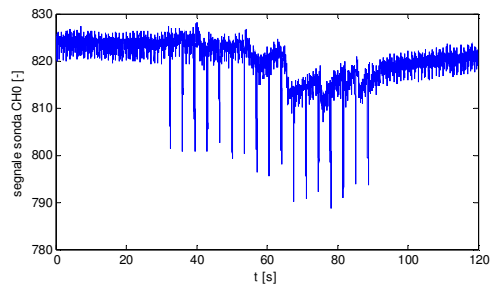
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 3.0%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



- ore 11.39 giorno 14/04/11

condizioni operative:

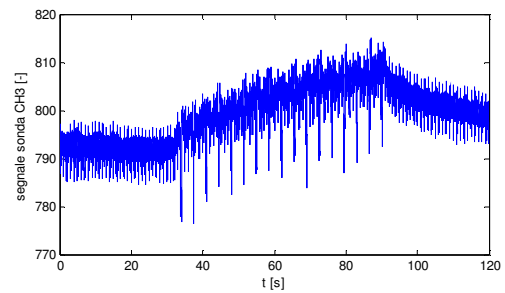
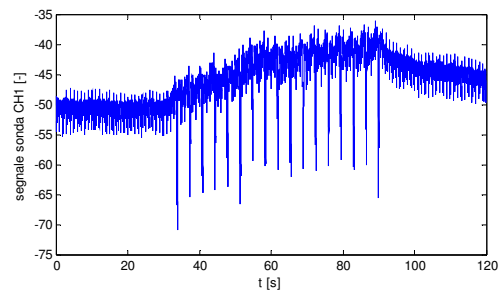
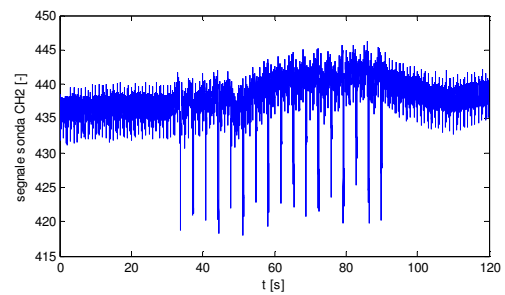
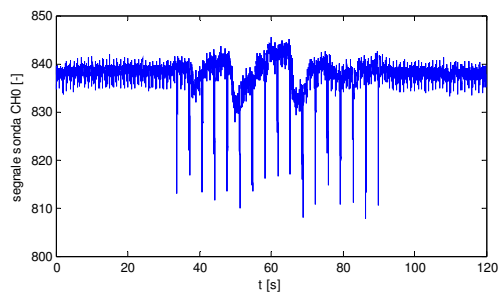
semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

trasporto azoto e aria

posizione sonde: CH0 porta 6, CH2 porta 7, CH1 porta 8, CH3 porta 9



3. Discussione dei risultati prove aprile 2011

3.1. Carbone tal quale

Riassumendo per le prove di questo tipo si sono ottenuti i seguenti tipi di segnali per le sonde messe nelle varie porte al variare delle condizioni operative:

Granulometria (μm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Ossigeno (%)	Carrier	Porta 6	Porta 7	Porta 8	Porta 9	Porta 10	Porta 12
> 125	1100	0.5	Azoto-aria	assorbimento	assorbimento	assorbimento	assorbimento	-	-
> 125	1100	3.3	Azoto-aria	assorbimento-emissione	emissione	emissione	emissione	-	-
> 125	1100	6.2	Azoto-aria	assorbimento-emissione	emissione	emissione	emissione	-	-
38<x<90	1100	0.7	Azoto-aria	assorbimento	assorbimento	assorbimento-emissione	assorbimento-emissione	-	-
38<x<90	1100	3.3	Azoto-aria	assorbimento-emissione	assorbimento-emissione	emissione	emissione	-	-
38<x<90	1100	6.2	Azoto-aria	assorbimento-emissione	assorbimento-emissione	emissione	emissione	-	-
> 125	900	0.5	Azoto	assorbimento	assorbimento	assorbimento	assorbimento-emissione	-	-
> 125	900	3.0	Azoto	assorbimento	assorbimento	assorbimento	assorbimento-emissione	-	-
> 125	900	6.0	Azoto-aria	assorbimento	assorbimento	assorbimento-emissione	emissione	emissione	emissione
> 125	1100	6.2% in oxycombustione	Azoto-aria	-	-	assorbimento	assorbimento	-	-
> 125	900	0.5% in oxycombustione	Azoto	-	-	assorbimento	assorbimento	-	-

3.1.1. Prove continue e in transitorio ad alimentazione continua

3.1.1.1. Effetto della temperatura

La temperatura ha un effetto importante sulla conversione di devolatilizzazione del carbone, poiché si deve considerare l'incremento di conversione (yield) dovuto all'alta temperatura. Le prove a 900 e 1100°C differiscono notevolmente nella dinamica e nell'intensità del segnale a parità di granulometria del carbone e di concentrazione di ossigeno. A 900°C la velocità di riscaldamento delle particelle è più bassa che a 1100°C, perciò è lecito aspettarsi un maggiore tempo di inizio devolatilizzazione (risultato confermato da simulazioni CFD) e quindi che il segnale si veda in sonde a distanza elevata dall'immissione. Si riporta per esempio un confronto tra la dinamica del segnale di due prove entrambe con la stessa granulometria delle particelle di polverino di carbone ($> 125 \mu\text{m}$), la stessa concentrazione di ossigeno nei fumi (6%) e lo stesso gas carrier (azoto puro):

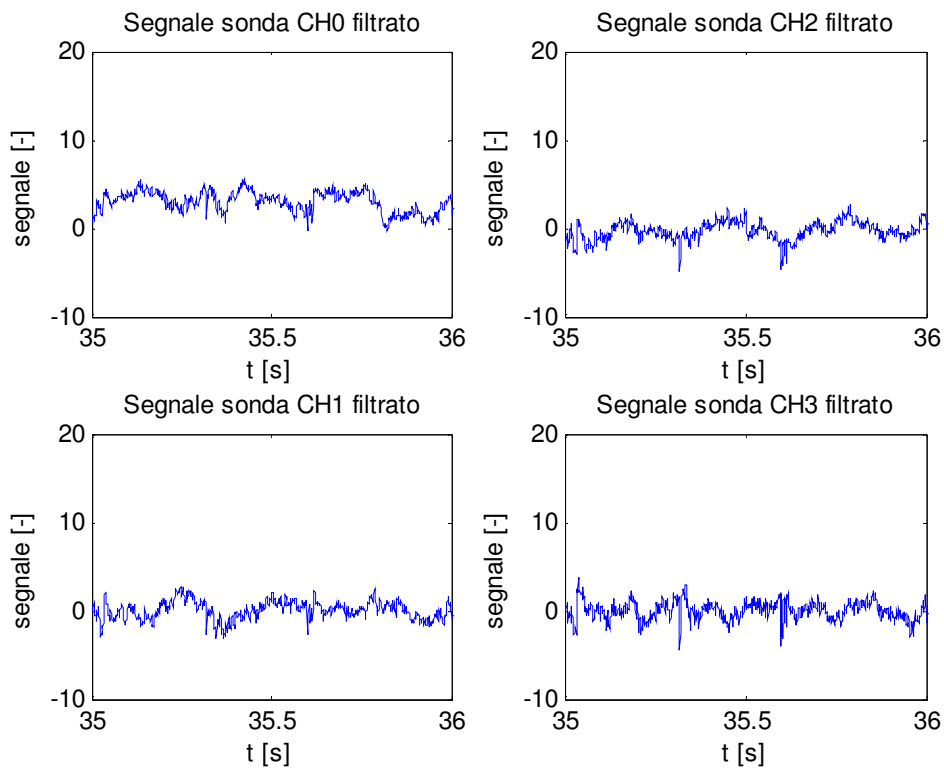


Figura 8: Dettaglio di segnale sonde a 900°C per particelle coal SA t.q. $> 125 \mu\text{m}$ e 6% di O_2

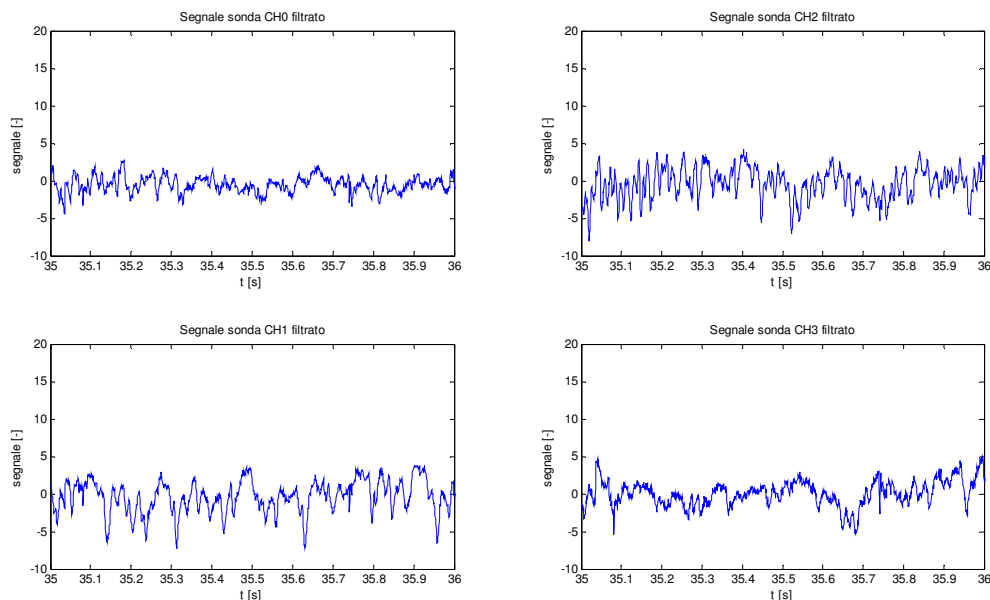


Figura 9: Dettaglio di segnale sonde a 1100°C per particelle coal SA t.q. >125 μm e 6% di O_2

Come si può vedere nel caso della prova a 1100°C le sonde CH2 e CH1 registrano un segnale abbastanza dinamico, ricco di emissioni radiative. Nel caso invece della prova a 900°C il segnale è molto meno dinamico, ovvero sono presenti molte meno variazioni nel segnale, che risulta più simile nelle quattro sonde. Tutto ciò può ragionevolmente essere attribuito, come atteso, alla diversa velocità di riscaldamento delle particelle nei due casi, con minore tempo per avere devolatilizzazione e ignizione della nube nel caso a 1100°C.

3.1.1.2. Effetto della concentrazione di ossigeno

La concentrazione di ossigeno agisce non particolarmente sulla devolatilizzazione in sé, quanto piuttosto sull'ignizione della nube dei volatili. Gli studi presenti in letteratura, infatti, confermano che l'eccesso di ossigeno influenza marginalmente la fase di devolatilizzazione, tuttavia le sonde per la loro natura non possono vedere l'espulsione dei volatili dalle particelle ma riescono a rilevare l'emissione luminosa della nube ignita. Ne deriva che una devolatilizzazione a cui non segue per difetto di ossigeno un'ignizione della nube non può essere notata dalle sonde. È perciò lecito aspettarsi un segnale più dinamico e intenso al crescere della concentrazione di ossigeno nei fumi, visto che risulta favorita l'ignizione della nube di volatili. Si riporta un esempio di segnali delle sonde alla stessa granulometria (> 125 μm) e alla stessa temperatura (1100°C) per diverse concentrazioni di ossigeno nei fumi.

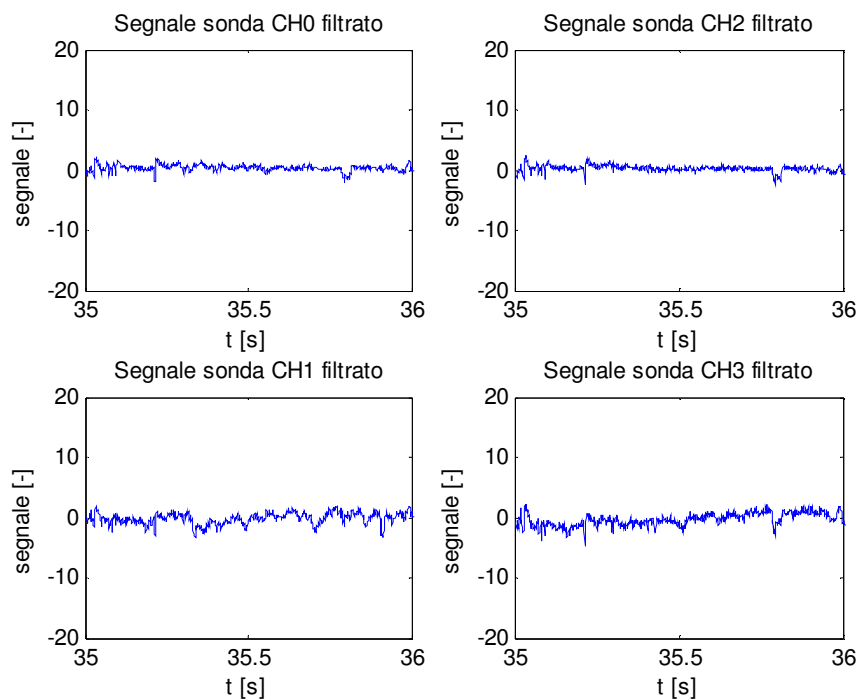


Figura 10: Dettaglio di segnale sonde a 0.5% di O_2 per particelle coal SA t.q. $>125 \mu m$ e $1100^\circ C$

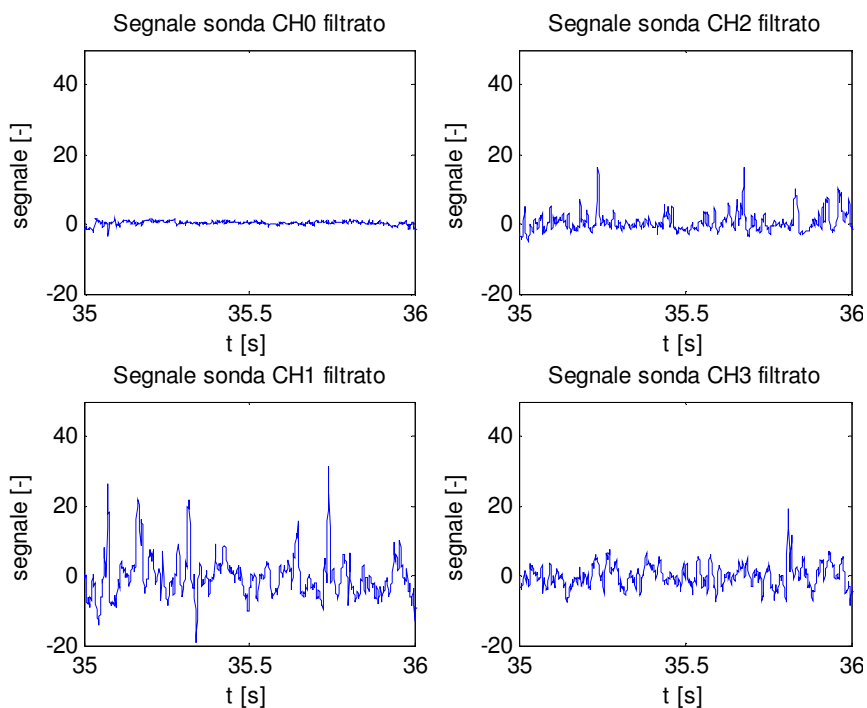


Figura 11: Dettaglio di segnale sonde a 3.3% di O_2 per particelle coal SA t.q. $>125 \mu m$ e $1100^\circ C$

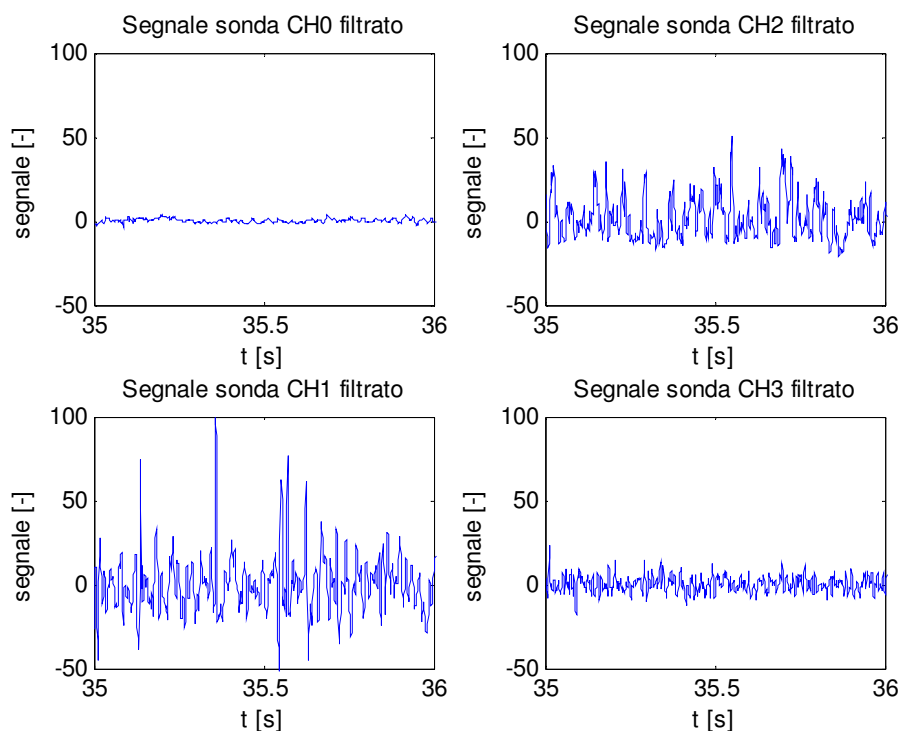


Figura 12: Dettaglio di segnale sonde a 6.2% di O_2 per particelle coal SA t.q. $>125 \mu m$ e $1100^\circ C$

L'analisi di questi segnali mostra chiaramente come il segnale sia molto più dinamico e intenso al crescere della concentrazione di ossigeno. In particolare si ha una notevole differenza tra il caso allo 0.5% e quello al 3.3%, infatti nel primo caso la concentrazione di ossigeno è molto probabilmente insufficiente a causare l'ignizione di una quantità significativa dei volatili che sicuramente sono fuoriusciti dalle particelle di combustibile. Il segnale si mostra significativo dalla sonda CH2 che è posta alla porta 7, ad una distanza di 25.3 cm dalla porta di ignizione a cui corrisponde un tempo di residenza nel reattore di 75- 80 ms per una velocità delle particelle di 3.3 m/s. Valori in letteratura (Shaddix e Molina, 2009) mostrano che a $1000^\circ C$ e al 12% di ossigeno su un carbone bituminoso ad alto contenuto di volatili (35% wet) e iniezione di 0.02 g/min per tenere isolate le particelle nel combustore la devolatilizzazione richiede pochissimo tempo per avvenire (5- 20 ms) e la combustione dei volatili dura anch'essa molto poco (10- 15 ms), perciò il tutto si estingue in 20- 30 ms. Dopo tale periodo inizia la combustione del char. Va, però, considerato che nel caso in esame con una portata alimentata di 110 g/h (circa 1.83 g/min) le condizioni descritte da Shaddix e Molina di isolamento delle particelle nel reattore sono molto lontane, perciò i profili di velocità e temperatura delle particelle sono affette dalla combustione delle particelle circostanti. Perciò è lecito aspettarsi tempi molto più lunghi di quelli proposti da Shaddix e Molina. Questo aspetto sarà meglio indagato nel caso delle prove ad alimentazione pulsata, vista la complessità delle prove continue. In ogni caso si osserva un segnale con maggiore dinamica e intensità al crescere

della concentrazione di ossigeno, come atteso, resta da capire a quale fenomeno sia maggiormente imputabile (ignizione dei volatili o del char).

3.1.1.3. Effetto della granulometria del combustibile

La granulometria del polverino di carbone è di particolare importanza visto che particelle più piccole subiscono un riscaldamento più rapido e quindi è possibile che i tempi di ignizione di volatili e char siano condizionati dalle dimensioni della particella. Ci si aspetta che particelle più piccole mostrino un segnale significativo prima delle più grandi, è necessario verificarlo. Si riporta un esempio per polverino di carbone di diversa granulometria ($38 < x < 90 \mu\text{m}$ e $> 125 \mu\text{m}$) per le stesse condizioni di temperatura (1100°C) e concentrazione di ossigeno (6.2%).

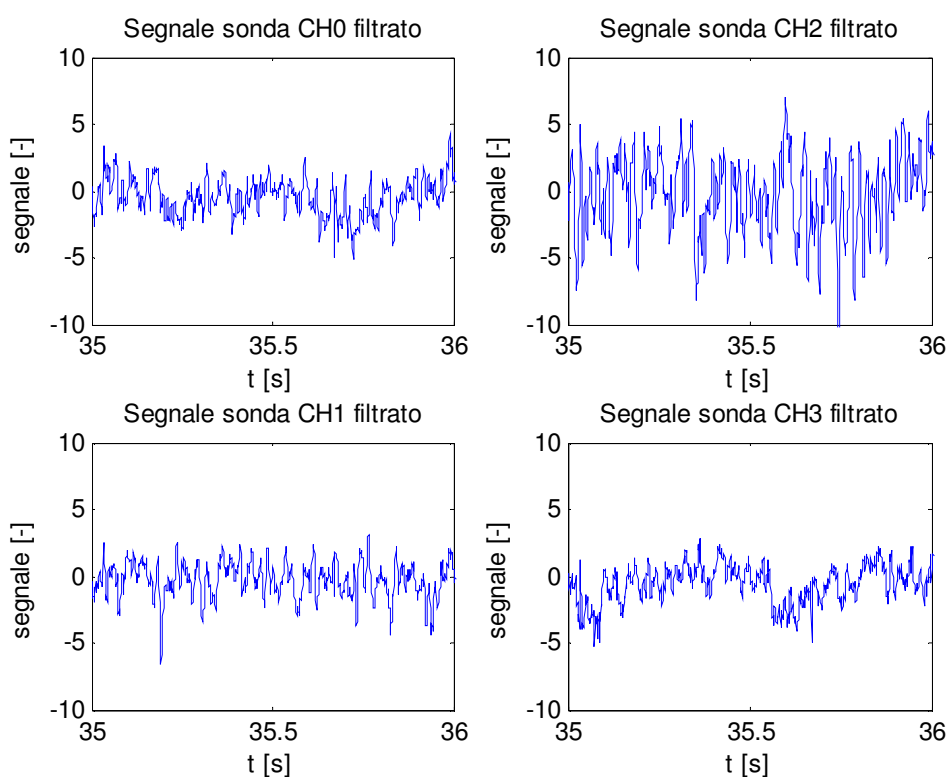


Figura 13: Dettaglio di segnale sonde per particelle coal SA t.q. $38 < x < 90 \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.2% di O_2

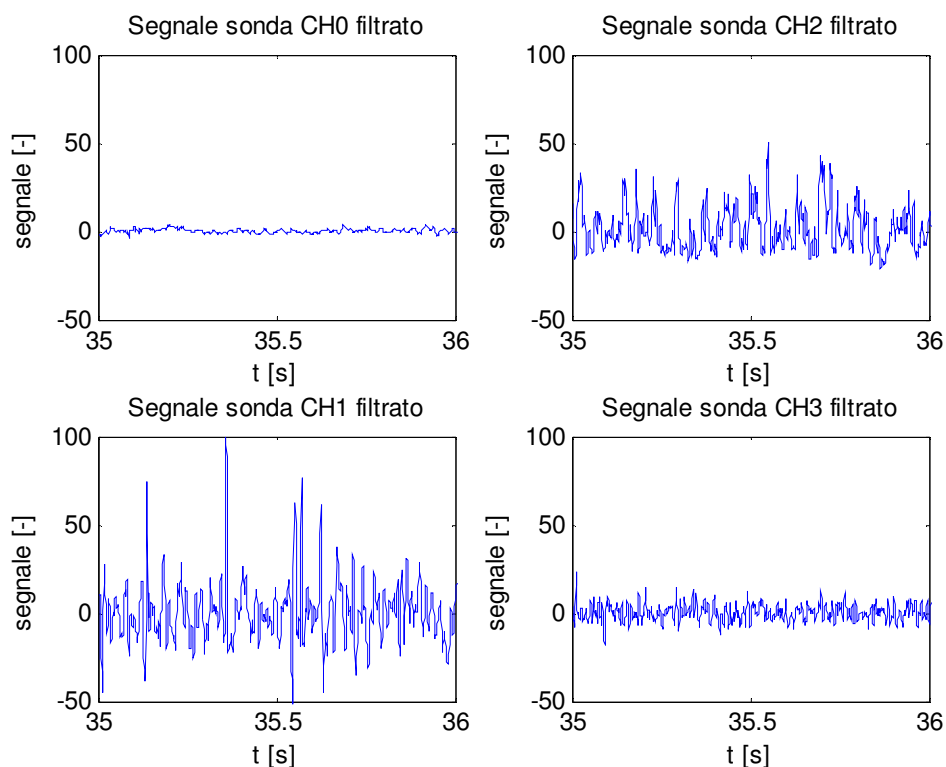


Figura 14: Dettaglio di segnale sonde per particelle coal SA t.q. $>125 \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.2% di O_2

Come si può vedere il segnale è particolarmente dinamico per la prova con polverino di bassa granulometria in tutte le sonde, in particolare due sono gli aspetti più interessanti: si ha un segnale significativo già nella sonda CH0 e il segnale più importante si ha per la sonda CH2. Nel caso invece della prova a granulometria maggiore il segnale per la sonda CH0 non mostra dinamiche interessanti, mentre esse sono evidenziate per le sonde CH2 e CH1. Ne deriva che questo segnale si vede anticipatamente nel caso delle prove a piccola granulometria, come era atteso.

3.1.1.4. Effetto dell'oxycombustione

Dalle prove effettuate in condizioni di oxycombustione nel precombustore e di conseguenza anche nel reattore emerge chiaramente un aspetto interessante: il segnale registrato in ambiente di oxycombustione è molto più attenuato rispetto a quello in combustione classica. Ciò si può notare dalle prove in transitorio con passaggio da un regime all'altro. Osservando le prove in transitorio si nota che il segnale passando da ambiente di combustione tradizionale al 6% di ossigeno ad ambiente di oxycombustione mostra un evidente diminuzione della prova dinamica. Diminuiscono, infatti, sia l'intensità che la fluttuazione del segnale. Si riporta un esempio di quanto affermato:

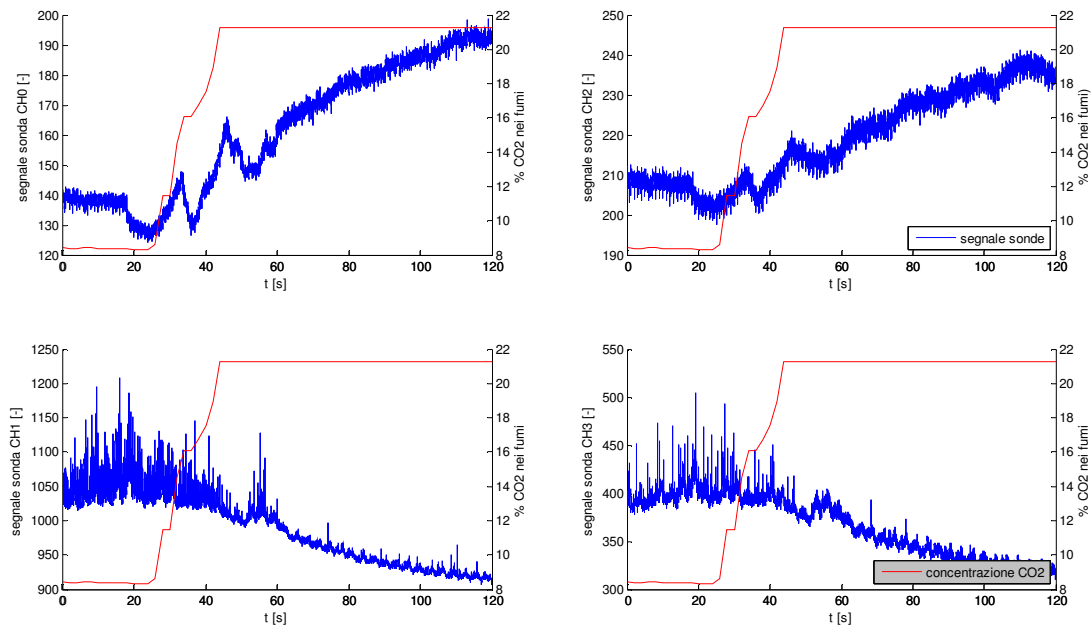


Figura 15: Segnale sonde in oxycombustione per particelle coal SA t.q. >125 μm a 1100°C e 6.2% di O₂

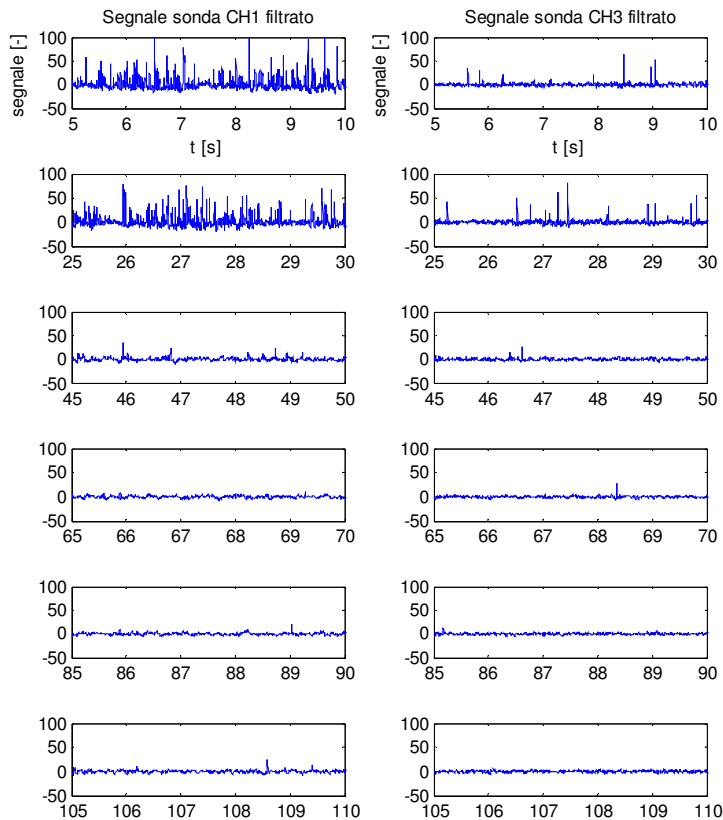


Figura 16: Dettaglio segnale sonde in oxycombustione per particelle coal SA t.q. $>125\ \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.2% di O_2

Si sono riportati i segnali delle sole sonde CH1 e CH3 visto che le altre due sono poste nel precombustore a metano. Emerge chiaramente come entrando in oxycombustione il segnale risulti molto meno dinamico di prima. Tale osservazione potrebbe far pensare che l'ambiente di oxycombustione diminuisca la reattività delle particelle di carbone. Si deve considerare che da precedenti studi emergono tendenze contrastanti:

- secondo Wall et al. (2009) in oxycombustione la reattività aumenta a parità di concentrazione di O_2
- secondo Shaddix e Molina (2007) in oxycombustione la reattività diminuisce.

Se si considera come attendibile il fatto che il segnale perde molta della sua dinamica passando in oxycombustione potrebbe sembrare confermata la tendenza osservata da Shaddix e Molina. D'altro canto, tuttavia, in oxycombustione si deve rilevare che l'ambiente è particolarmente ricco di anidride carbonica, la quale è capace di assorbire radiazioni IR su ampi campi di numero d'onda e quindi potrebbe in qualche modo ridurre il segnale rilevato dalle sonde. Si deve anche notare che da un'unica prova sperimentale di calcolo della conversione di devolatilizzazione in oxycombustione emerge un valore particolarmente elevato (63.44%), segno che un'elevata quantità di volatili sono stati espulsi dalla particella ed è stata ossidata una quantità non trascurabile di carbonio fisso.

3.1.1.5. Effetto del gas di trasporto

Per esaminare l'effetto del diverso gas di trasporto si esaminano i segnali registrati in due prove ad alimentazione continua in cui il carrier è l'unica variabile operativa diversa. Entrambe le prove sono state effettuate a 1100°C su carbone a elevata granulometria ($>125\ \mu\text{m}$) e con il 6% di ossigeno in eccesso nei fumi. Utilizzando azoto puro come carrier oppure una miscela al 50% azoto e 50% aria comporta un 10% di differenza di ossigeno nel carrier. Questo effetto è piuttosto importante visto che cresce la quantità di ossigeno disponibile per l'ignizione dei volatili e del char, e soprattutto è rilevante perché essendo ossigeno nel gas di trasporto è già in partenza molto vicino alle particelle e quindi il tempo necessario a diffondere dal bulk alle particelle è significativamente minore. Infatti nell'immissione del reattore il gas di trasporto entra più velocemente dei fumi di combustione provocando un effetto jet per cui si ha un certo effetto di richiamo dei gas esterni nel getto, ma la presenza iniziale di ossigeno nel carrier riduce notevolmente il tempo di approvvigionamento di ossigeno e quindi i tempi di ignizione. Si cerca conferma di queste osservazioni nei segnali delle sonde:

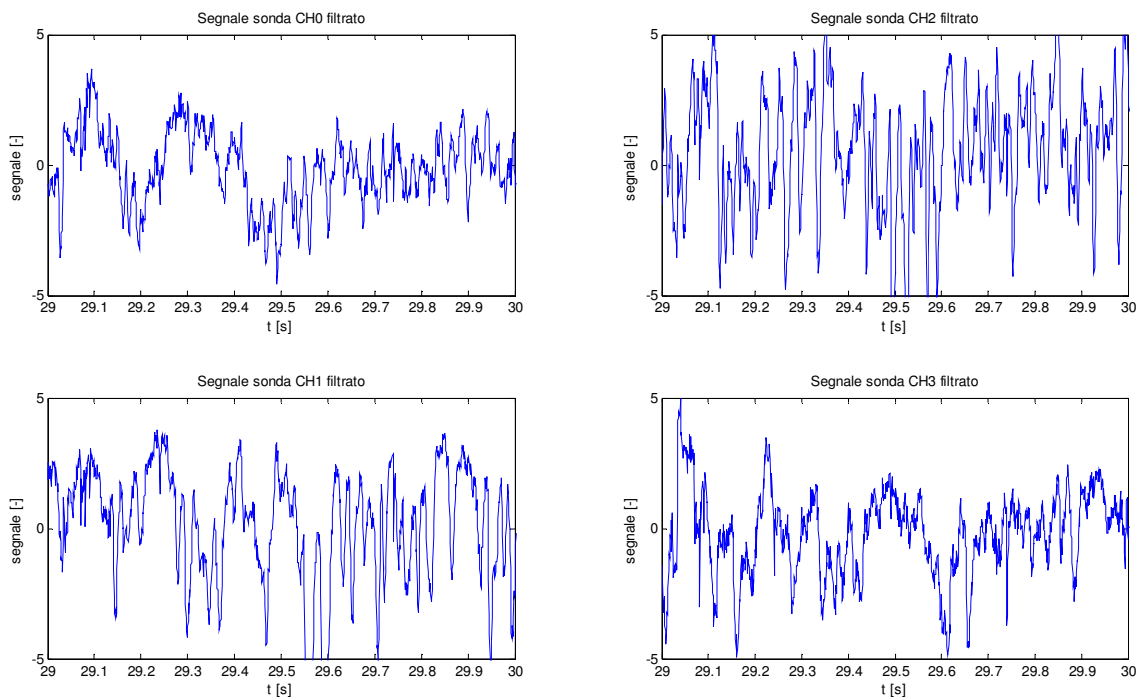


Figura 17: Dettaglio segnale prova con gas di trasporto azoto per prova a 1100°C, 6% di O₂, e particelle di carbone $38 < x < 90 \mu\text{m}$

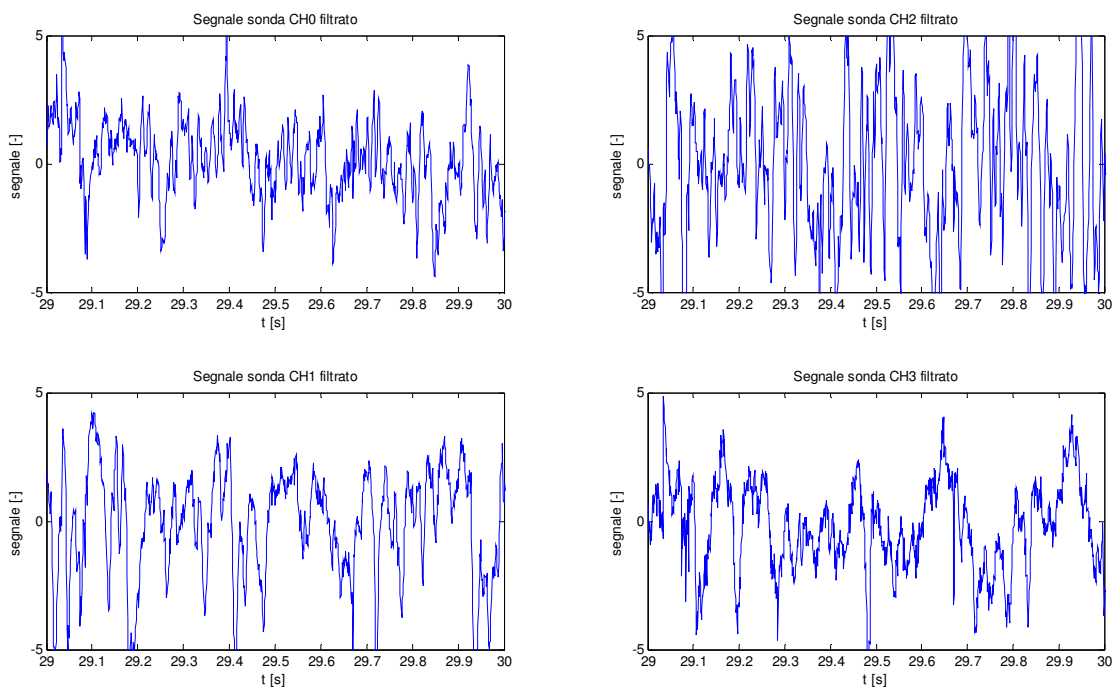


Figura 18: Dettaglio segnale prova con gas di trasporto azoto-aria per prova a 1100°C, 6% di O₂, e particelle di carbone $38 < x < 90 \mu\text{m}$

La presenza di ossigeno nel carrier è interessante nelle fasi iniziali, visto che per l'effetto del getto e della diffusione l'ossigeno dei fumi viene richiamato verso le particelle di carbone. Nelle vicinanze dell'immissione, tuttavia, l'unico ossigeno disponibile per l'ignizione è quello presente col carrier, perciò si deve focalizzare l'attenzione sul segnale della sonda CH₀, mentre il segnale delle altre sonde risulta inevitabilmente molto simile perché molto ossigeno è a quel punto disponibile. Nella prova con carrier azoto-aria il segnale della sonda CH₀ mostra una certa dinamica del segnale, che risulta invece minore nella prova con solo azoto. Questo conferma parzialmente le attese, anche se è opportuno osservare che in nessun caso si osservano dinamiche particolarmente importanti.

3.1.2. Prove pulsate e in transitorio ad alimentazione pulsata

3.1.2.1. Effetto della temperatura

Per confrontare prove a temperature operative diverse è necessario che siano identiche tutte le altre condizioni. Nel caso in esame le prove a 900°C sono state effettuate con carbone tal quale di granulometria elevata ($> 125 \mu\text{m}$) e con un eccesso di ossigeno nei fumi del precombustore del 6%. Come gas di trasporto è però stato utilizzato solo azoto, mentre nelle prove a 1100°C con stessa granulometria e concentrazione di ossigeno nei fumi è stata utilizzata sempre una miscela di azoto e aria tranne che in una singola prova in cui è stato utilizzato azoto solo. Una sola prova può essere insufficiente per essere considerata molto attendibile, ma se ne possono trarre alcune indicazioni. Ciò che si aspetta è una cinetica dei processi più veloce per temperature più elevate, discorso valido anche per devolatilizzazione e ossidazione del char. In effetti osservando i segnali delle prove si nota che le sonde poste nelle stesse posizioni a temperature diverse osservano fenomeni diversi. Infatti, considerando che una variazione negativa del segnale è attribuibile ad un assorbimento di radiazione da parte delle particelle di combustibile mentre una variazione positiva è dovuta ad un'emissione causata da ignizione di volatili o char, si può vedere come la variazione di temperatura tra le prove modifichi fortemente la dinamica del segnale registrato:

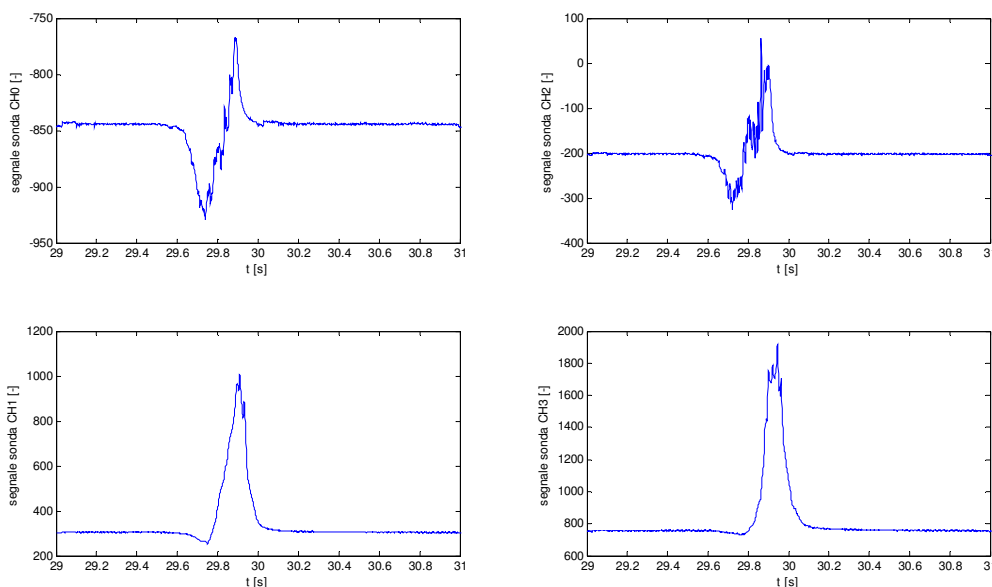


Figura 19: Dettaglio di segnale sonde a 1100°C per particelle coal SA t.q. >125 μm e 6% di O_2

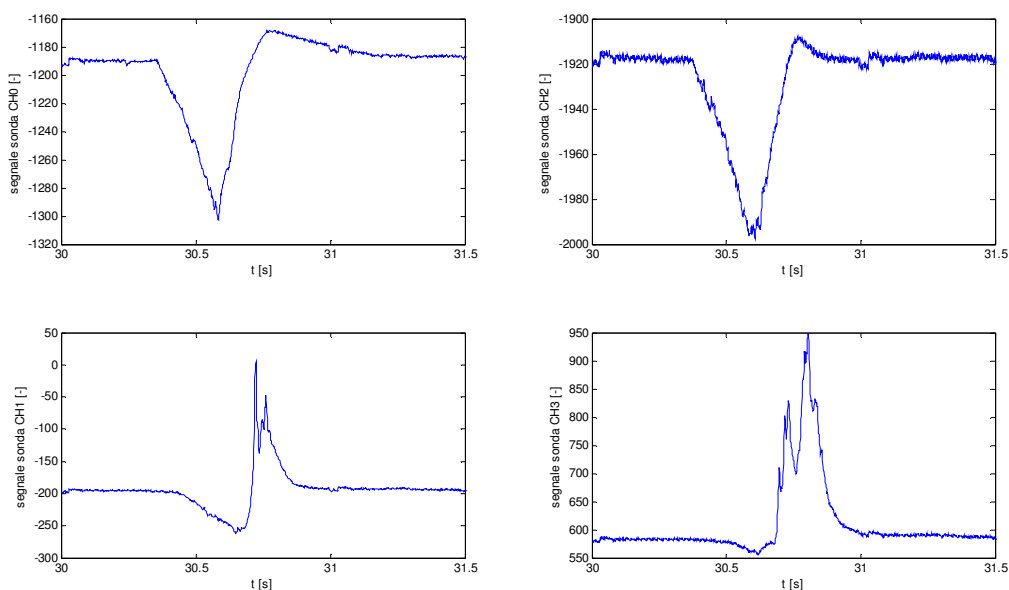


Figura 20: Dettaglio di segnale sonde a 900°C per particelle coal SA t.q. >125 μm e 6% di O_2

Come si può vedere nella prova a 1100°C la sonda CH0 registra un segnale negativo e solamente sul finire positivo (particelle più lente, maggiore tempo di permanenza), mentre le altre sonde registrano sostanzialmente un segnale positivo di emissione. Nelle prove a 900°C solamente le sonde CH1 e CH3, che sono le più lontane dal punto di immissione del carbone, registrano un'emissione, mentre le altre due sonde registrano un segnale di assorbimento. Questo conferma quanto atteso e già parzialmente osservato nelle prove ad alimentazione continua, ovvero che con l'aumentare della temperatura diminuiscono i tempi di inizio devolatilizzazione e ignizione del char perché la cinetica dei processi cresce. Nelle prove ad

alimentazione continua questo effetto era molto meno visibile e soprattutto nelle prove a 900°C la presenza del solo azoto come carrier rendeva più complessa l'osservazione. Nelle prove pulsate, invece, nonostante il carrier sia diverso si nota l'effetto atteso al variare della temperatura.

3.1.2.2. Effetto della concentrazione di ossigeno

Nelle prove ad alimentazione continua si è potuto osservare che al crescere della concentrazione di ossigeno nei fumi cresce la dinamica del segnale, come atteso visto che aumenta la quantità di ossigeno per l'ignizione. Dalle prove ad alimentazione continua è risultato molto difficile, tuttavia stabilire se l'emissione luminosa registrata nei segnali delle sonde sia dovuta all'ignizione dei volatili o del char, oppure se si "vedono" entrambi i fenomeni ma in sonde diverse. Per questo motivo risulta utile esaminare le prove ad alimentazione pulsata che sono nettamente più semplici. Come prima cosa si ricerca la conferma dell'incremento di dinamica del segnale al crescere della concentrazione di ossigeno a parità di altre condizioni. A tale proposito si riporta una serie di prove ad ossigeno variabile:

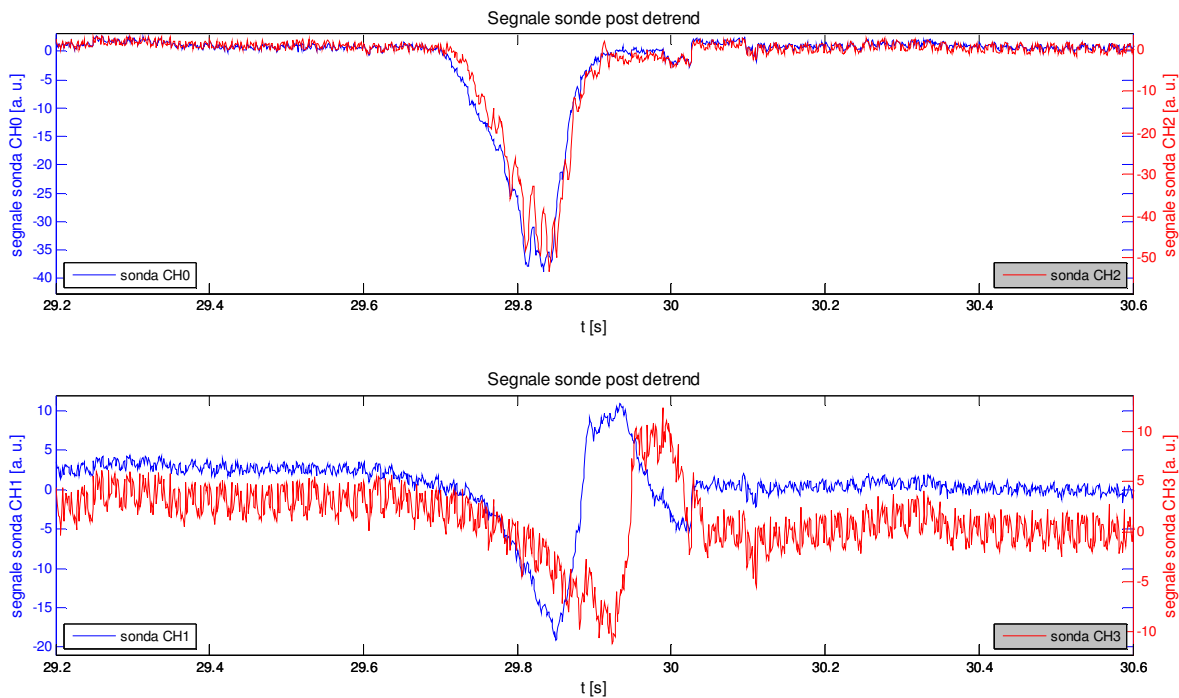


Figura 21: Dettaglio di segnale sonde a 0.7% di O₂ per particelle coal SA t.q. 38<x<90 µm e 1100°C

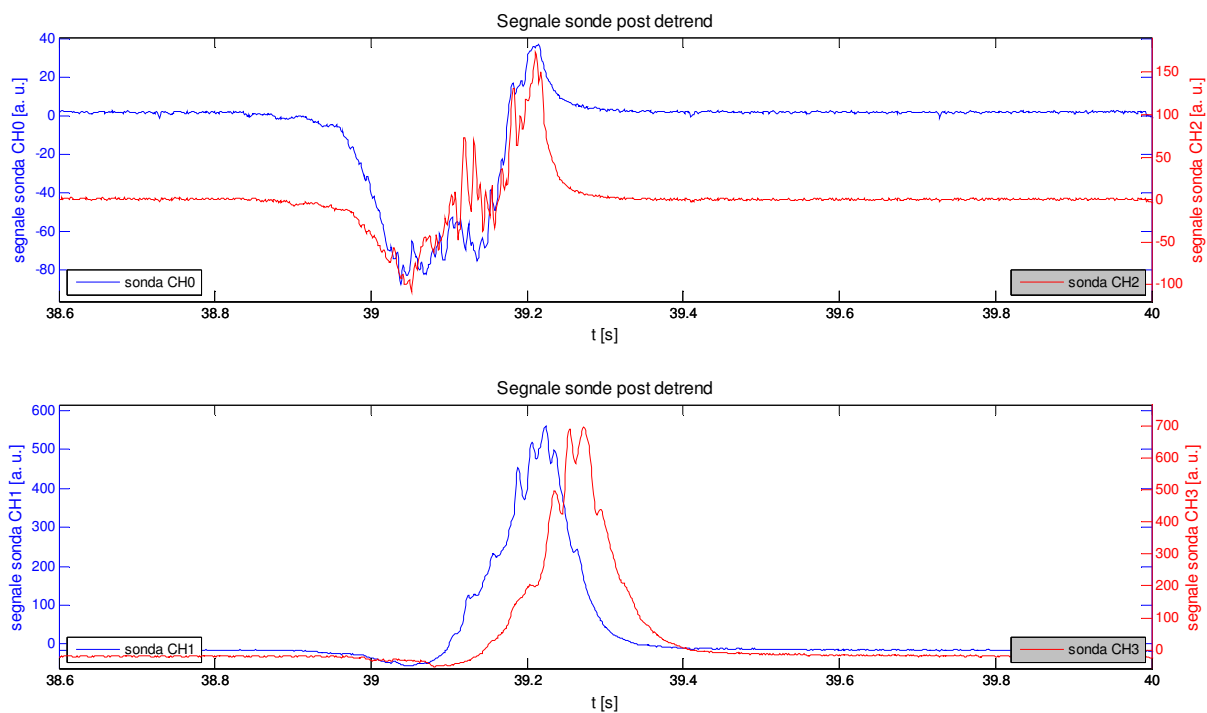


Figura 22: Dettaglio di segnale sonde a 3.3% di O₂ per particelle coal SA t.q. $38 < x < 90 \mu\text{m}$ e 1100°C

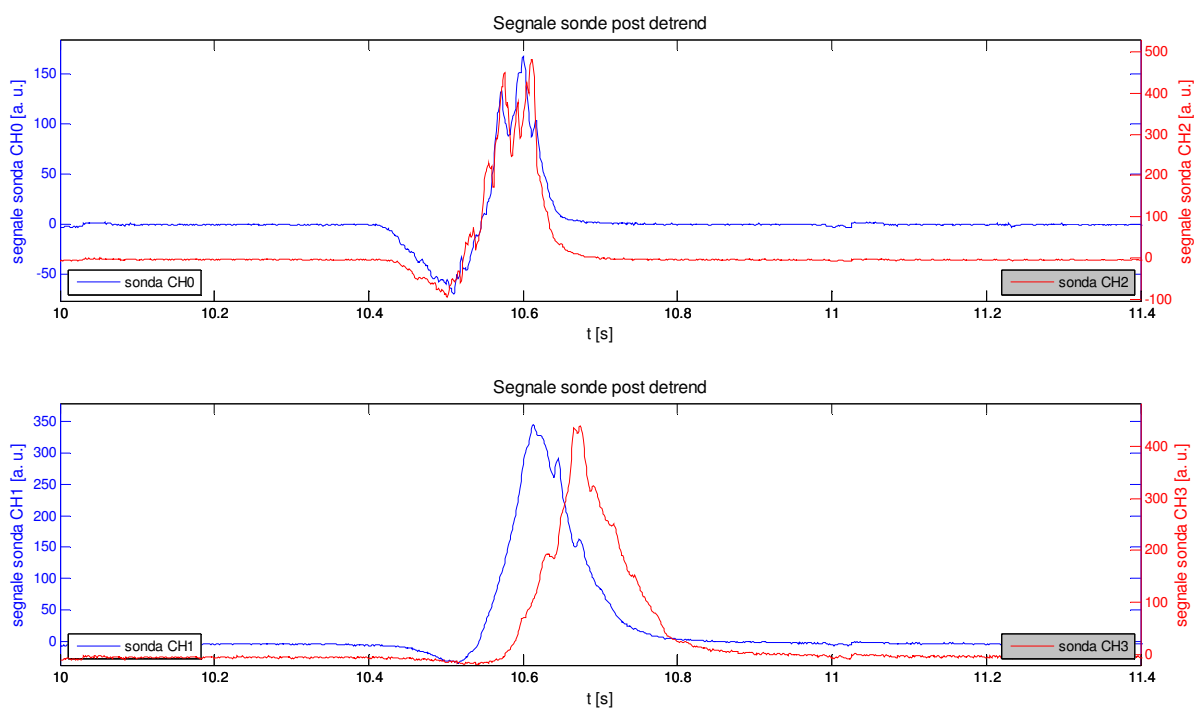


Figura 23: Dettaglio di segnale sonde a 6% di O₂ per particelle coal SA t.q. $38 < x < 90 \mu\text{m}$ e 1100°C

Dalle figure riportate si nota come nella prova allo 0.7% di ossigeno in eccesso nei fumi le sonde CH0 e CH2 registrino un segnale di solo assorbimento, mentre le altre due vedono un'emissione. Nella prova al 3.3% solamente la sonda CH0 vede assorbimento per quasi tutto il tempo mentre le altre registrano un'emissione, nella prova al 6% invece praticamente tutte le sonde segnalano un'emissione. Ne deriva che l'ignizione è favorita per alte concentrazioni di ossigeno, nel senso che la devolatilizzazione non è influenzata da questa variabile operativa, ma per basse concentrazioni i volatili espulsi non igniscono e quindi non si registra un segnale positivo. Questo conferma quanto osservato nelle prove ad alimentazione continua, ma dalle prove pulsate si possono ottenere altre informazioni. Le immagini riportate sono per prove con particelle di carbone da $38 < x < 90 \mu\text{m}$. Si nota che nelle prove allo 0.7% e al 3.3% il segnale registrato è più intenso per la sonda CH3, seguita dalla CH1. nella prova al 6%, invece, il segnale più intenso è registrato dalla sonda CH1, seguito dalla CH3 e dalla CH2. E' interessante notare questo fatto e confrontarlo con un altro segnale registrato in una prova a condizioni diverse (900°C , 6% di ossigeno nei fumi, particelle $>125 \mu\text{m}$ e carrier azoto) in cui la sonda CH2 è posta sul fondo del reattore e registra tutta l'evoluzione delle particelle di carbone alimentate in modo pulsato dall'immissione al fondo del reattore:

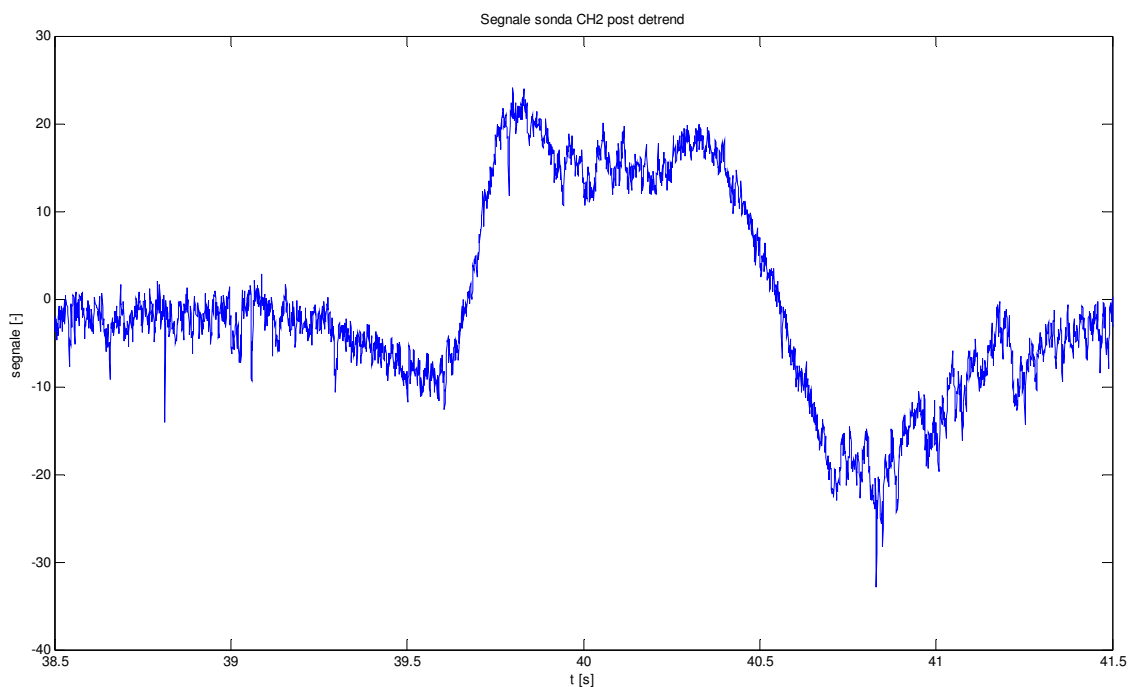


Figura 24: Storia delle particelle di carbone dall'immissione all'uscita dal reattore per prova a 6% di O_2 , particelle coal SA t.q. $>125 \mu\text{m}$ e 900°C

Come si può vedere, e come già descritto in letteratura (Shaddix e Molina, 2007), si registra un primo picco di emissione dovuto all'ignizione dei volatili e un secondo picco non molto distinto dovuto alla parziale ossidazione del char. Questo aspetto è molto interessante, perché evidenzia come il segnale emesso e dovuto a ignizione dei volatili sia più intenso di quello

dovuto all'ossidazione del char e come sia presente una zona intermedia tra i due picchi in cui si ha segnale luminoso registrato dovuto alla simultanea sovrapposizione dei due effetti. Questo fatto si riscontra nel segnale registrato dalle quattro sonde nella prova al 6% di ossigeno a 1100°C con granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$. Si potrebbe pensare, infatti, che la sonda CH1 rilevi un segnale elevato dovuto al picco dell'ignizione dei volatili, mentre la sonda CH3 rileva l'abbassamento del segnale prima dell'ossidazione del char. Le particelle non devolatilizzano tutte nello stesso istante poiché il tempo necessario alla devolatilizzazione dipende dalla granulometria (le particelle alimentate rientrano in un range abbastanza ampio) e dal tempo di permanenza nel reattore che dipende dal profilo di velocità interno al reattore delle particelle. Si potrebbe pensare che le ultime sonde (CH1 e CH3) registrino un segnale di emissione dovuta all'ignizione dei volatili, mentre l'ossidazione del char avviene a tempi maggiori con distanze dall'immissione che superano l'ultima sonda. In tal caso solo la ripetizione delle prove posizionando più sonde potrebbe permettere di indagare meglio il processo.

3.1.2.3. Effetto della granulometria del combustibile

Dalle prove ad alimentazione continua era emerso come la granulometria del carbone alimentato influisca sui tempi di inizio ignizione, nel senso che per granulometria minore il tempo è inferiore. Dalle prove pulsate si deve, per prima cosa, avere conferma di questa indicazione e cercare di ottenere anche delle informazioni supplementari. Si confrontano segnali registrati in prove a stessa concentrazione di ossigeno, stessa temperatura (1100°C) e stesso carrier (misto azoto- aria) e diversa granulometria del carbone:

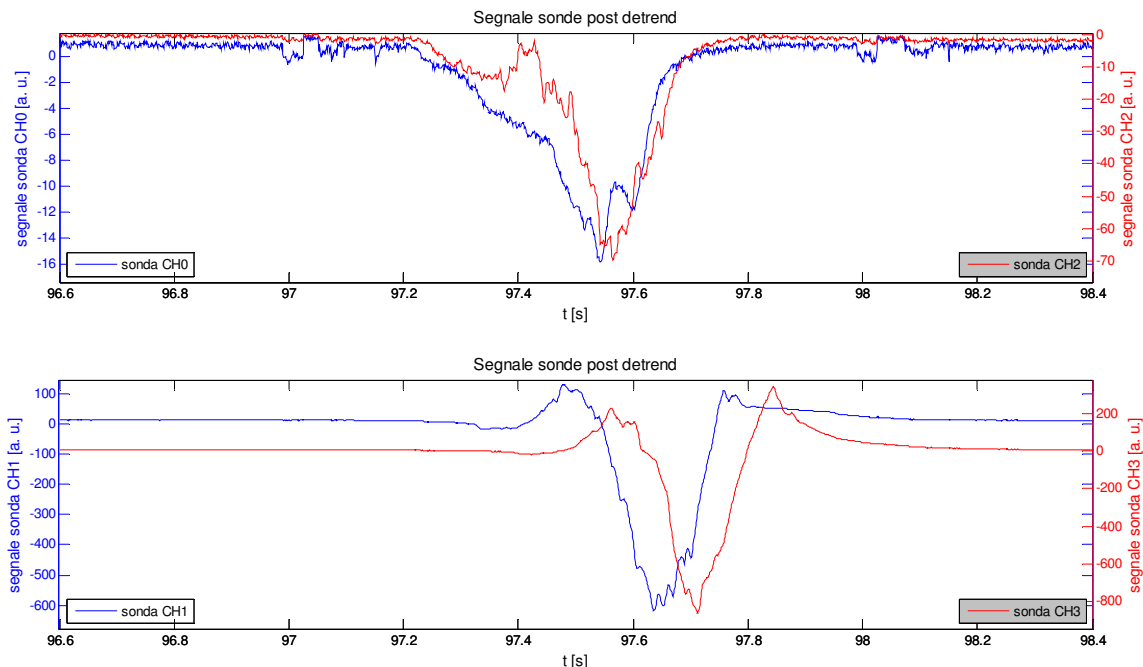


Figura 25: Dettaglio di segnale sonde a 0.5% di O₂ per particelle coal SA t.q. >125 µm e 1100°C

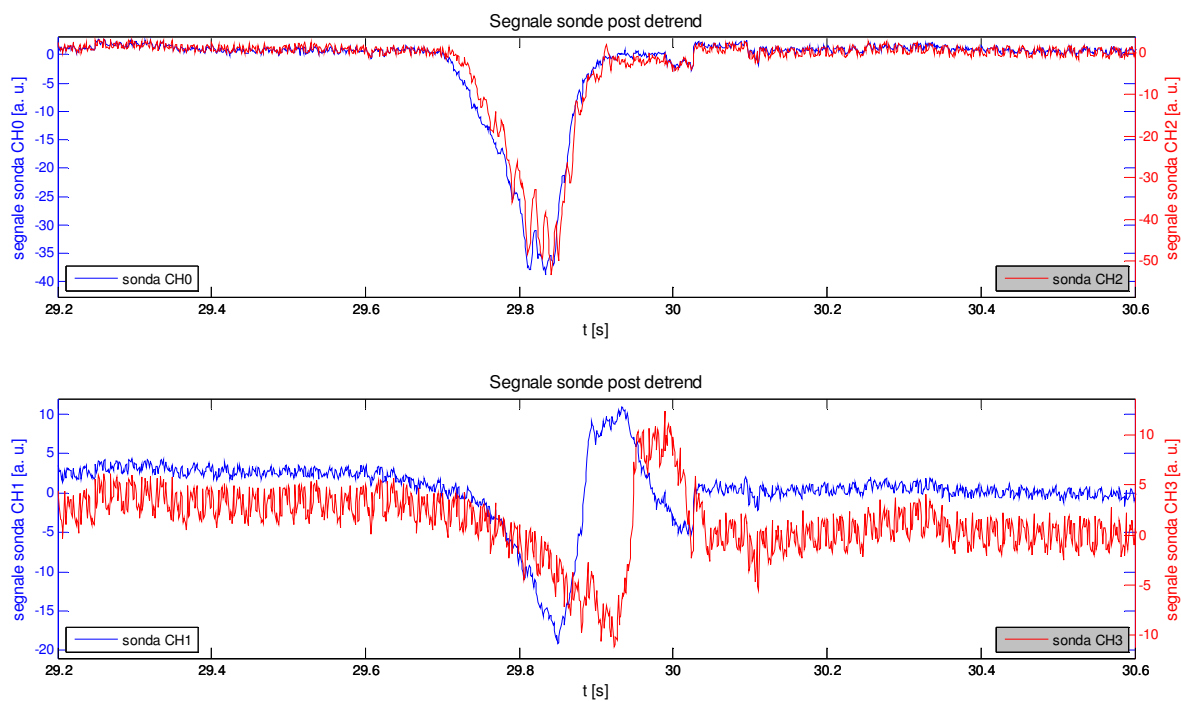


Figura 26: Dettaglio di segnale sonde a 0.7% di O₂ per particelle coal SA t.q. 38<x<90 µm e 1100°C

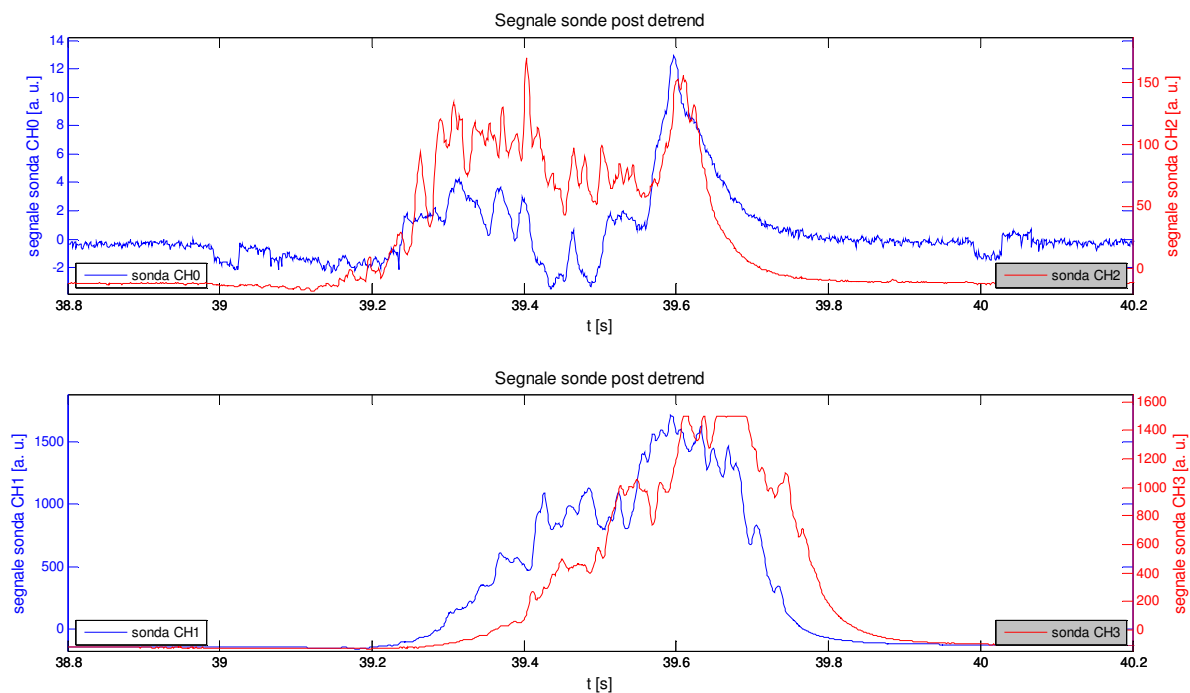


Figura 27: Dettaglio di segnale sonde a 3.3% di O₂ per particelle coal SA t.q. >125 µm e 1100°C

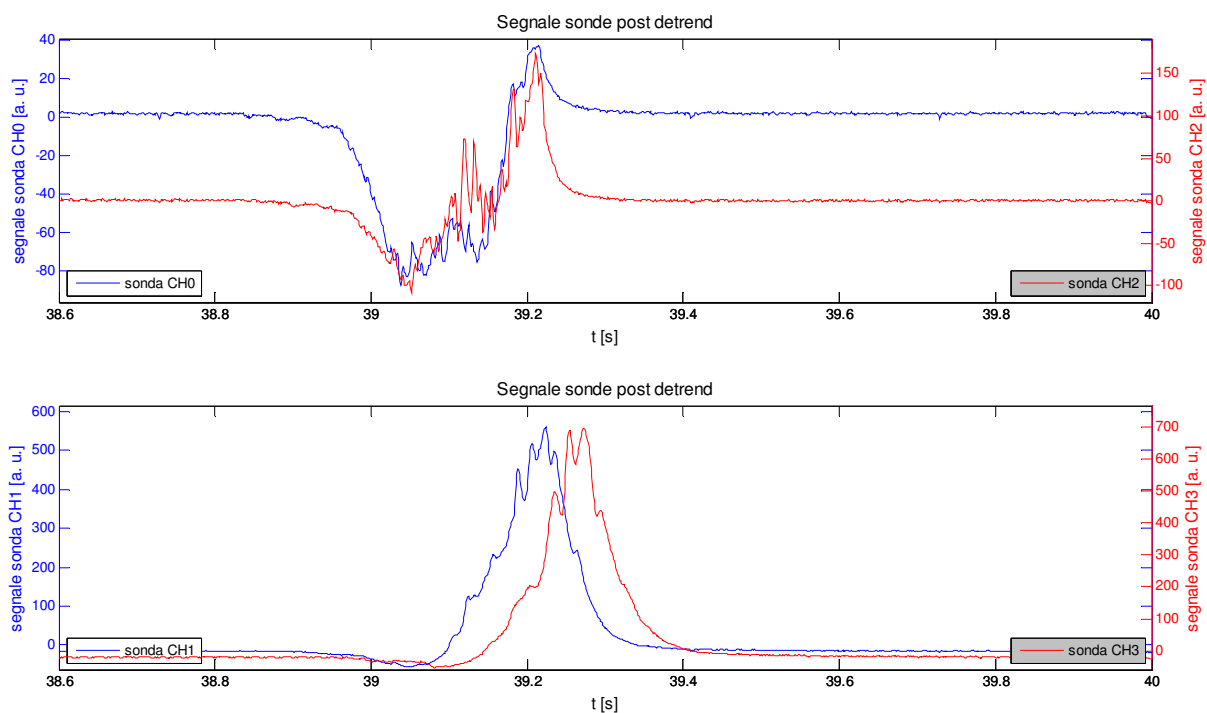


Figura 28: Dettaglio di segnale sonde a 3.3% di O₂ per particelle coal SA t.q. $38 < x < 90$ µm e 1100°C

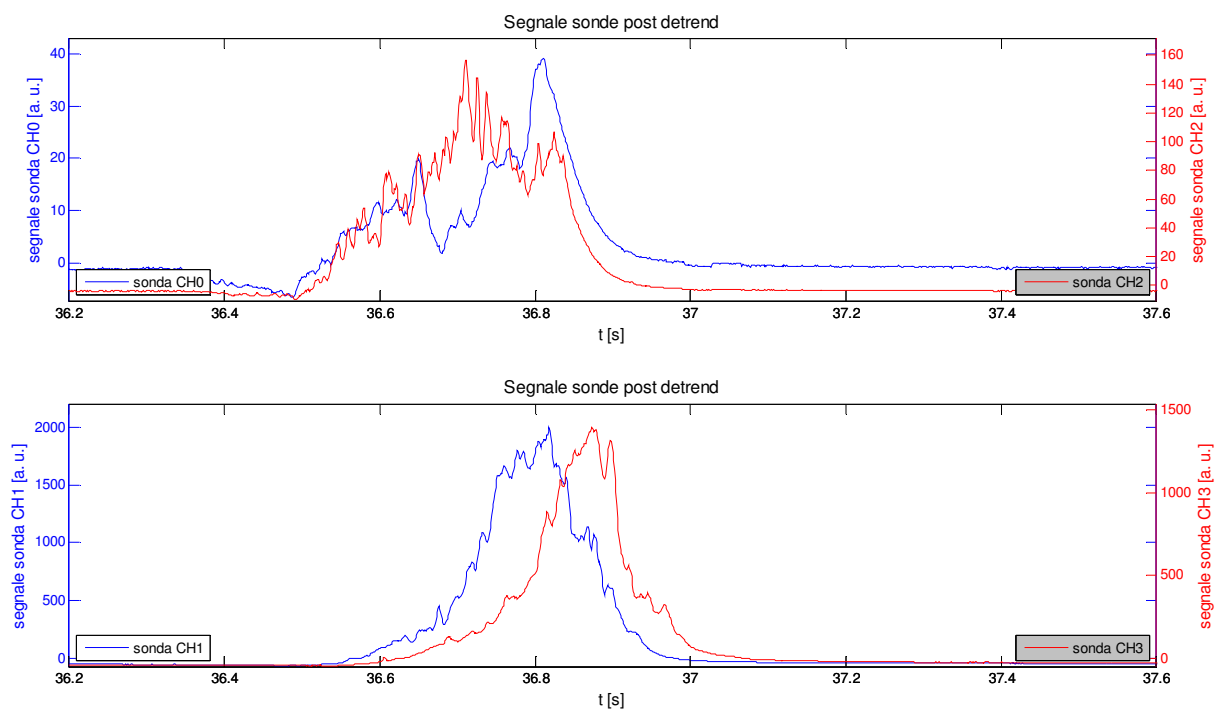


Figura 29: Dettaglio di segnale sonde a 6.6% di O₂ per particelle coal SA t.q. >125 µm e 1100°C

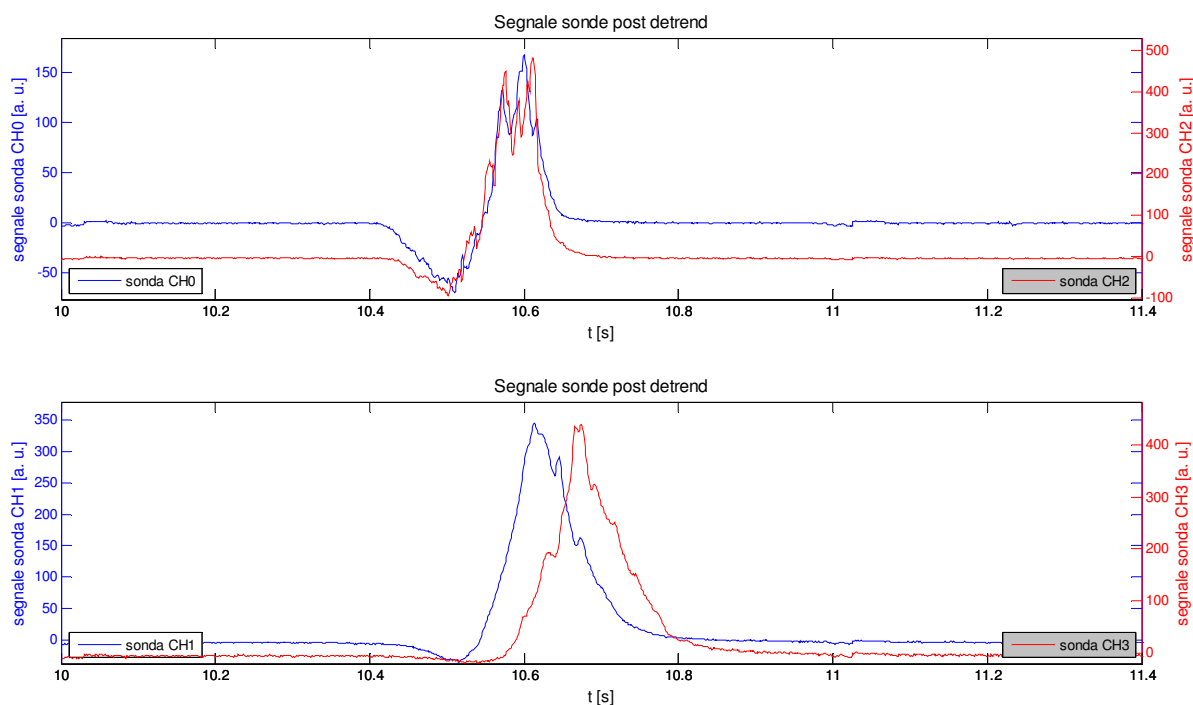


Figura 30: Dettaglio di segnale sonde a 6% di O₂ per particelle coal SA t.q. $38 < x < 90$ µm e 1100°C

La storia termica delle particelle è fortemente influenzata dalla loro granulometria, poiché particelle più piccole raggiungono più velocemente le elevate temperature di bulk. A questo proposito si può notare come a parità di ogni altra condizione il segnale rilevato dalle sonde al variare della granulometria del carbone sia diverso. In particolare si può vedere come nelle prove allo 0% nominale di ossigeno in eccesso nei fumi il segnale per le sonde CH0 e CH2 sia in entrambi i casi di assorbimento (nella prova a granulometria elevata il segnale della sonda CH0 sembra abbastanza piatto, in realtà è negativo), mentre il segnale delle altre due sonde differisca notevolmente. Nel caso della granulometria minore ($38 < x < 90$ µm) le sonde CH1 e CH3 rilevano un segnale positivo di emissione, nel caso invece di granulometria elevata (>125 µm) il segnale è particolare perché mostra un inizio e una fine positivi e una parte centrale preponderante negativa. In questo caso probabilmente le sonde vedono un'ignizione dei volatili solamente per due classi di particelle: le particelle lente che hanno una bassa velocità con maggiore tempo di residenza e quindi percorrono distanze inferiori a parità di tempo mostrando già in queste sonde ignizione (che altrimenti probabilmente avviene più in basso) e le particelle piccole (al limite del range di granulometria) che vengono trascinate col flusso del gas ed essendo piccole si riscaldano e devolatilizzano prima trovando ignizione. Ovviamente

questa è solamente un'ipotesi che necessita di conferme. Resta, tuttavia, il dato di fatto che le prove con carbone di granulometria minore mostrano un'evidente emissione luminosa per ignizione dei volatili nelle ultime due sonde, mentre per la granulometria maggiore questo effetto è scarsamente presente visto che la maggioranza delle particelle è in condizioni di assorbimento. Un confronto simile si può fare anche per le prove al 3% nominale di ossigeno in eccesso nei fumi, esaminando la diversa dinamica dei segnali. In questo caso si ottengono delle sorprese: il segnale della sonda CH0 è negativo per la prova a granulometria piccola mentre è sostanzialmente positivo (si vede male dalla figura) per la granulometria grande, il segnale della sonda CH2 è sempre positivo per la granulometria grande mentre è positivo solo alla fine per la granulometria piccola e il segnale delle sonde CH1 e CH3 è positivo in entrambi i casi ma nella granulometria elevata è più intenso per la sonda CH1 mentre per la granulometria inferiore è più intenso per la CH3. Partendo da queste semplici osservazioni si possono trarre alcuni spunti: per quanto riguarda il segnale della sonda CH3 nelle prova a granulometria elevata si nota come esso in realtà abbia un massimo piatto, ciò vuol dire che nella fase di acquisizione del segnale nel tratto considerato eccedeva l'intervallo in cui è stata effettuata la compensazione e quindi è stato "tagliato" oltre il valore massimo scelto. Quindi non è possibile, in realtà, stabilire l'intensità massima esatta di tale picco, potrebbe superare il picco della CH1 oppure no. Perciò è più corretto notare come in entrambe le prove le sonde CH1 e CH3 mostrino forti segnali di emissione dovuti a ignizione dei volatili. Per quanto riguarda il segnale della sonda CH2 nella prova a granulometria inferiore si può considerare che le particelle più veloci al momento del passaggio davanti alla sonda non avessero ancora subito ignizione dei volatili, mentre le particelle più lente per cui il tempo di permanenza è maggiore mostrino questo fenomeno. È tuttavia difficile comprendere perché nella prova a granulometria superiore il segnale della sonda CH2 sia interamente positivo. Stesso discorso per il segnale della sonda CH0, l'assorbimento registrato nella prova a bassa granulometria è in linea con le attese, mentre l'emissione nella prova ad alta granulometria sfugge alla logica comprensione. Resta da notare che in queste condizioni siano state effettuate due sole prove per tipo (una ad alimentazione pulsata ed una in transitorio) e quindi è difficile considerare troppo attendibili i risultati. Un ultimo confronto può essere fatto tra le prova al 6% di ossigeno in eccesso nei fumi. In questo caso i segnali delle quattro sonde risultano in entrambi i casi sostanzialmente positivi (le sonde CH0 e CH2 hanno un inizio negativo). Il segnale più intenso è per la sonda CH1, perciò in entrambi i casi il picco d'intensità dell'emissione per ignizione dei volatili viene registrato a questa distanza dall'emissione. È probabile che se fossero presenti altre sonde si potrebbe seguire l'inizio dell'ossidazione del char con intensità maggiori per la granulometria inferiore visto che dalle analisi con TGA è emerso che queste prove hanno una maggiore conversione di devolatilizzazione dovuta a parziale ossidazione del char.

3.1.2.4. Effetto dell'oxycombustione

Due prove in transitorio ad alimentazione pulsata sono state effettuate passando da combustione volumetrica a oxycombustione nel precombustore o viceversa. È interessante notare l'effetto sui segnali delle sonde nei due ambienti di lavoro. Si riporta per esempio la prova con ingresso in oxycombustione esaminando i segnali delle sonde CH1 e CH3 prima e dopo (le sonde CH0 e CH2 sono nel precombustore).

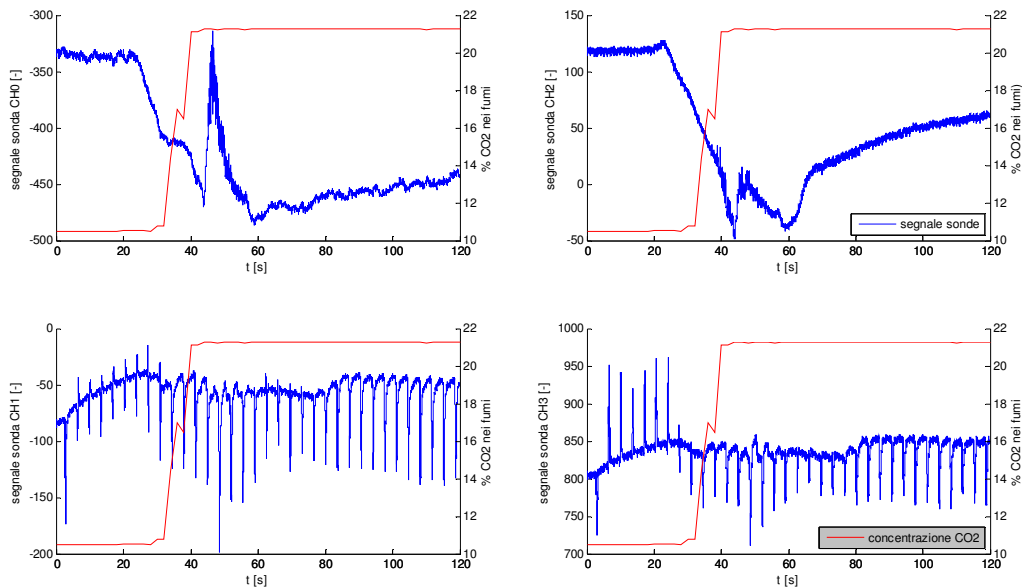


Figura 31: Transitorio da combustione volumetrica a oxycombustione in prova a 0.5% di O₂ per particelle coal SA t.q. >125 μ m e 900°C

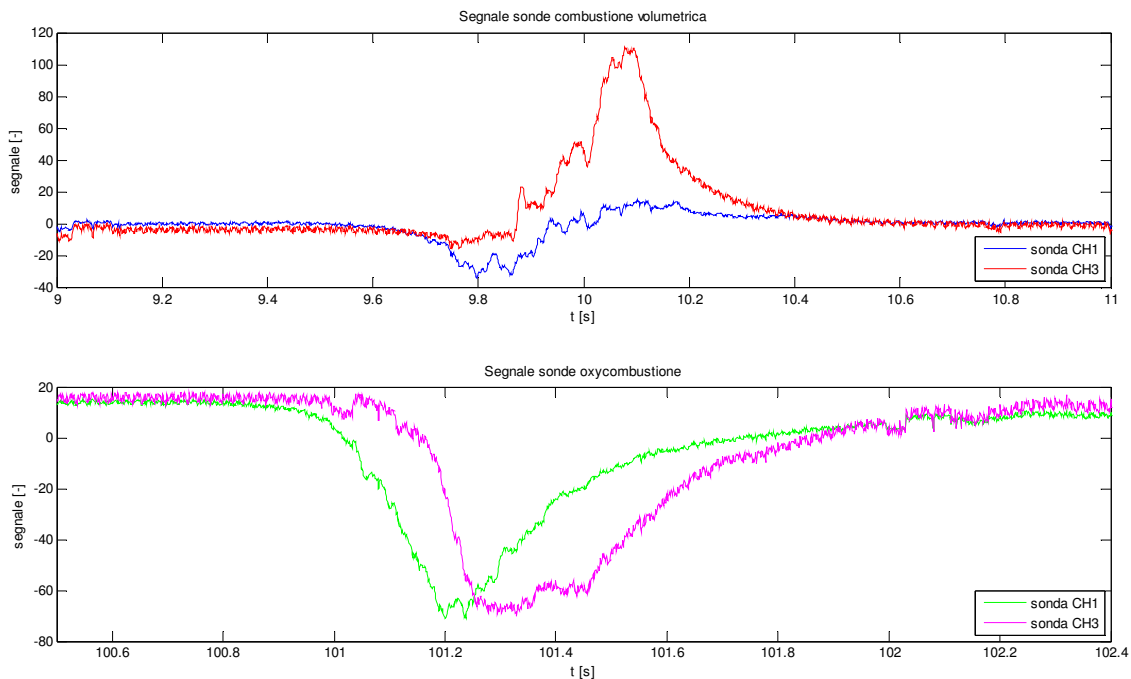


Figura 32: Variazione segnale sonde da combustione volumetrica a oxycombustione in prova a 0.5% di O₂ per particelle coal SA t.q. >125 µm e 900°C

Come si può vedere passando da combustione volumetrica ad oxycombustione nel precombustore il segnale registrato dalle sonde si modifica completamente. Il segnale della sonda CH1 mostra in combustione volumetrica una dinamica iniziale di assorbimento ed una fine in emissione, mentre la sonda CH3 registra sempre emissione. Passando ad oxycombustione, invece, entrambi i segnali diventano negativi, perciò di assorbimento. Da questa semplice osservazione, per altro confermata anche esaminando la prova a transitorio inverso, emerge come il passaggio ad oxycombustione riduca la reattività delle particelle di carbone. In pratica si confermerebbe la teoria di Shaddix e Molina secondo cui l'ambiente di oxycombustione, a parità di ogni altra condizione, riduce la reattività del carbone. Questo risultato era già stato evidenziato, ma sotto forma di un'attenuazione del segnale, dall'esame delle prove ad alimentazione continua. Si ottiene perciò una conferma ed un ampliamento di quanto precedentemente osservato.

3.1.2.5. Effetto del gas di trasporto

L'effetto del gas di trasporto nelle prove ad alimentazione continua era stato indagato individuando come la sonda CH0 mostrasse un segnale più dinamico se il carrier è costituito da azoto e aria. Si ripete il confronto analizzando prove ad alimentazione pulsata. Si riportano i segnali di prove a 1100°C con carbone di granulometria piccola ($38 < x < 90$ µm) e 6% di ossigeno nei fumi, mentre varia il carrier.

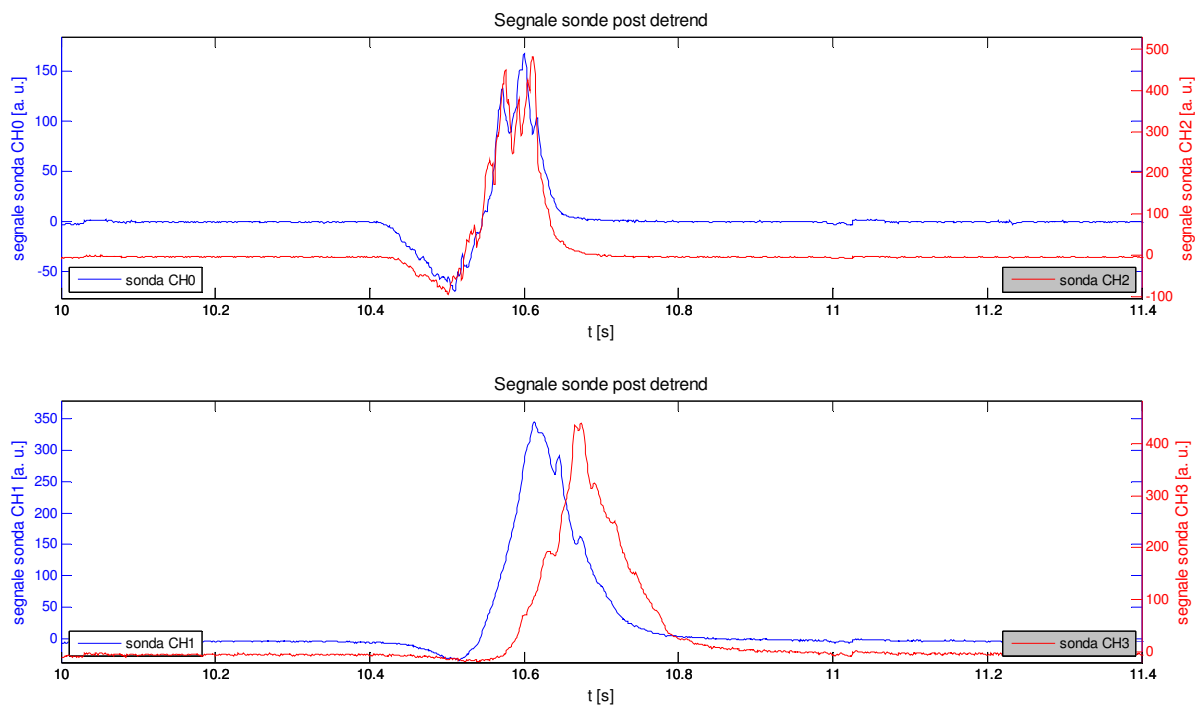


Figura 33: Dettaglio segnale prova con gas di trasporto azoto- aria per prova a 1100°C, 6% di O_2 , e particelle di carbone $38 < x < 90 \mu m$

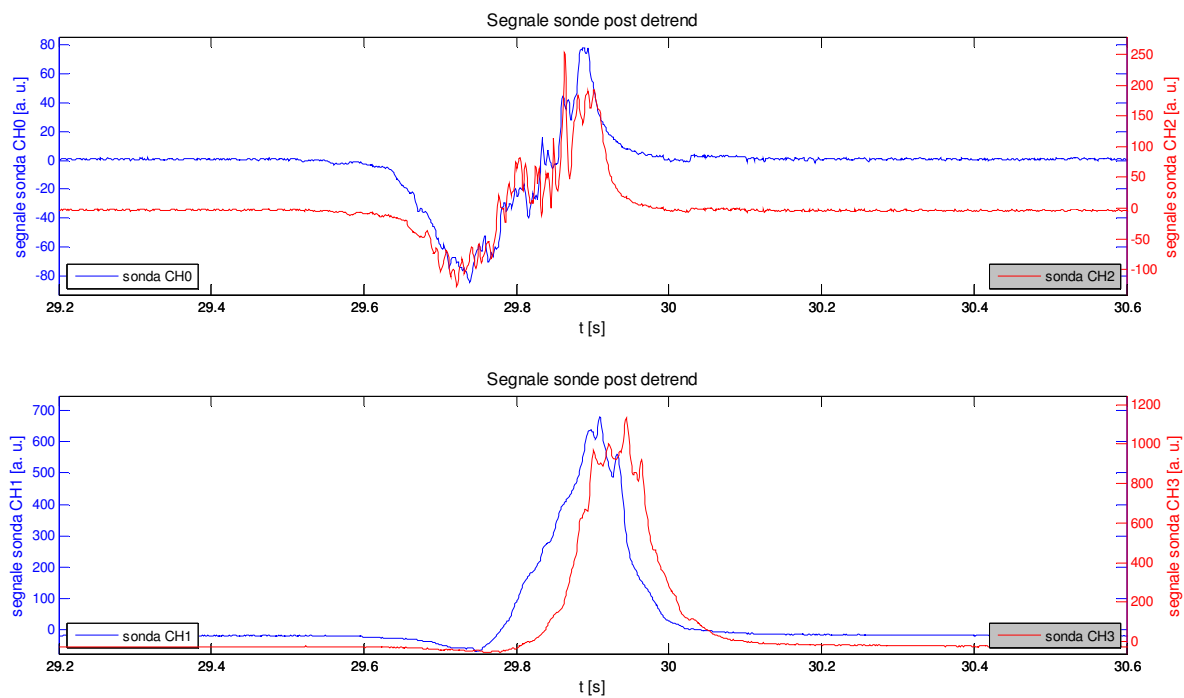


Figura 34: Dettaglio segnale prova con gas di trasporto azoto per prova a 1100°C, 6% di O_2 , e particelle di carbone $38 < x < 90 \mu m$

Dal confronto tra i segnali delle due prove si evidenzia come i segnali delle sonde abbiano grossomodo la stessa dinamica dal punto di vista della forma del segnale. Si nota, tuttavia, che il segnale delle sonde CH0 e CH2 nella parte finale di emissione è più intenso in presenza d'aria nel carrier, in particolare l'intensità del segnale è più simile a quella delle altre due sonde. Ciò potrebbe confermare come nella fase iniziale (specie quindi per la sonda CH0) la presenza di ossigeno nel carrier aiuti l'ignizione dei volatili che in tal caso risulta significativa, mentre in caso di solo azoto è appena accennata. Si nota, invece, come i livelli delle sonde CH1 e CH3 restino circa invariati, scambiandosi nel massimo di intensità (in realtà nei vari pulse registrati a volte prevale il picco CH1 e altre volte il CH3, senza un trend preciso). Il segnale delle ultime due sonde, tuttavia, è poco interessante poiché a tale distanza per effetto getto e per diffusione c'è ampia disponibilità di ossigeno in entrambi i casi.

3.2. Char di carbone

Riassumendo per le prove di questo tipo si sono ottenuti i seguenti tipi di segnali per le sonde messe nelle varie porte al variare delle condizioni operative:

Granulometria (μm)	Carrier	Porta 6	Porta 7	Porta 8	Porta 9
$90 < x < 125$	Azoto- aria	assorbimento	assorbimento	assorbimento-emissione	emissione
$45 < x < 90$	Azoto- aria	assorbimento	assorbimento	assorbimento-emissione	assorbimento-emissione

3.2.1. *Prove continue e in transitorio ad alimentazione continua*

3.2.1.1. Effetto della granulometria del combustibile

Le prove sono state condotte tutte alle medesime condizioni di temperatura (1100°C) e concentrazione di ossigeno nominale nei fumi (6%), sono state variate solamente la granulometria del combustibile e la composizione del gas di trasporto. Per quanto riguarda l'effetto della granulometria si analizzano le due taglie $45 < x < 90 \mu\text{m}$ e $90 < x < 125 \mu\text{m}$. Si riportano di seguito andamenti di 1 secondo per prove a diversa granulometria e carrier misto di aria e azoto:

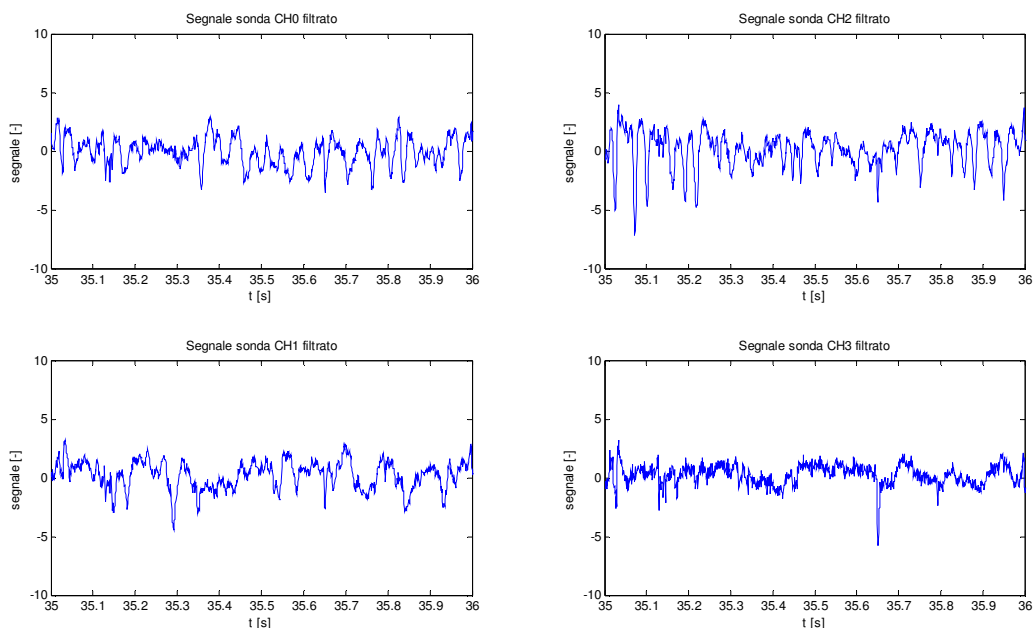


Figura 35: Dettaglio di segnale sonde per particelle char SA $90 < x < 125 \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.2% di O_2

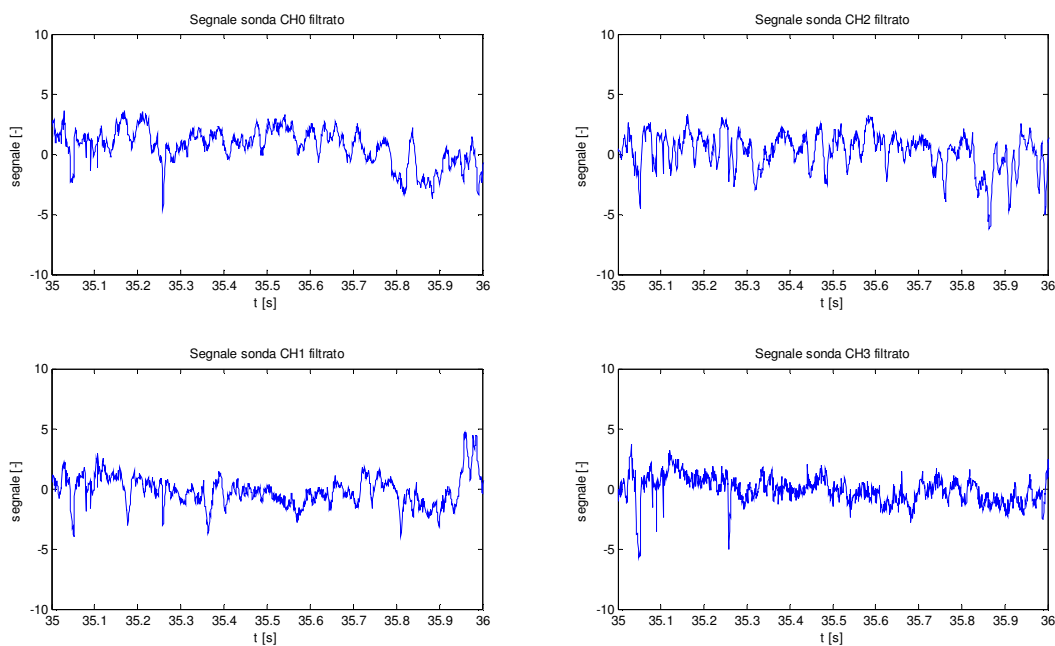


Figura 36: Dettaglio di segnale sonde per particelle di char SA $45 < x < 90 \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.2% di O_2

Da un esame degli andamenti del segnale registrati dalle varie sonde nelle due prove non si evince nulla di particolare: non si notano infatti dinamiche particolarmente rilevanti o differenze nei segnali delle due prove. Osservando questi segnali sembrerebbe che in realtà le sonde non vedano nulla di rilevante, ovvero nessun fenomeno di ossidazione del char. Secondo questa ipotesi l'ignizione potrebbe essere successiva al passaggio davanti alla sonda CH3, ma è conveniente riprendere il discorso con le corrispondenti prove pulsate.

3.2.1.2. Effetto del gas di trasporto

Si confrontano prove in cui la temperatura, la concentrazione di ossigeno e la granulometria del char sono identiche mentre varia la composizione del carrier. Si riporta per esempio il dettaglio dell'andamento del segnale per due prove a granulometria piccola ($45 < x < 90 \mu\text{m}$) con diverso gas di trasporto:

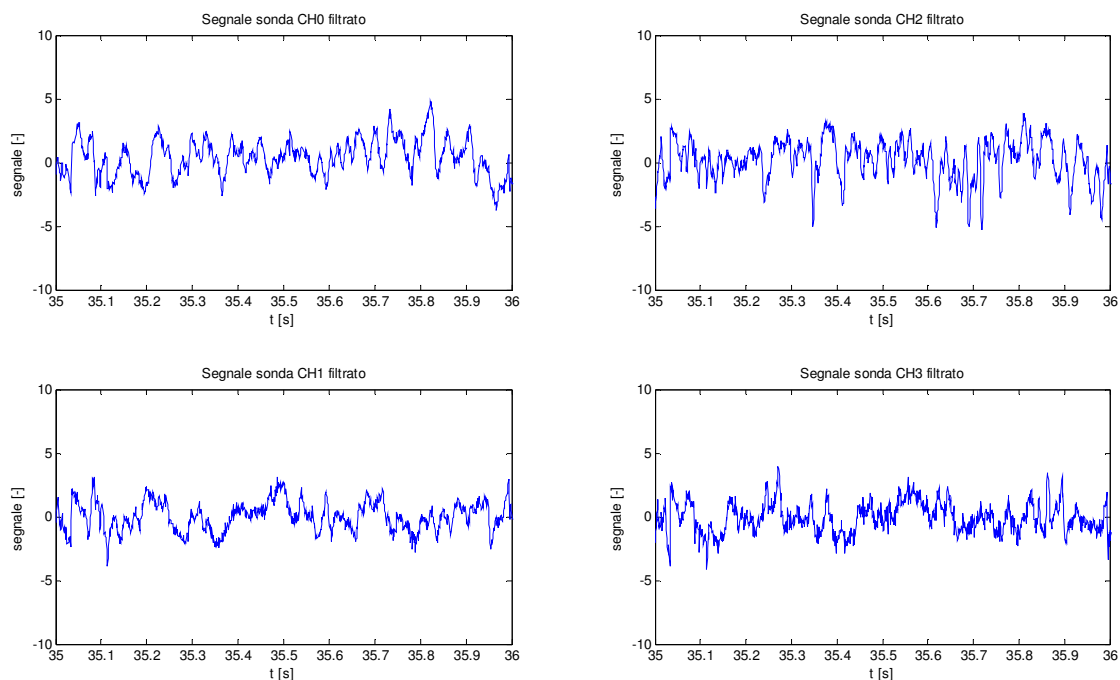


Figura 37: Dettaglio di segnale sonde con carrier azoto per particelle char SA $45 < x < 90 \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.2% di O_2

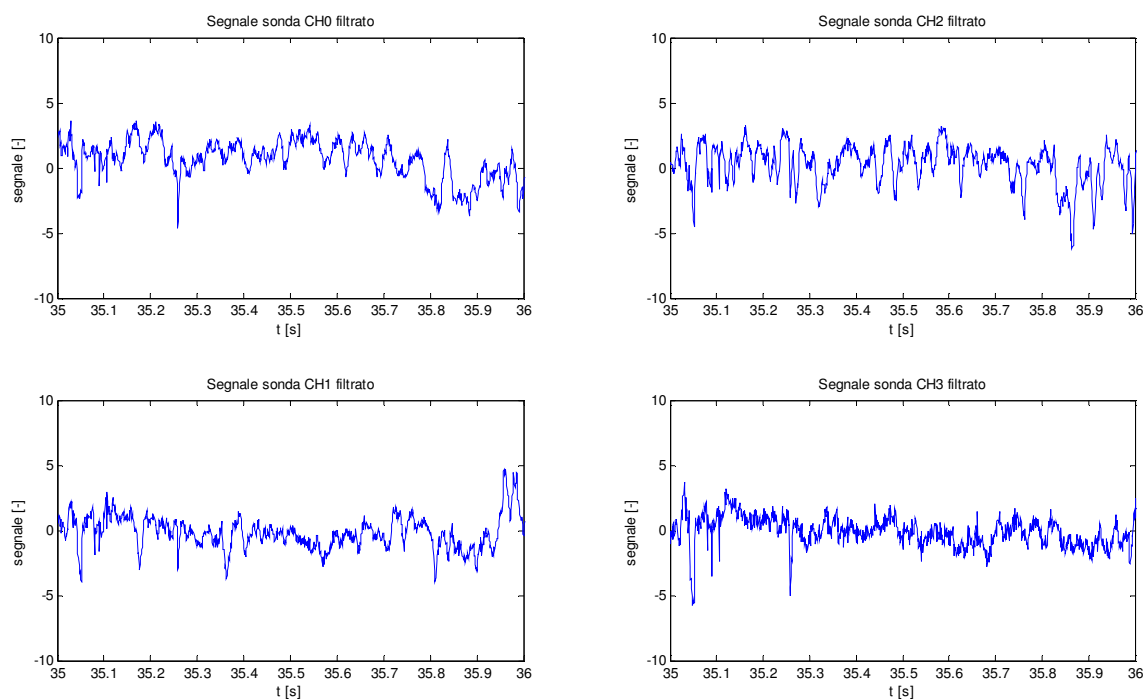


Figura 38: Dettaglio di segnale sonde con carrier azoto- aria per particelle char SA $45 < x < 90 \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.2% di O_2

Anche in questo caso non si osservano dinamiche significative nei segnali o variazioni tra le due prove, come si osserva anche cambiando granulometria. Si possono considerare due possibili spiegazioni: come ipotizzato precedentemente non si ha ancora ignizione del char nel tratto di reattore monitorato oppure l'assenza di ossigeno nel carrier nel caso di ossidazione del char è irrilevante visto che il fenomeno di combustione è eterogeneo e quindi il tempo di diffusione dell'ossigeno dal bulk alla particella non rappresenta lo stadio controllante. Se, infatti, l'ossidazione del char ha un tempo caratteristico per avvenire più lungo rispetto alla devolatilizzazione (e ciò è dimostrato in letteratura) è possibile che per quando l'ignizione avviene il fatto che il carrier contenga o meno ossigeno in partenza sia irrilevante visto che a quel punto c'è ossigeno a sufficienza (per effetto getto e diffusione dal bulk). Anche questo aspetto deve essere approfondito esaminando le prove ad alimentazione pulsata.

3.2.2. Prove pulsate e in transitorio ad alimentazione pulsata

3.2.2.1. Effetto della granulometria del combustibile

Come già detto in precedenza la differenza di granulometria influenza il tempo di riscaldamento delle particelle, si deve però considerare che lo stadio lento dell'ossidazione del char è la reazione stessa poiché è eterogenea, perciò la velocità di riscaldamento è meno importante che in devolatilizzazione. Inoltre i due range di granulometria esaminati sono abbastanza simili ($45 < x < 90 \mu\text{m}$ e $90 < x < 125 \mu\text{m}$) mentre nelle prove di devolatilizzazione erano piuttosto diversi ($38 < x < 90 \mu\text{m}$ e $> 125 \mu\text{m}$). È lecito, dunque, aspettarsi delle differenze meno marcate. Si riportano due esempi del segnale registrato dalle sonde nelle prove a diversa granulometria:

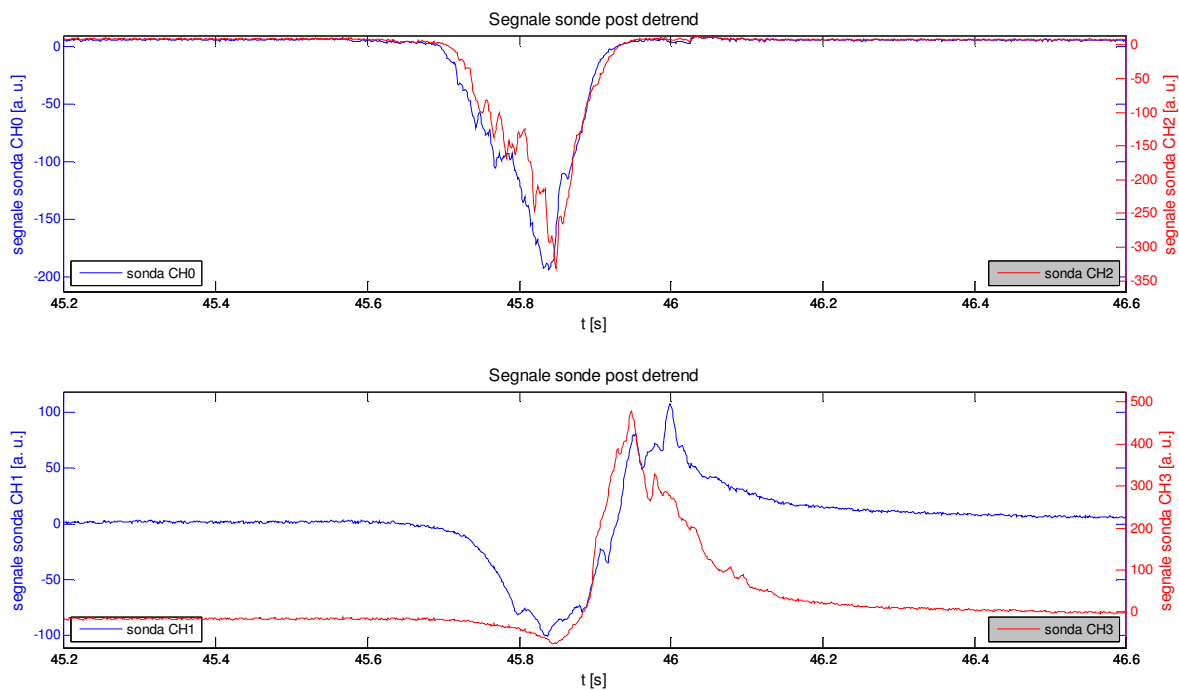


Figura 39: Segnale sonde per particelle char SA $90 < x < 125 \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.0% di O_2

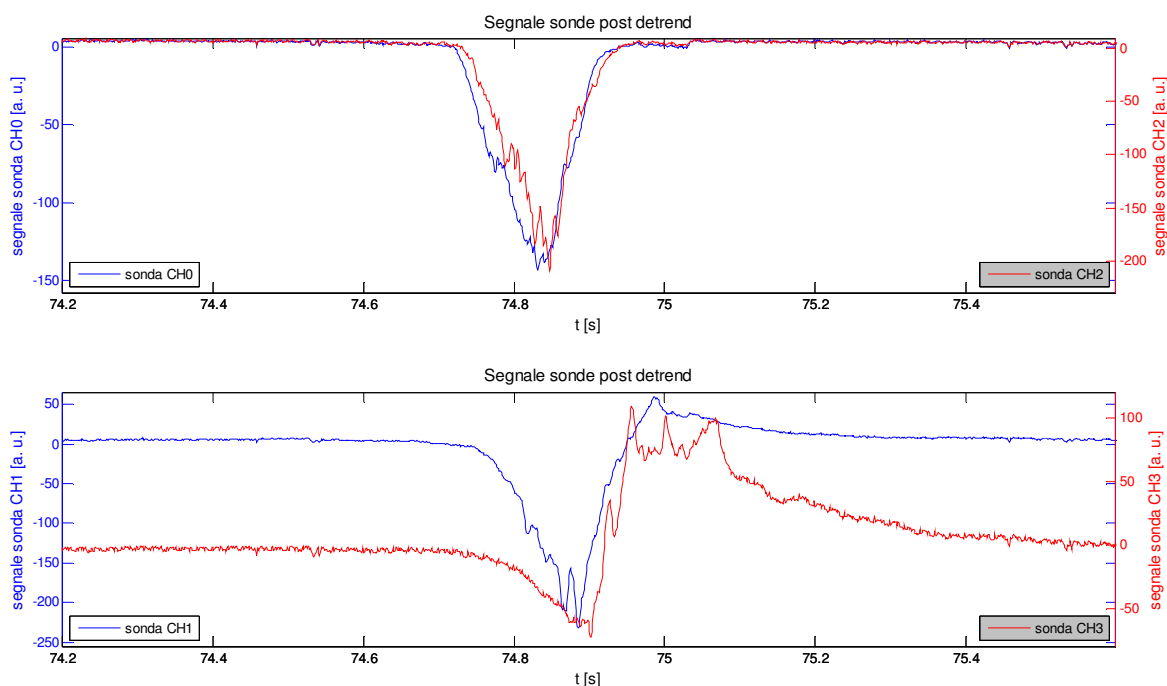


Figura 40: Segnale sonde per particelle char SA $45 < x < 90 \mu\text{m}$ a 1100°C e 6.0% di O_2

Come si può vedere in entrambi i casi le sonde CH0 e CH2 registrano un segnale completamente negativo di assorbimento, mentre la sonda CH1 mostra una fine in emissione e la sonda CH3 registra un'emissione quasi completa. Nelle prove continue non era stato

possibile accorgersi che al livello della sonda CH₃ si registrasse un'emissione. Tra i segnali delle due prove ci sono lievissime differenze perciò come già detto nell'esame delle prove continue non c'è molta differenza nel segnale delle due granulometrie. Tale fatto dipende sicuramente dalla somiglianza tra le taglie scelte, perciò l'effetto della dimensione delle particelle di char potrebbe essere indagato nuovamente scegliendo due range maggiormente diversi. Si deve considerare anche che l'emissione registrata non può essere attribuita con certezza all'ossidazione del char, in quanto sono presenti dei volatili residui (intorno all'8% come evidenziano le analisi con TGA) che si liberano e si ossidano prima del char. Vista la quantità non troppo significativa dei volatili può accadere che il segnale rilevato sia attribuibile ad entrambi i processi, ovvero una devolatilizzazione (con ossidazione immediata) seguita dall'inizio dell'ossidazione del char. Anche in questo caso meriterebbe forse la pena un'analisi con più sonde o comunque con alcune sonde spostate più in basso per comprendere meglio i processi in corso.

3.3. Biomassa

Riassumendo per le prove di questo tipo si sono ottenuti i seguenti tipi di segnali per le sonde messe nelle varie porte al variare delle condizioni operative:

Ossigeno (%)	Porta 6	Porta 7	Porta 8	Porta 9
6.0	assorbimento	assorbimento	assorbimento	emissione
3.0	assorbimento	assorbimento	assorbimento	assorbimento-emissione
0.5	assorbimento	assorbimento	assorbimento	assorbimento

3.3.1. *Prove continue e in transitorio ad alimentazione continua*

3.3.1.1. Effetto della concentrazione di ossigeno

Le prove sono state condotte tutte a 900°C e con gas di trasporto misto azoto-aria, cambia la concentrazione di ossigeno in eccesso nei fumi. Come per le prove di devolatilizzazione su carbone ci si aspetta che al crescere della concentrazione di ossigeno cresca la dinamica del segnale registrato dalle sonde, visto che è favorita l'ignizione dei volatili. A tale proposito si riportano alcuni esempi al variare della concentrazione di ossigeno.

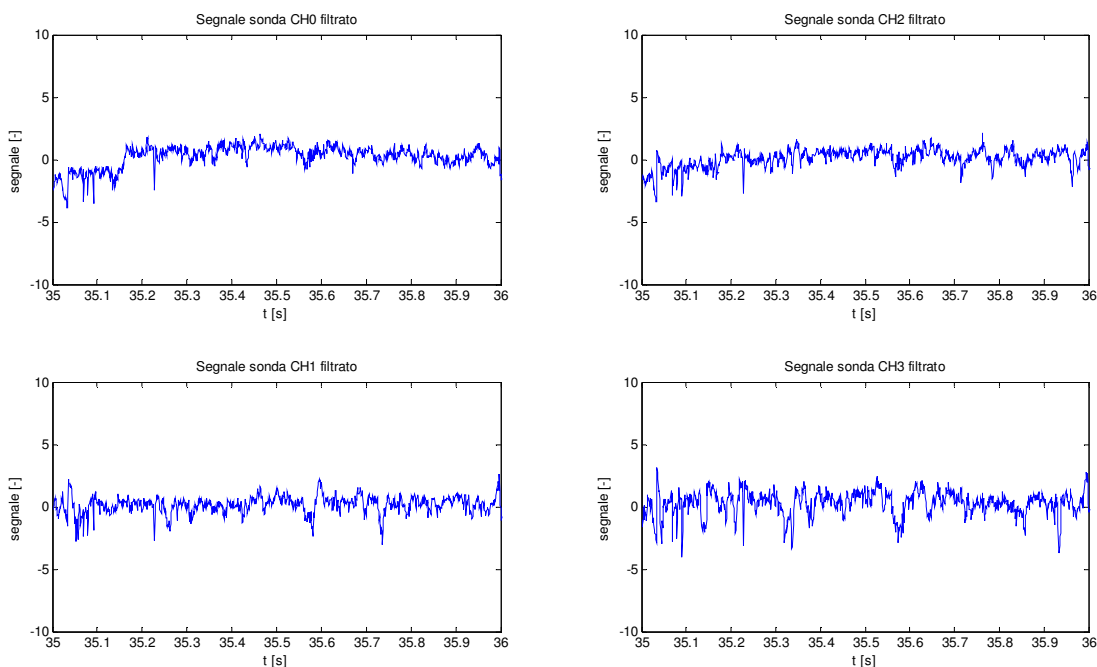


Figura 41: Dettaglio di segnale sonde per biomassa a 0.5% di O₂ e 900°C

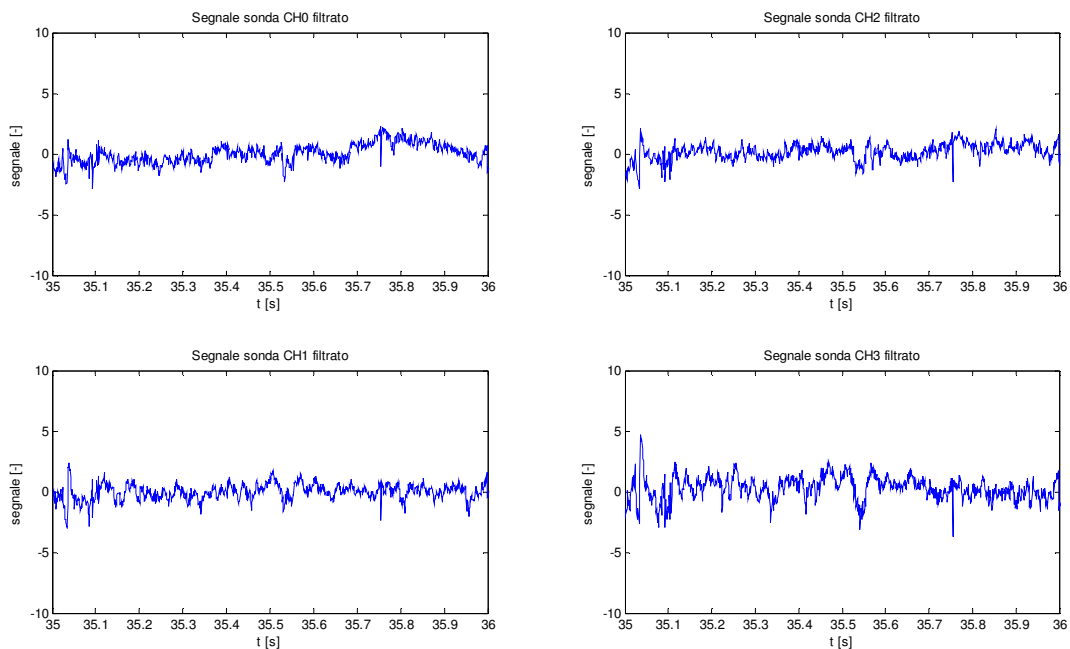


Figura 42: Dettaglio di segnale sonde per biomassa a 3.0% di O_2 e 900°C

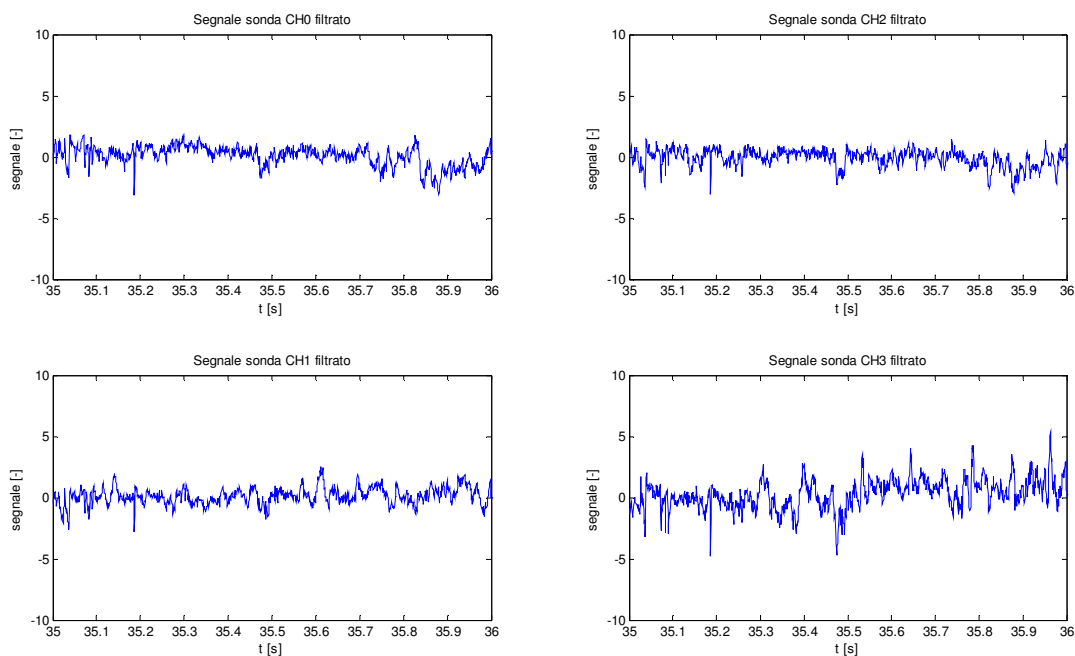


Figura 43: Dettaglio di segnale sonde per biomassa a 6.0% di O_2 e 900°C

Come si può vedere la dinamica del segnale è pressoché identica per le varie prove, in pratica sembrerebbe che nessuna sonda osservi un'emissione, motivo per il quale il segnale non varia. Questo porterebbe a pensare che l'ignizione dei volatili avvenga per tempi di residenza maggiori che superano la distanza della sonda CH3. Tale aspetto, tuttavia, può essere indagato

meglio considerando le prove ad alimentazione pulsata. È interessante, invece, osservare se e come il segnale si modifica quando si immette biomassa, poiché visto che con alimentazione continua stazionaria non si registra nulla di rilevante sorge il dubbio che il segnale osservato dalle sonde non cambi immettendo combustibile o cambi molto poco. Per indagare questo aspetto si riporta l'esempio seguente di alimentazione continua transitoria:

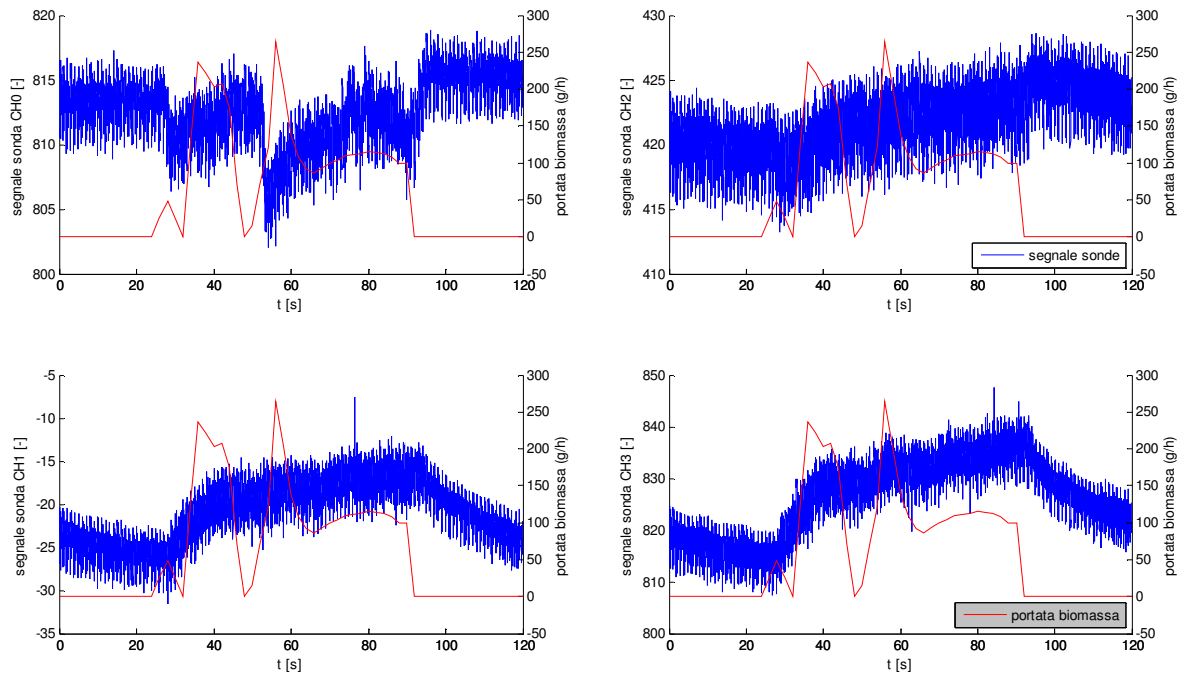


Figura 44: Transitorio nell'alimentazione di biomassa a 900°C e 3.0% di O_2

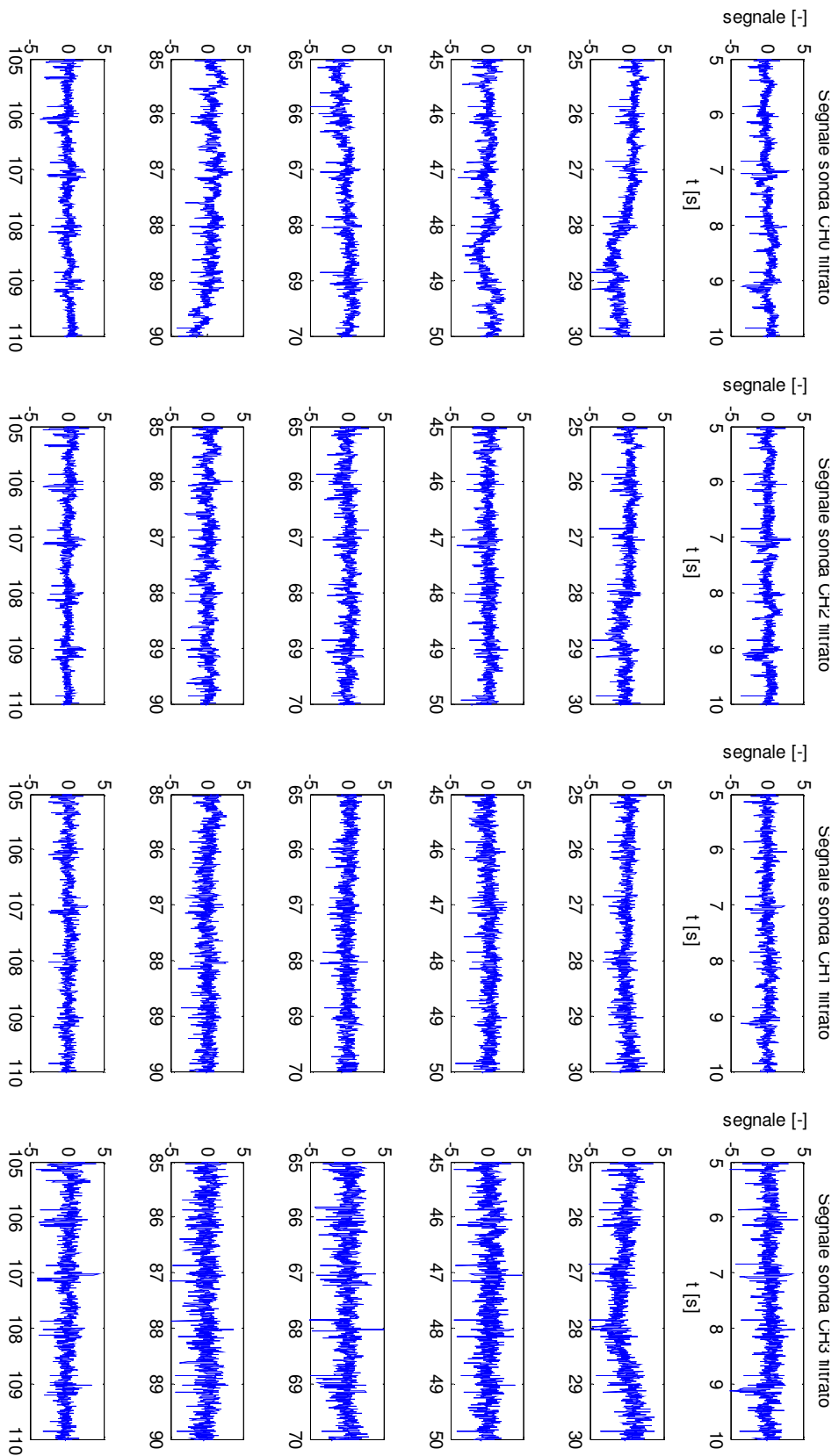


Figura 45: Andamento segnale sonde nel transitorio nell'alimentazione di biomassa a 900°C e 3.0% di O₂

Come si può vedere praticamente nessun segnale modifica la sua dinamica in presenza di biomassa immessa, la stessa cosa si ha per diverse concentrazioni di ossigeno. Si conferma, perciò, l'ipotesi che il segnale non vari perché nessuna ignizione avviene e quindi le sonde vedono sempre e solo il passaggio di combustibile che assorbe leggermente ma che assorbe allo stesso modo variando la concentrazione di ossigeno.

3.3.2. Prove pulsate e in transitorio ad alimentazione pulsata

3.3.2.1. Effetto della concentrazione di ossigeno

Per indagare con più precisione cosa accade nelle prove con biomassa si ricorre all'esame delle prove con alimentazione pulsata. Si riportano le prove per diverse concentrazioni di ossigeno in eccesso:

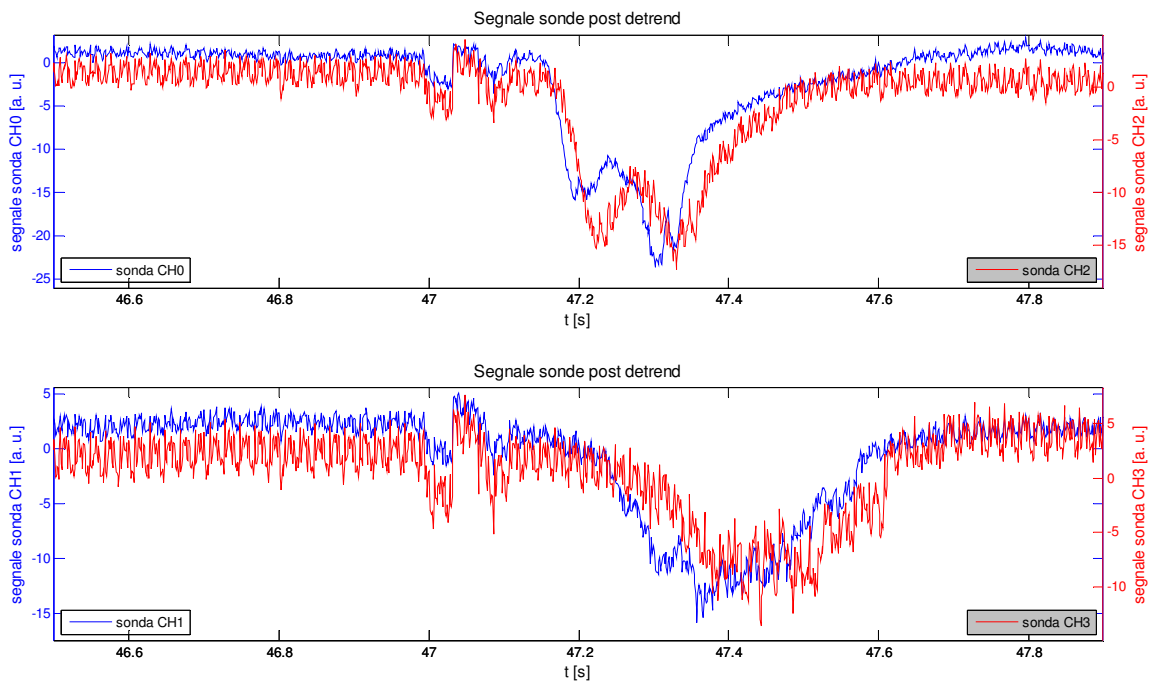


Figura 46: Dettaglio di segnale sonde per biomassa a 0.5% di O₂ e 900°C

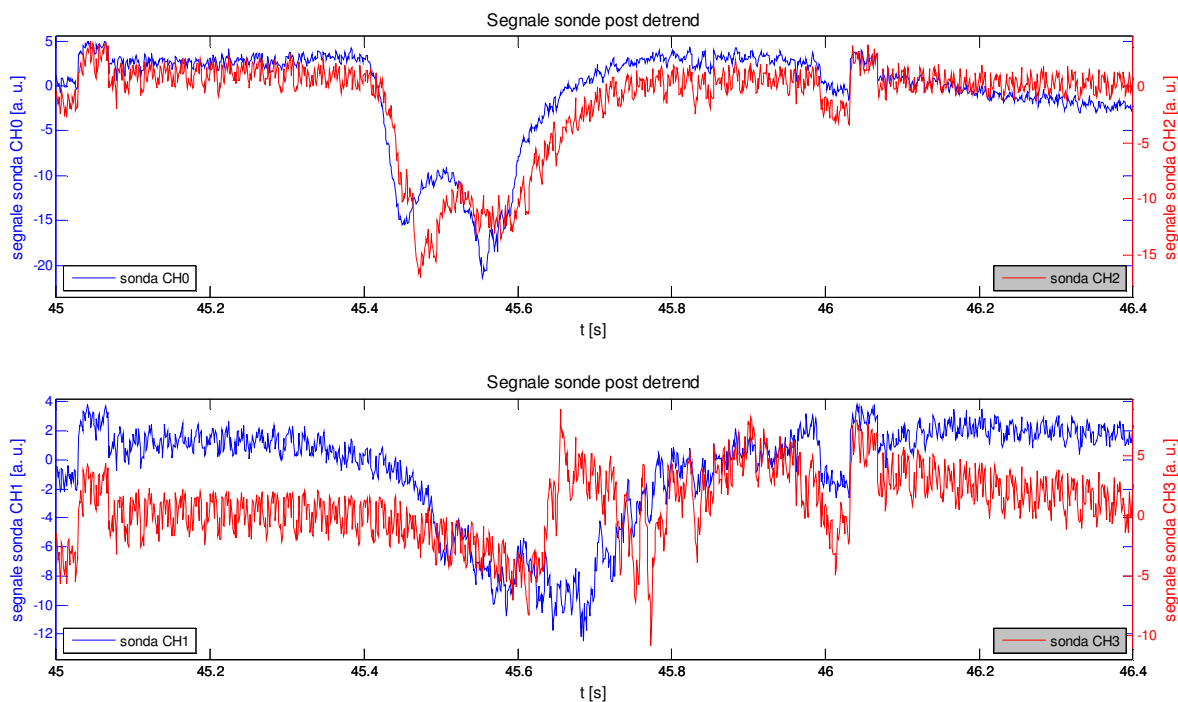


Figura 47: Dettaglio di segnale sonde per biomassa a 3.0% di O_2 e 900°C

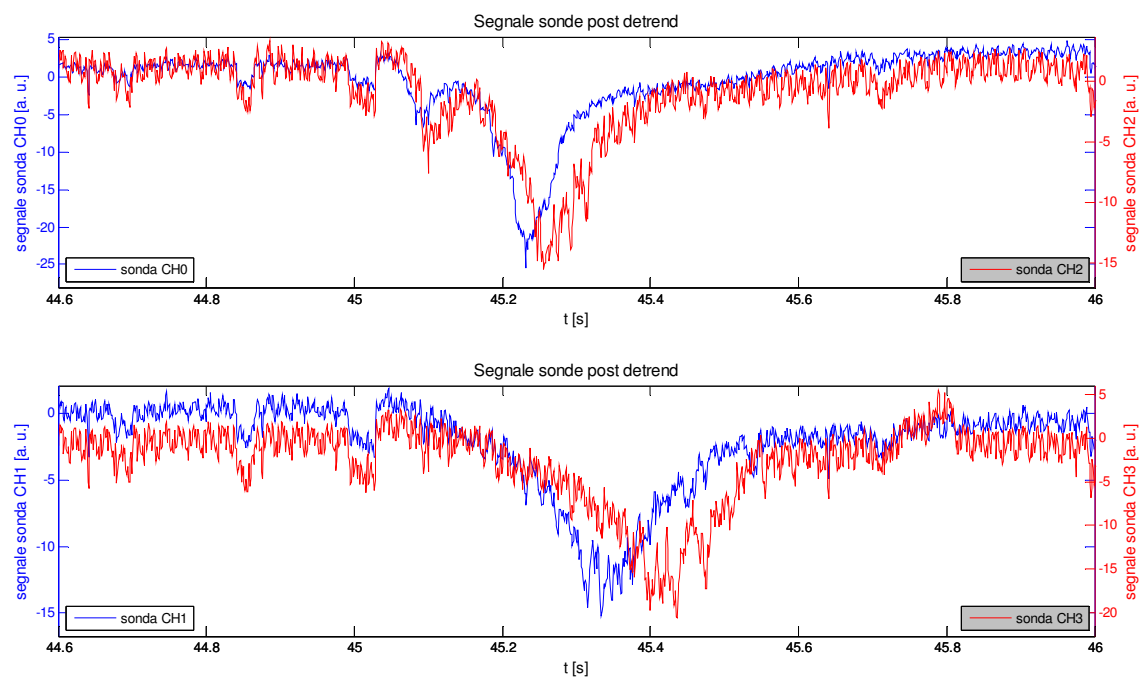


Figura 48: Dettaglio di segnale sonde per biomassa a 6.0% di O_2 e 900°C

Si può notare come effettivamente nelle prove "stazionarie" in cui si alimenta in modo pulsato per tutto il tempo registrato non si registrino che segnali assorbimento per tutte e quattro le

sonde in tutte e tre le condizioni di ossigeno nei fumi. Solamente nel caso al 3% di ossigeno si ha una parte finale del segnale della sonda CH₃ in leggerissima emissione, ma è del tutto irrilevante. Nelle prove transitorie, ovvero dove l'alimentazione pulsata avviene solo per una parte del tempo registrato, invece il segnale registrato dalla sonda CH₃ è di emissione (o assorbimento e poi emissione) in entrambe le prove con eccesso d'ossigeno nei fumi. Questa anomalia attualmente non è spiegabile, visto che essendo alimentazioni pulsate il fatto che sia una prova stazionaria o transitoria non ha influenza. Poiché l'analisi TGA evidenzia che si ha una discreta conversione di devolatilizzazione della biomassa nelle prove in IPFR è opportuno ipotizzare che il tempo necessario affinché la devolatilizzazione avvenga nel caso delle biomasse è molto maggiore che nel caso di carbone, perciò sarebbe opportuno ripetere le prove spostando più in basso alcune sonde.

4. Prove settembre 2011

Sulla base degli importanti risultati ottenuti analizzando le prove di aprile è stato deciso di effettuare una nuova giornata di test modificando la posizione delle sonde. In particolare è stato visto come mettendo una sonda dal fondo del reattore in posizione assiale sia possibile registrare l'intera storia delle particelle dall'ingresso all'uscita del reattore. Per questo motivo le prove del 7 settembre sono caratterizzate dalla presenza di una sonda in tale posizione. In questo modo è possibile incrociare le informazioni delle sonde lungo il reattore che hanno una precisa collocazione spaziale con le informazioni della sonda assiale che contengono tutto il profilo temporale. Particolare interesse nelle prove di settembre ha avuto lo studio della fase di devolatilizzazione del carbone tal quale, perciò la maggior parte delle prove è stata effettuata variando le condizioni operative ed esaminando il segnale corrispondente. Si riporta una tabella riassuntiva delle condizioni provate e della posizione delle sonde nelle varie prove.

Granulometria (μm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Ossigeno (%)	Alimentazione	Sonda CH0	Sonda CH1	Sonda CH3	Sonda CH2
t. q. >125	1100	0	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. >125	1100	3	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. >125	1100	6	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. >125	1100	9	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	1100	0	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	1100	3	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	1100	6	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	1100	9	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	1100	9% oxy comb.	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	1100	6% oxy comb.	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	1100	3% oxy comb.	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	1100	0% oxy comb.	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
Char 90<x<125	1100	6	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
Char 45<x<90	1100	6	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	900	0	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. 38<x<90	900	3	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q.	900	6	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10

38<x<90							
t. q. >125	900	0	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. >125	900	3	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
t. q. >125	900	6	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
biomassa	900	0	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
biomassa	900	3	Porta 5	Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10
biomassa	900	6		Dal fondo	Porta 6	Porta 8	Porta 10

Tabella 11: Condizioni operative nelle prove settembre 2011

L'alimentazione in tutte le prove è pulsata così da poter distinguere bene il passaggio delle particelle di combustibile rispetto alle pareti del forno. Le pulsazioni di combustibile sono di piccoli volumi di 250 mm³ distanziate di 6 secondi. Non sono state effettuate prove ad alimentazione continua in quanto la sonda sul fondo del reattore in posizione assiale in tal caso non darebbe informazioni interessanti. In tutte le prove il gas carrier è azoto. Per ogni condizione operativa sono state effettuate due prove.

4.1. Carbone tal quale

- ore 10.25 giorno 07/09/11

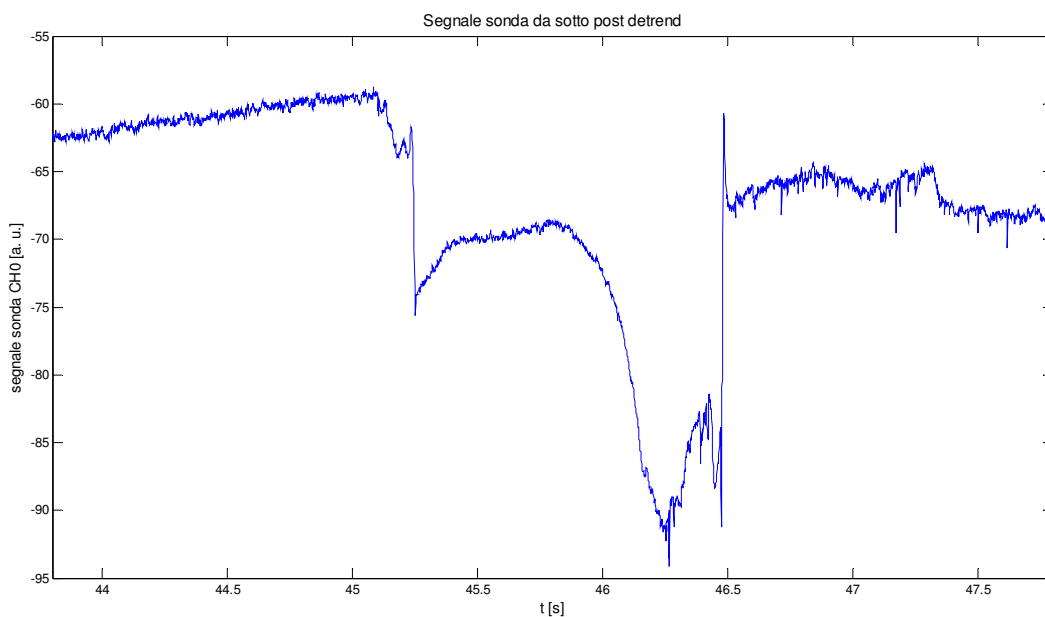
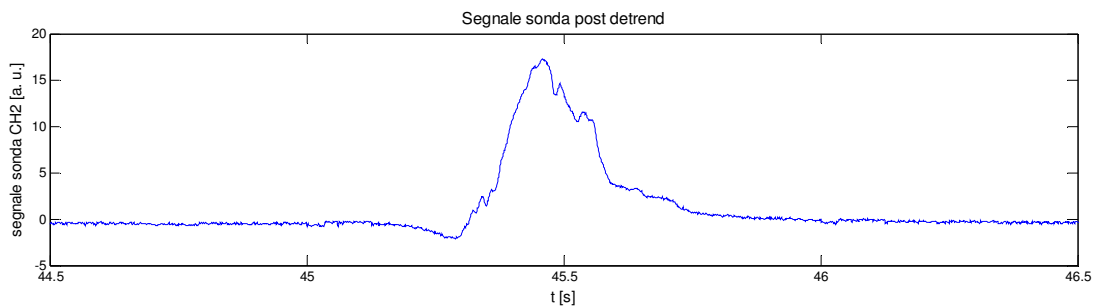
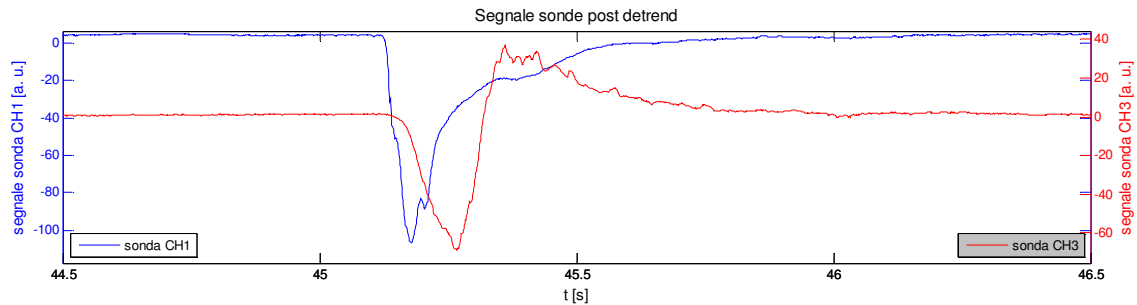
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 10.27 giorno 07/09/11

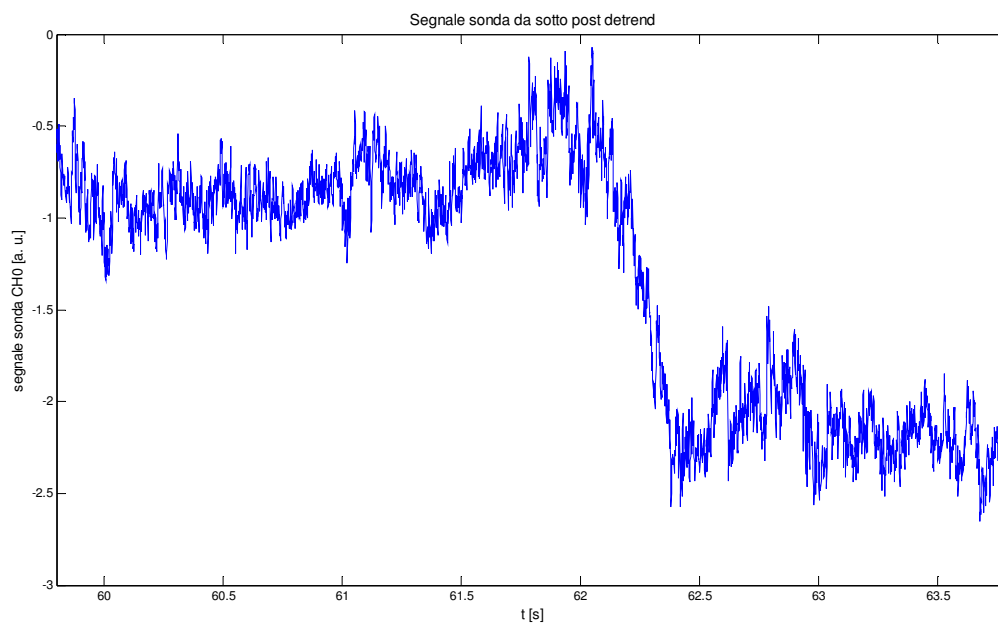
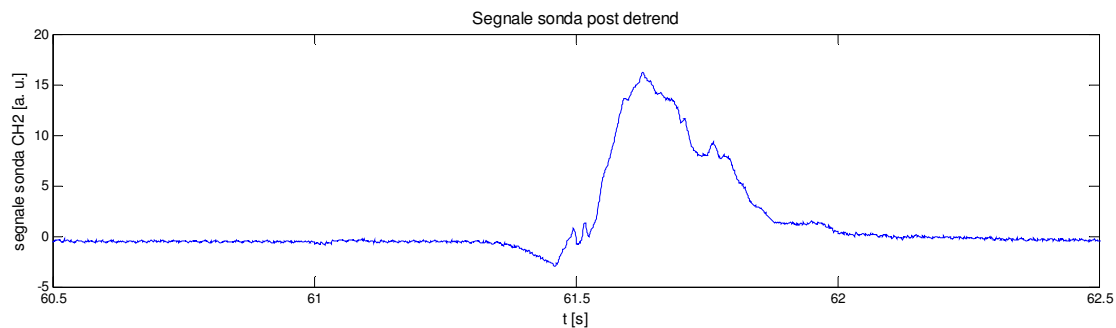
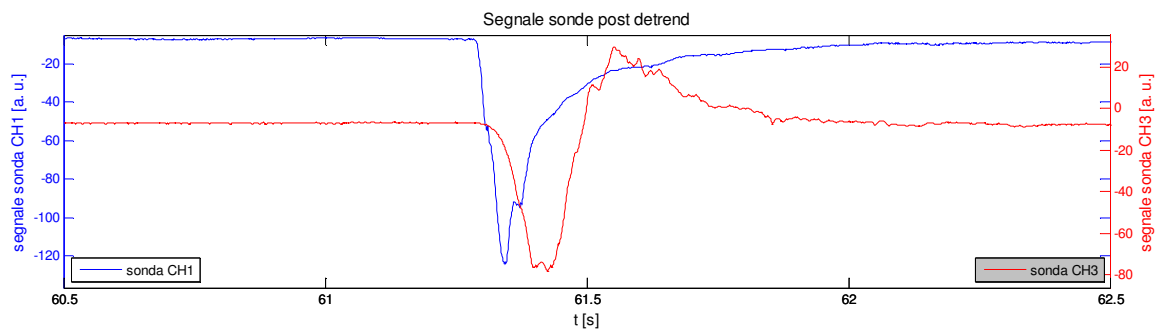
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- - ore 10.40 giorno 07/09/11

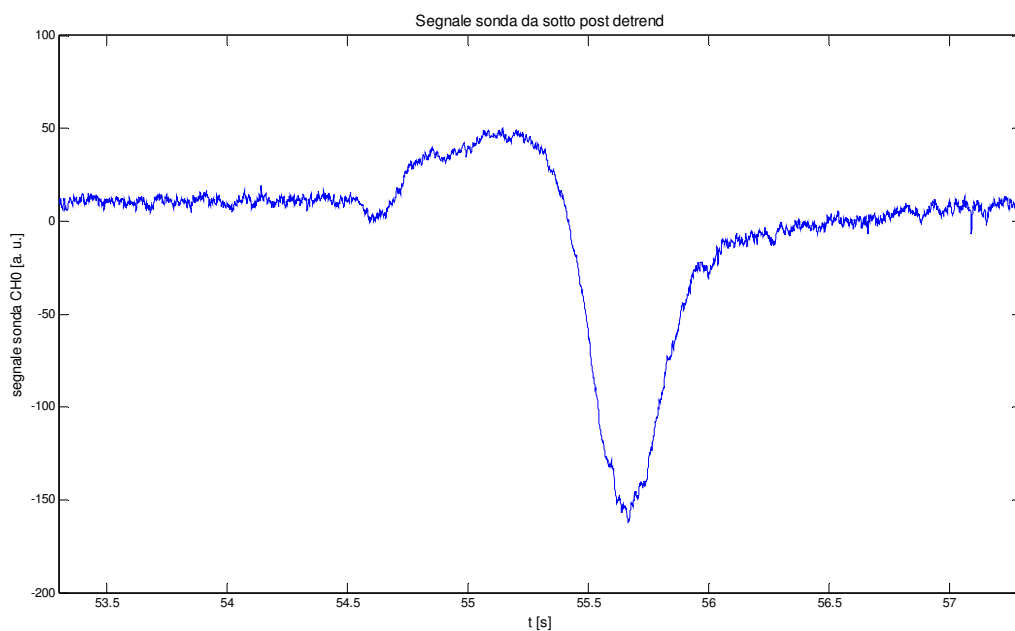
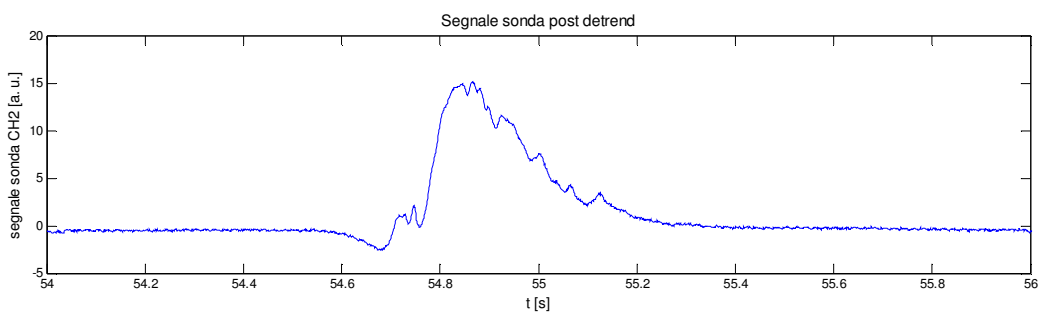
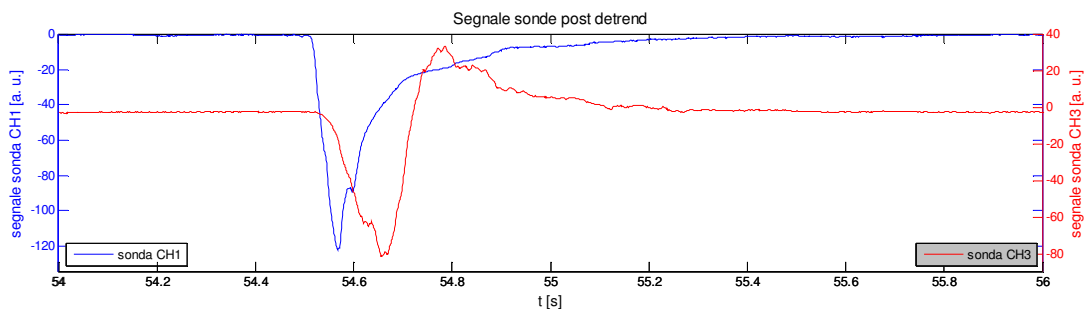
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 10.48 giorno 07/09/11

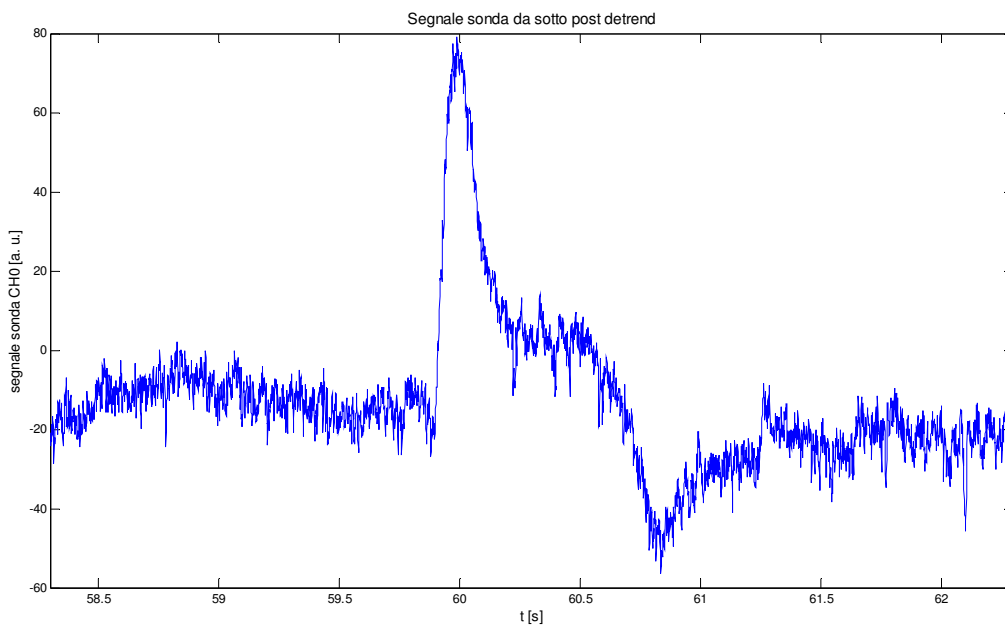
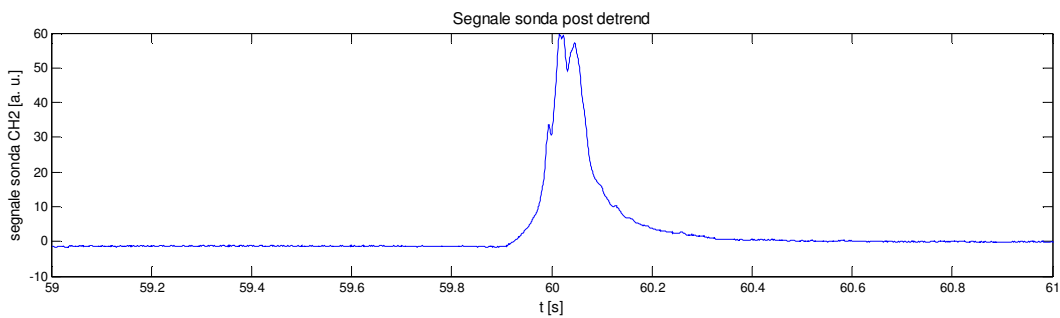
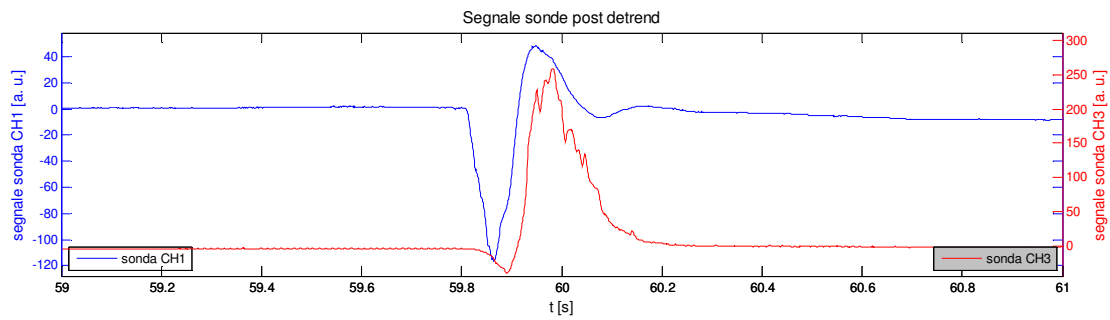
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.1%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 11.09 giorno 07/09/11

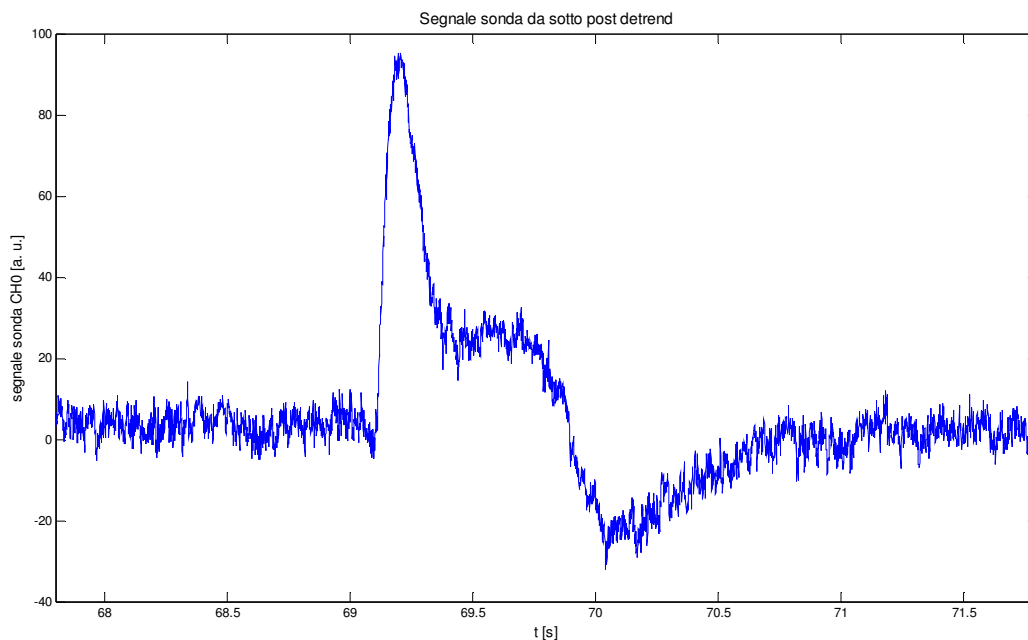
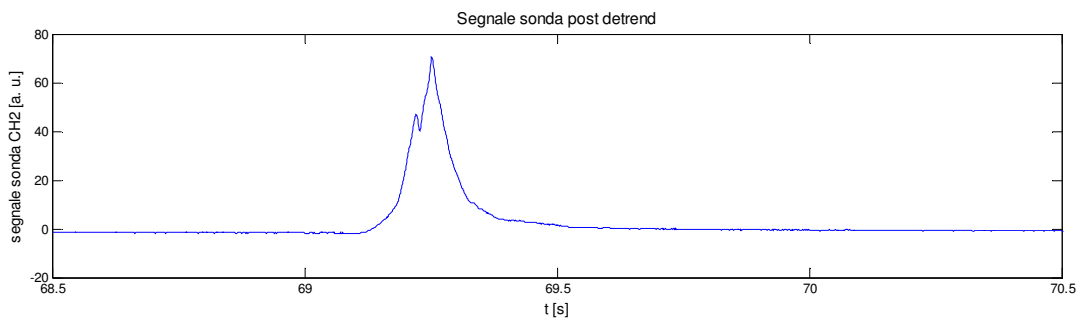
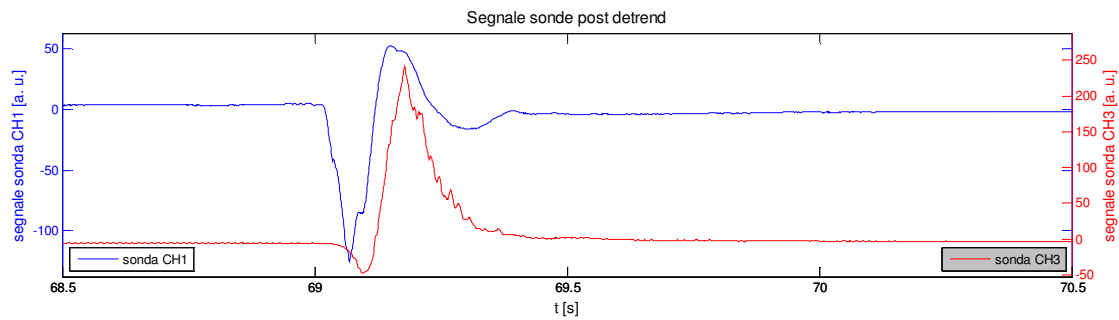
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.1%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 11.11 giorno 07/09/11

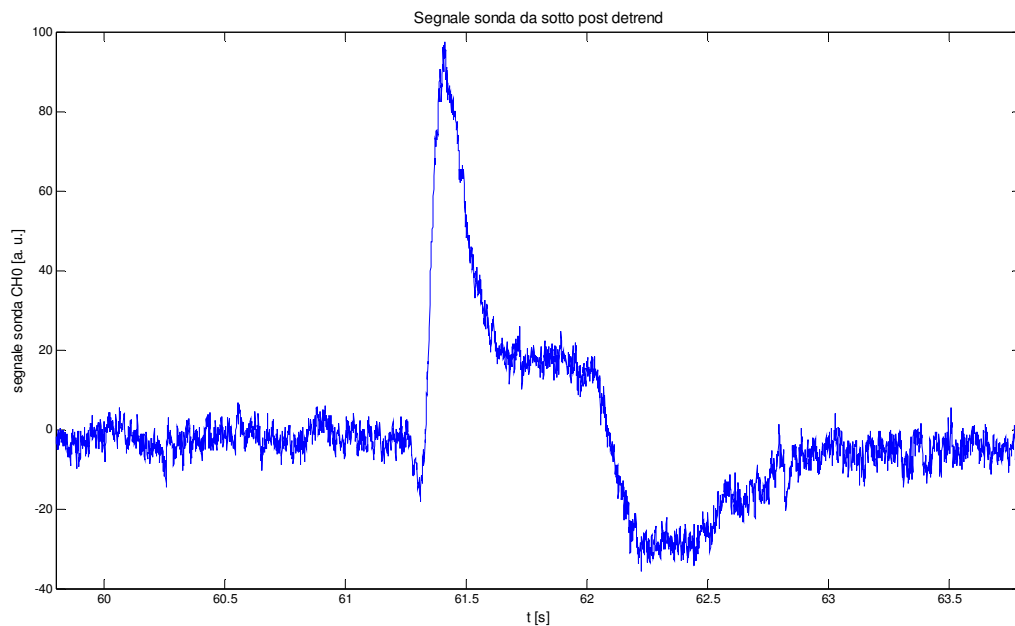
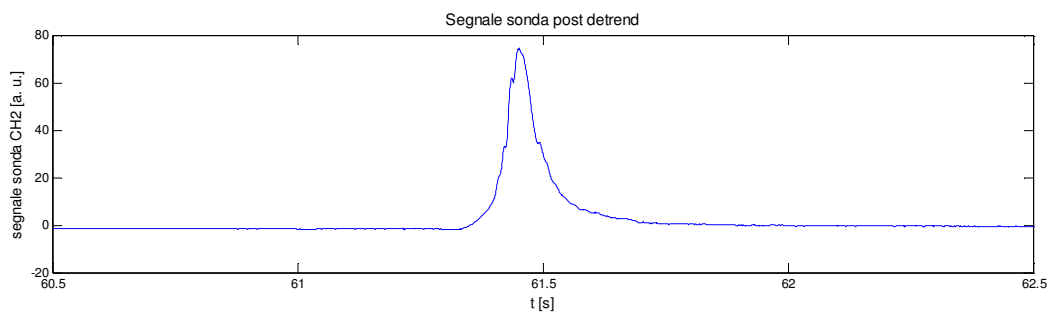
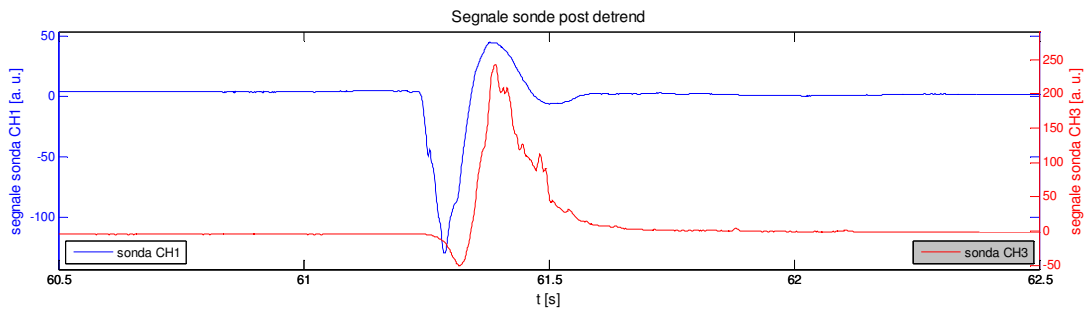
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.1%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 11.18 giorno 07/09/11

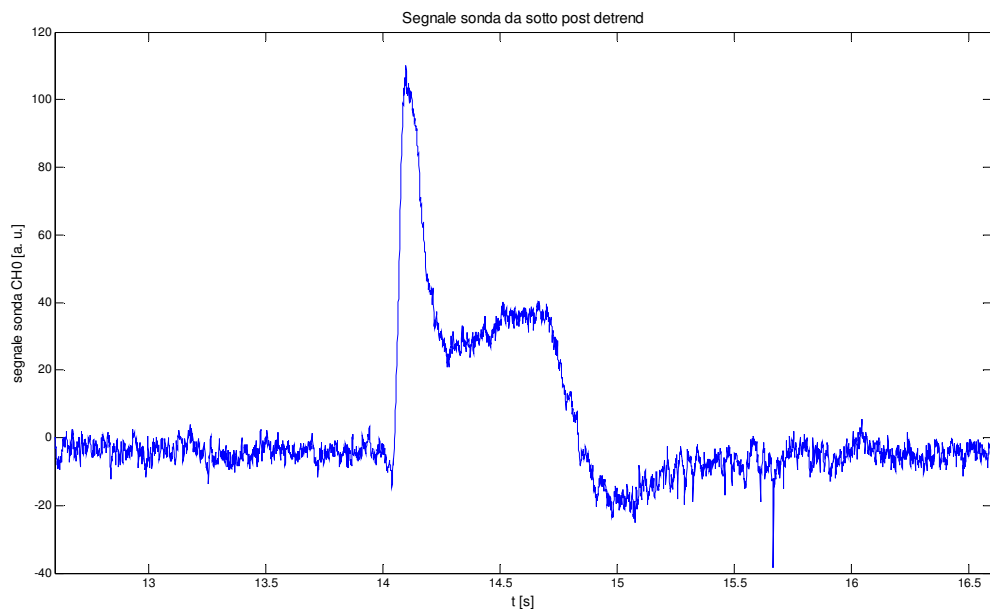
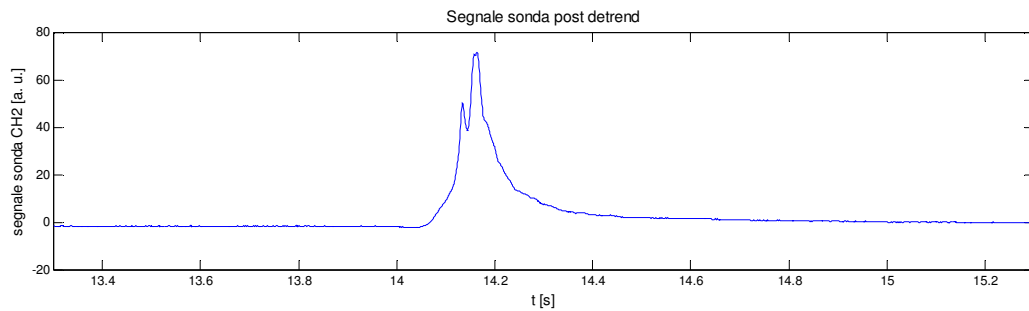
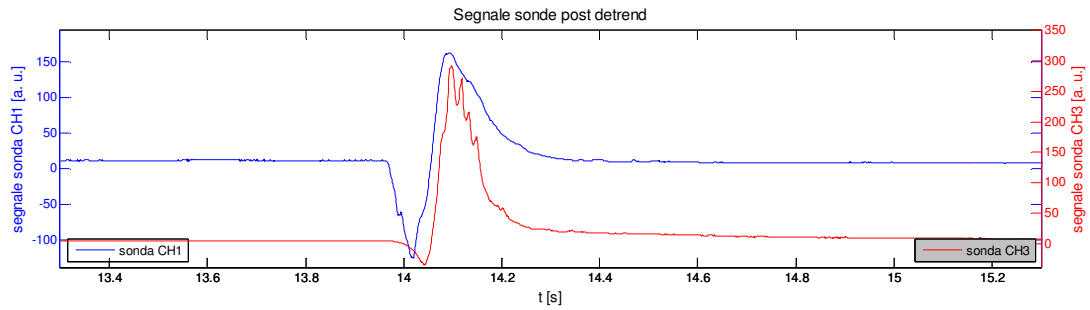
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 11.21 giorno 07/09/11

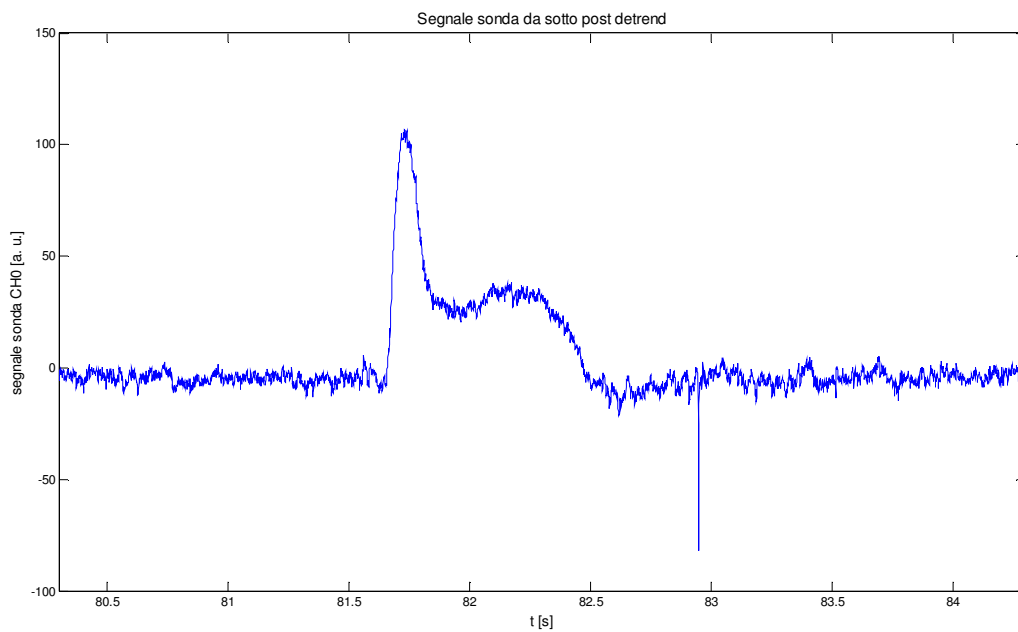
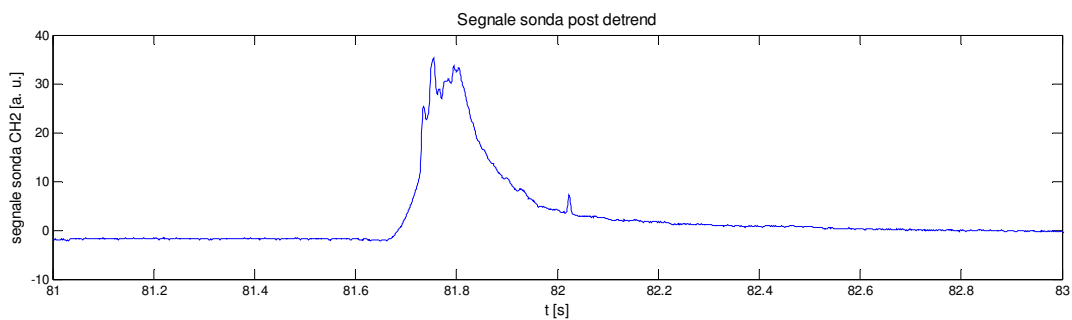
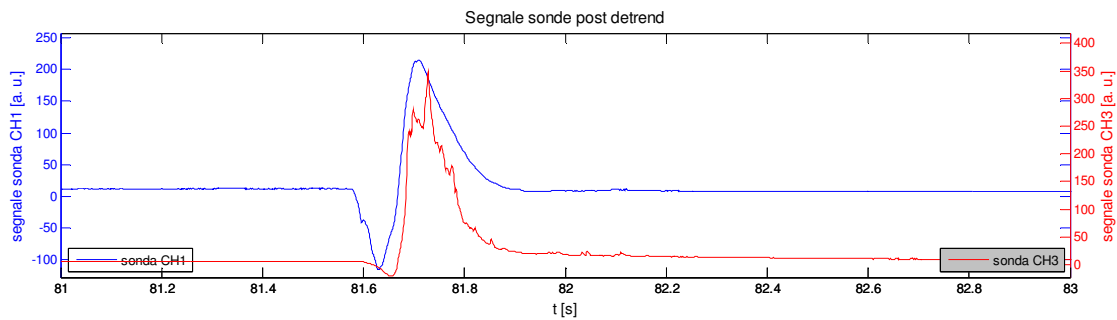
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 11.24 giorno 07/09/11

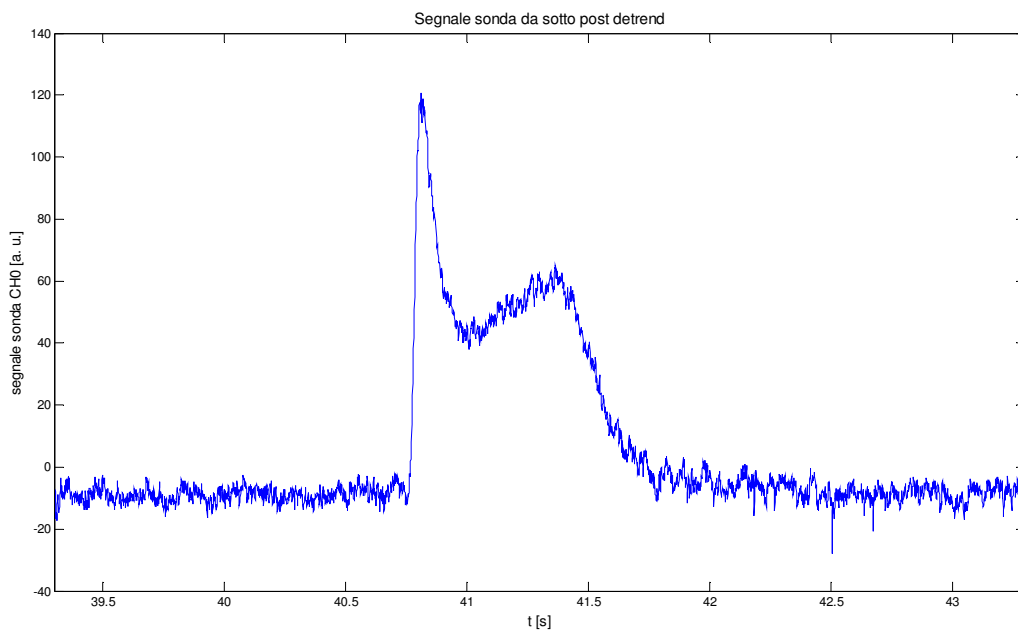
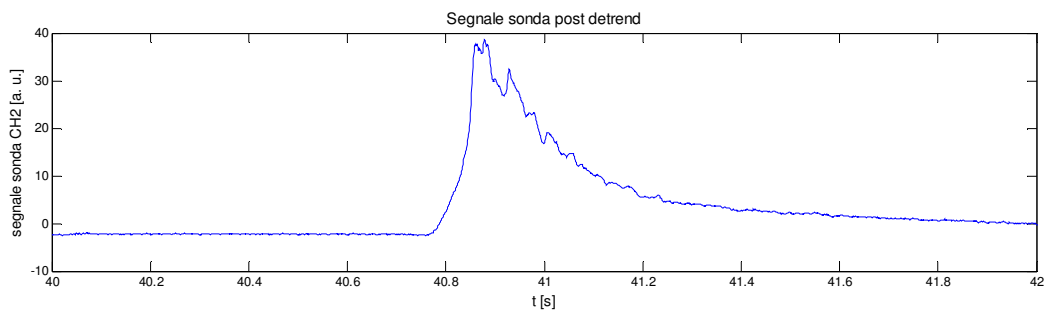
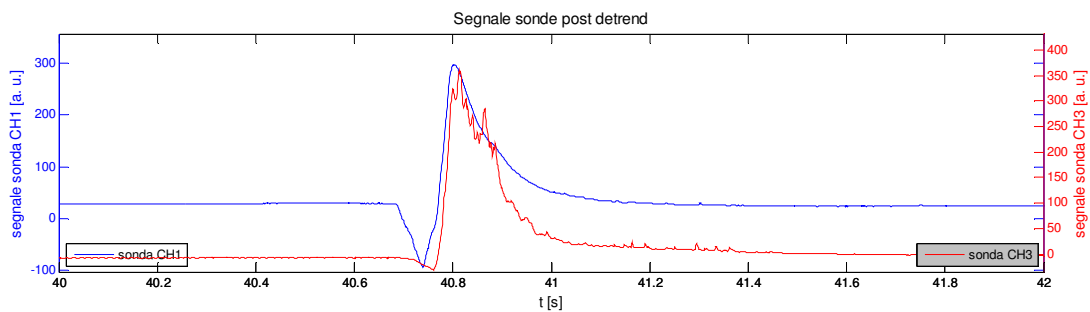
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 9.1%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 11.29 giorno 07/09/11

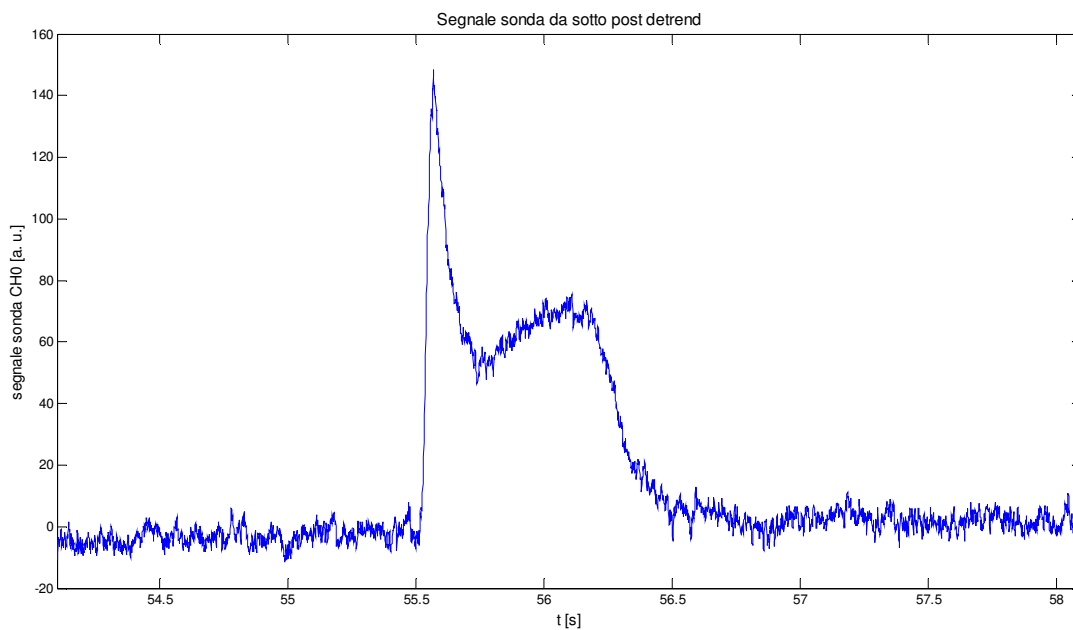
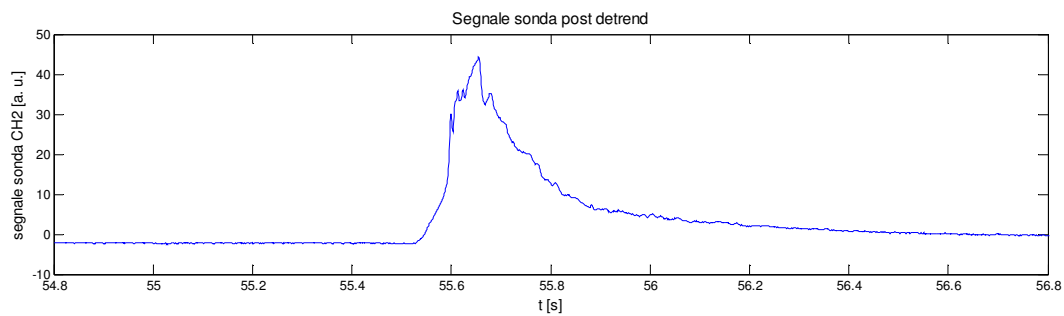
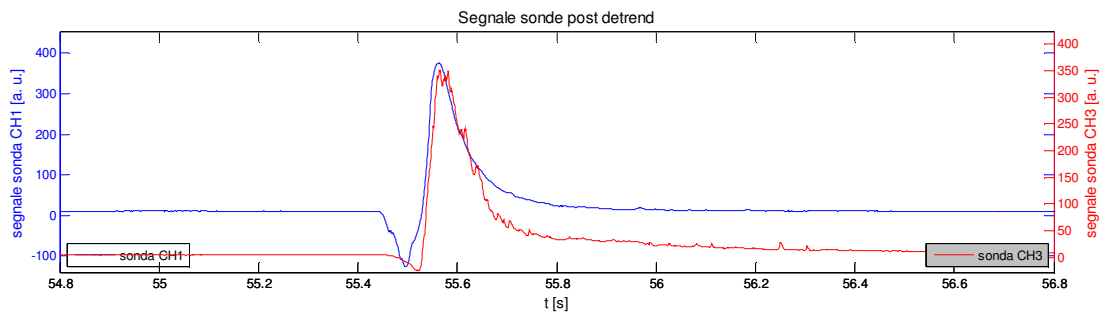
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 9.1%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 11.35 giorno 07/09/11

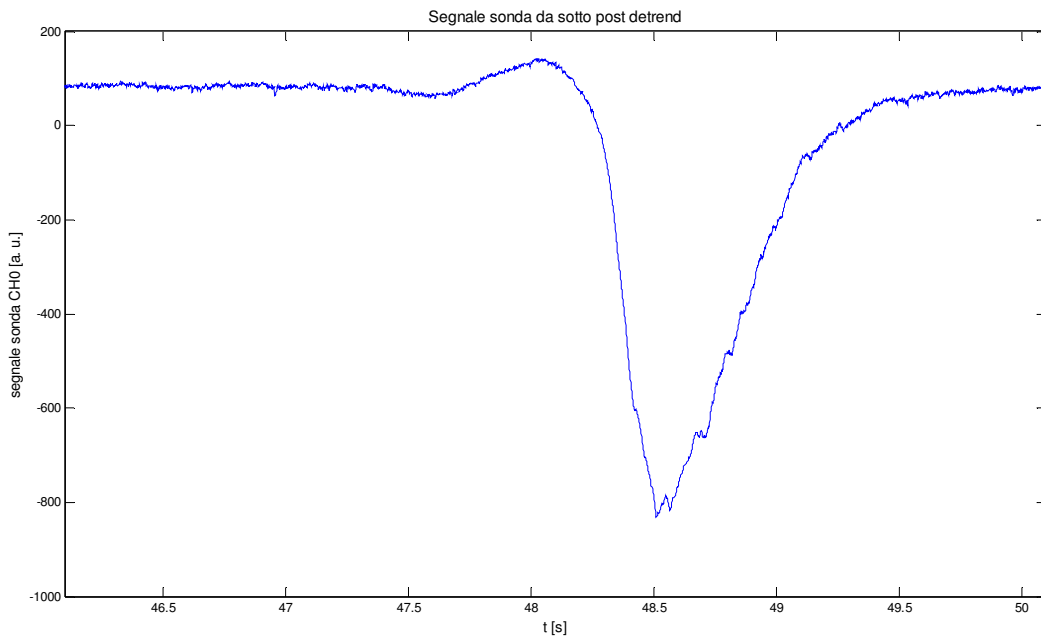
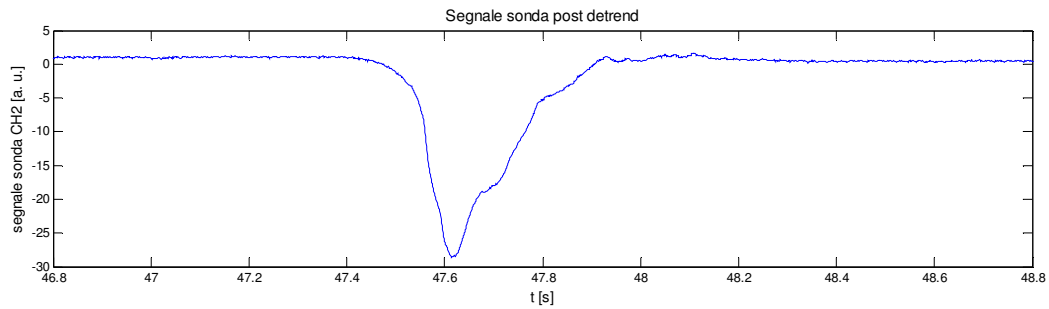
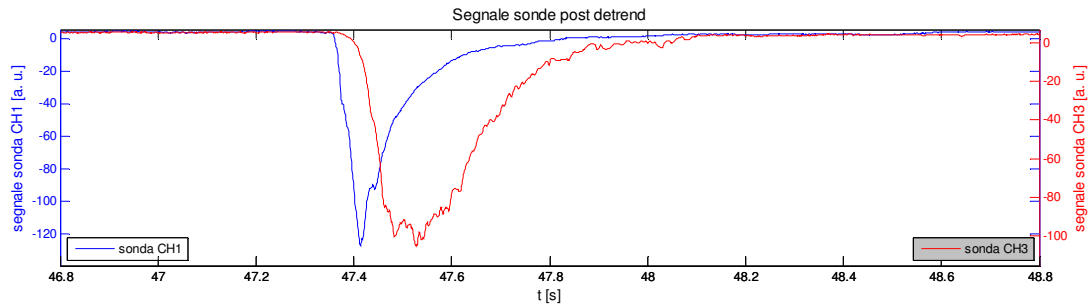
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\text{ }\mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 11.38 giorno 07/09/11

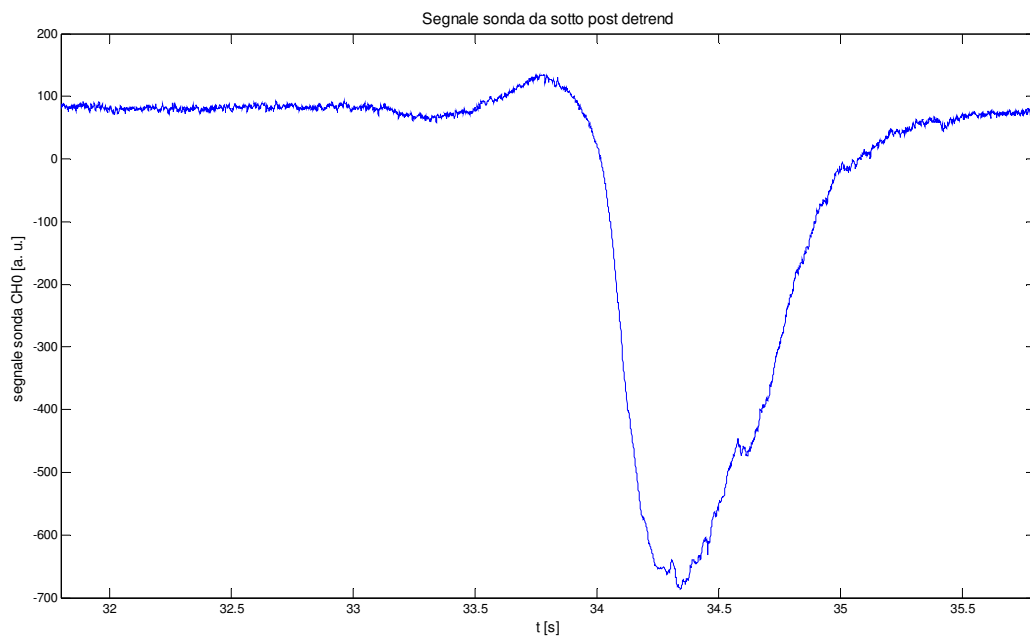
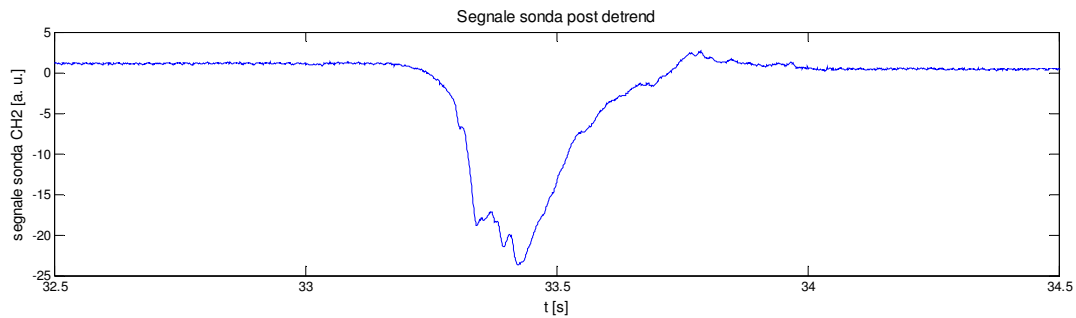
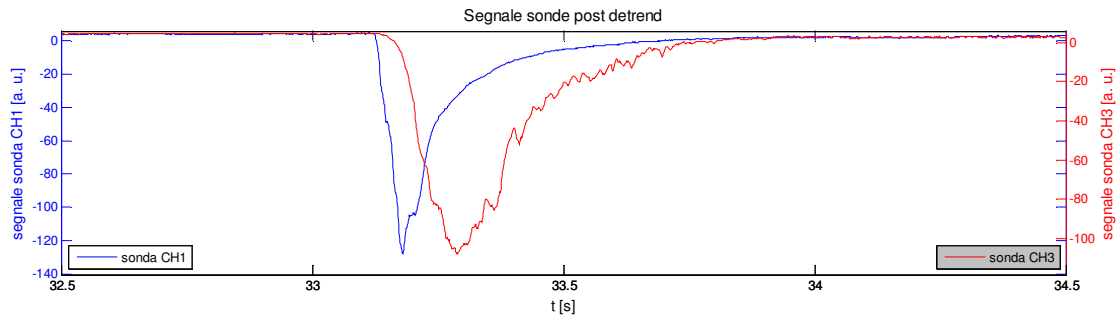
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 12.12 giorno 07/09/11

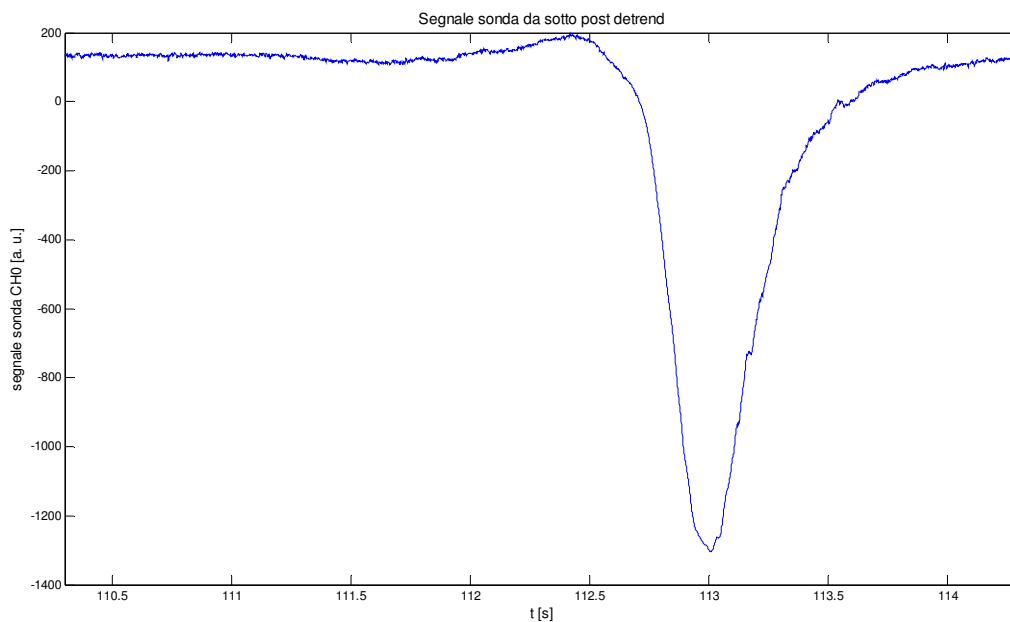
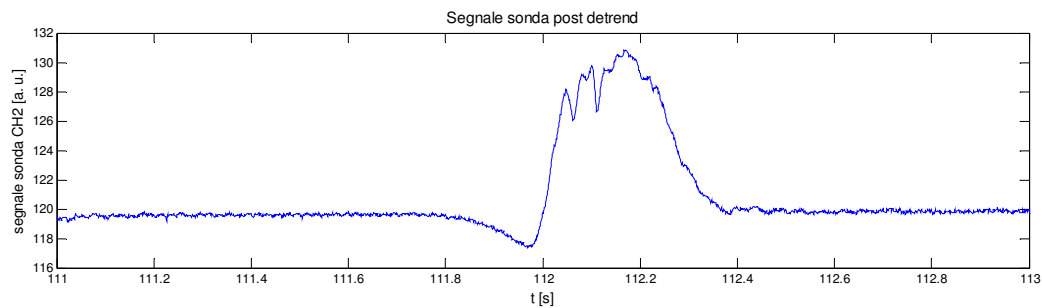
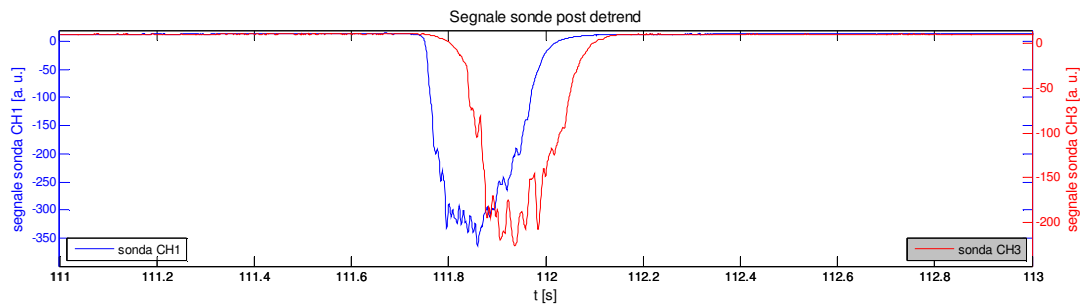
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.4%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 12.25 giorno 07/09/11

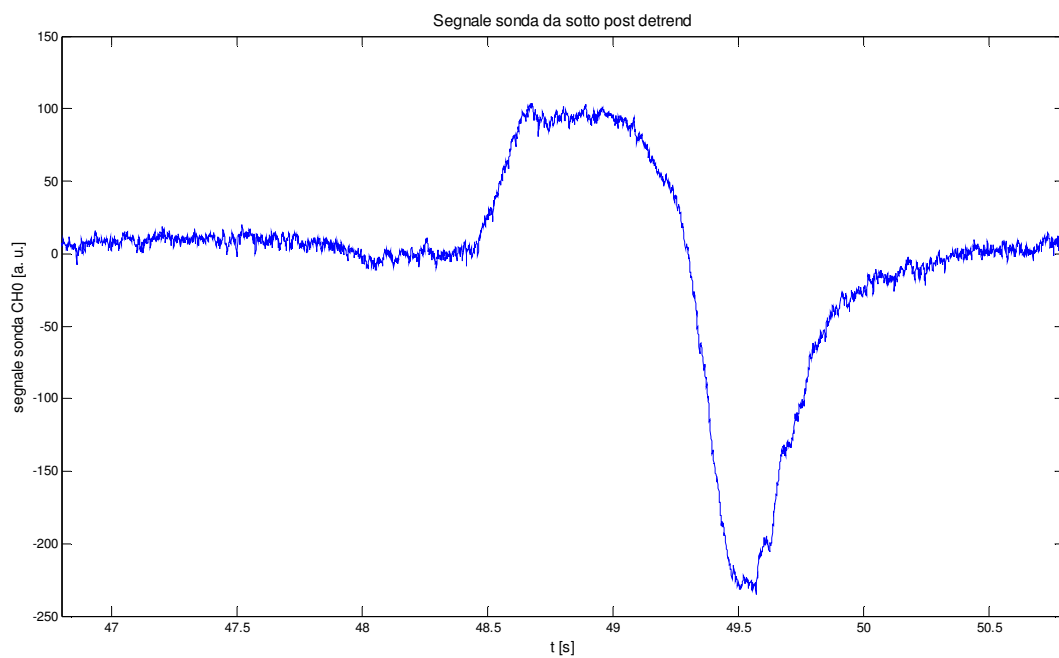
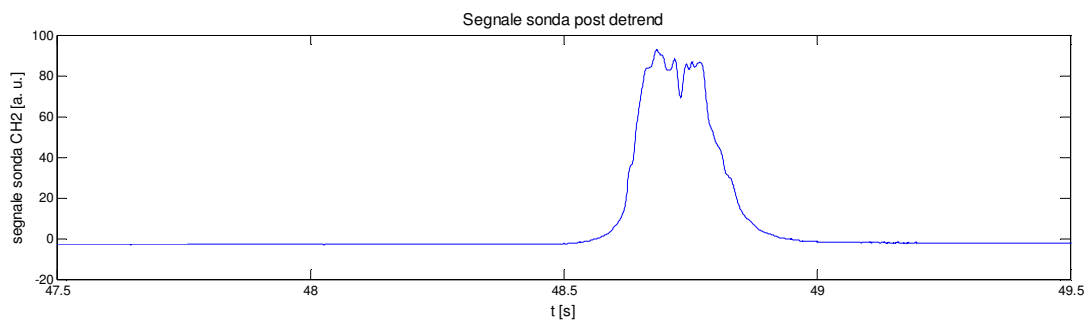
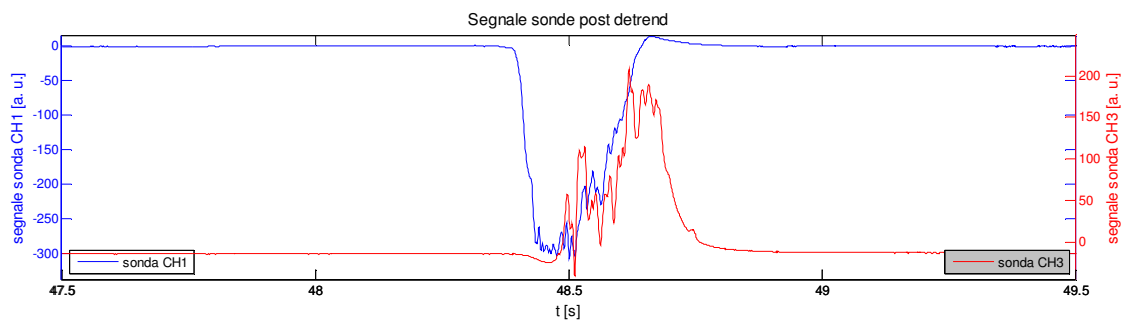
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 12.27 giorno 07/09/11

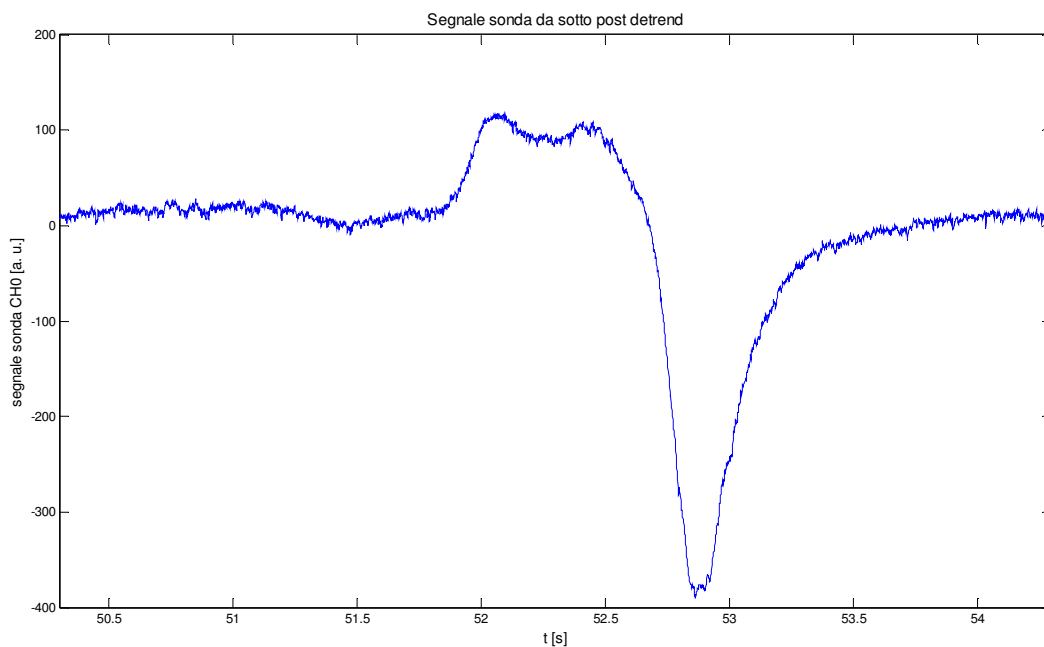
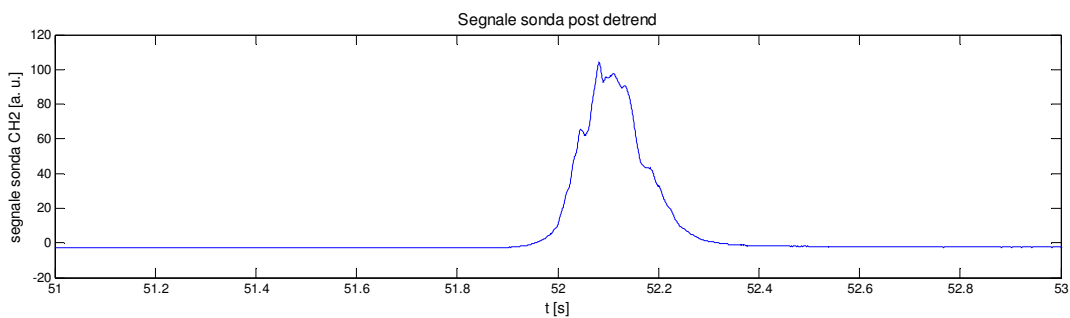
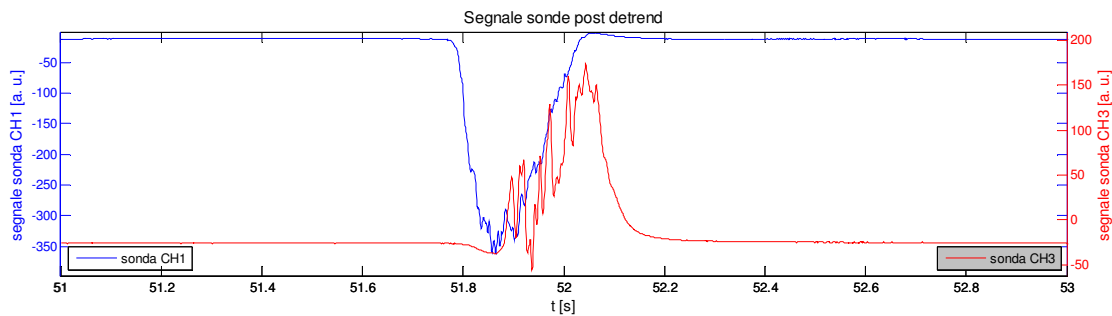
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 12.31 giorno 07/09/11

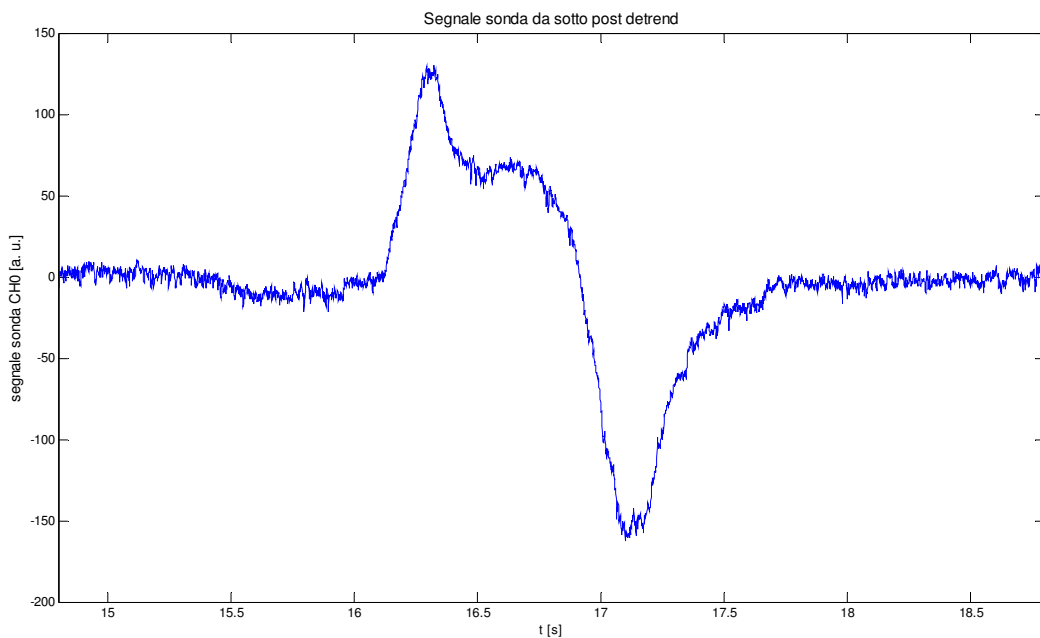
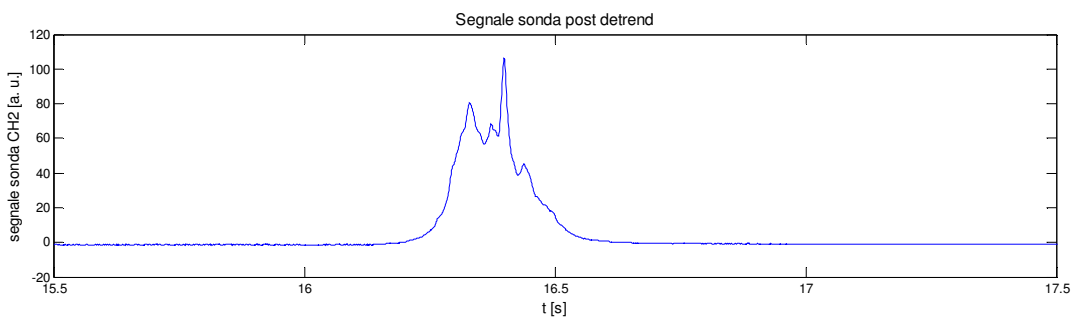
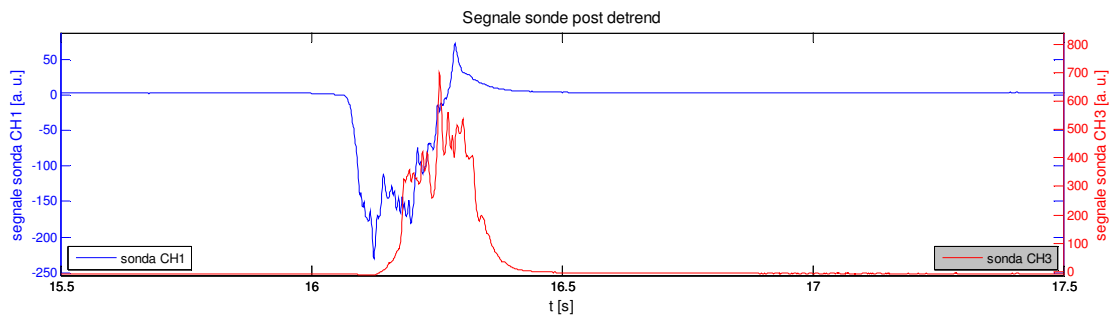
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 12.34 giorno 07/09/11

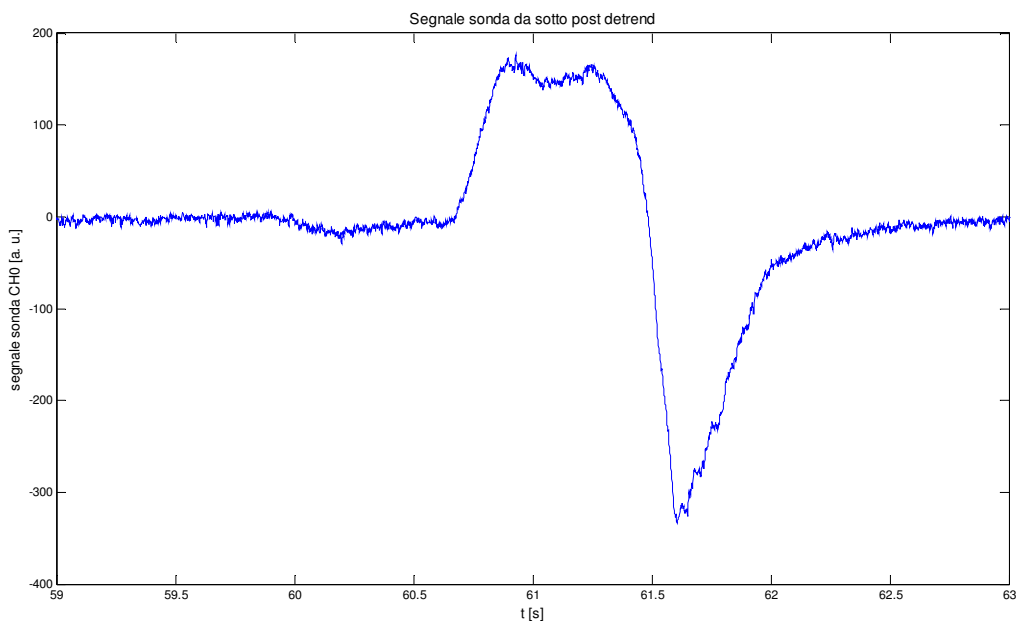
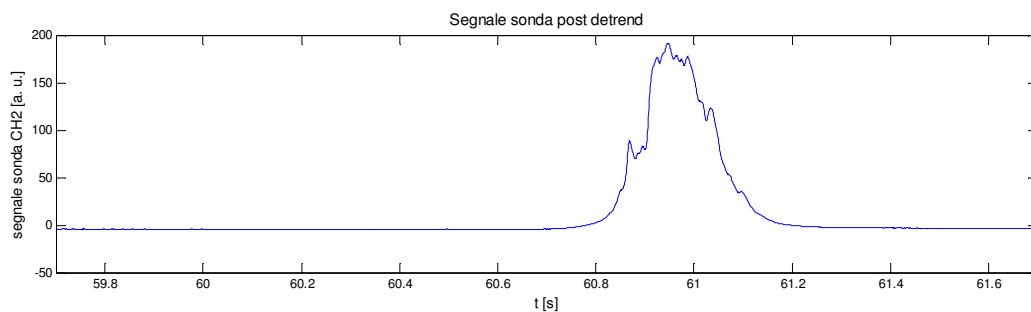
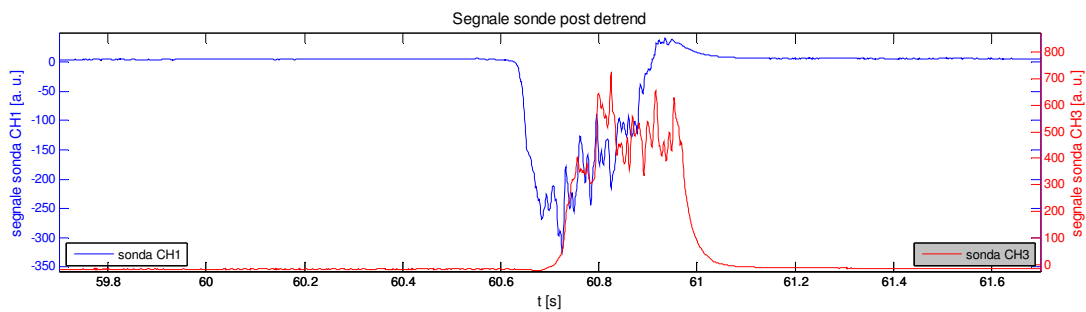
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 12.38 giorno 07/09/11

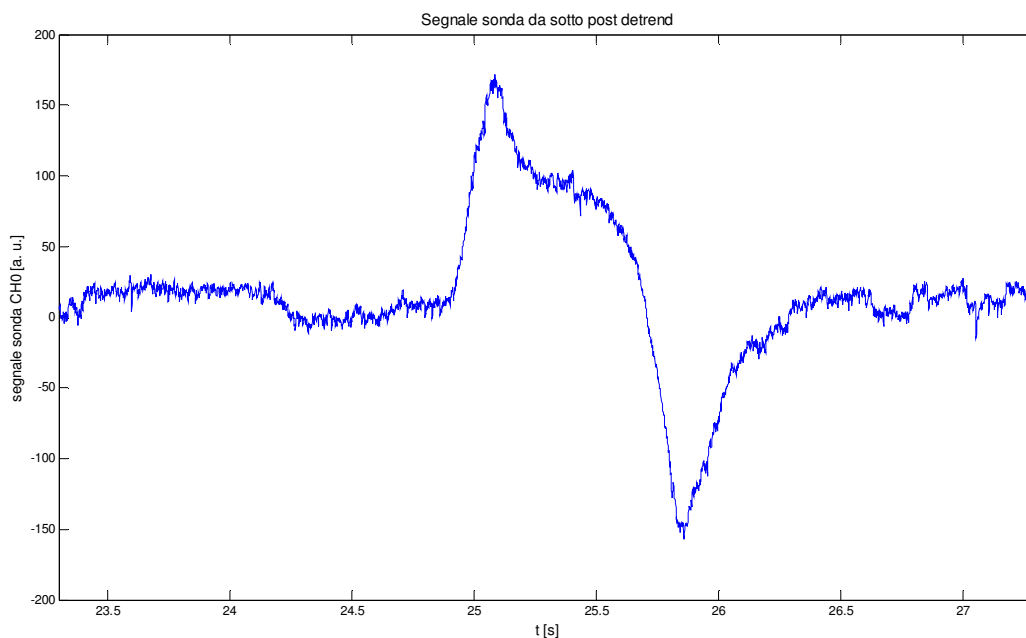
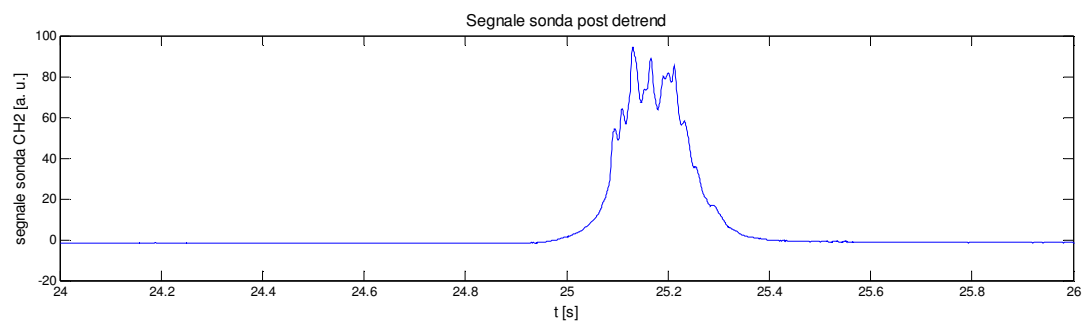
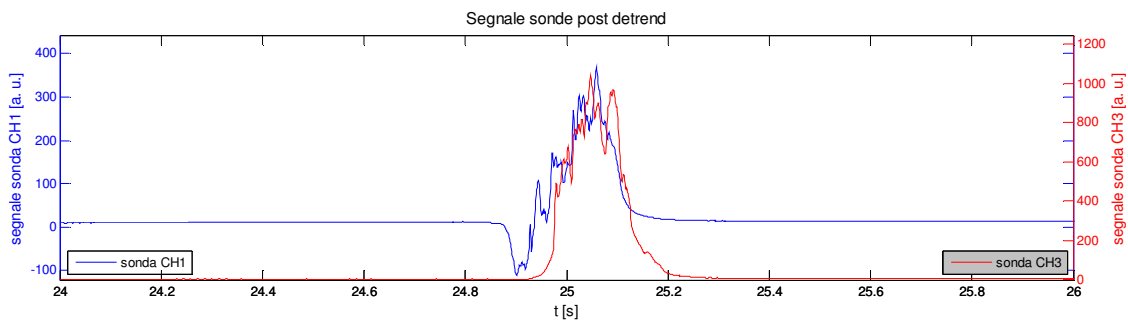
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 9.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 12.43 giorno 07/09/11

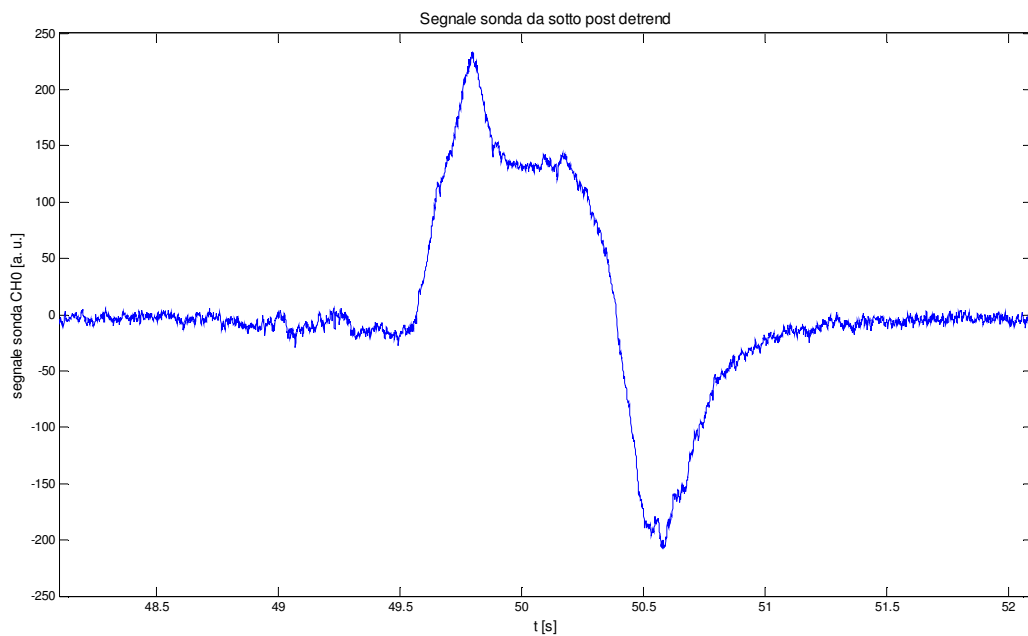
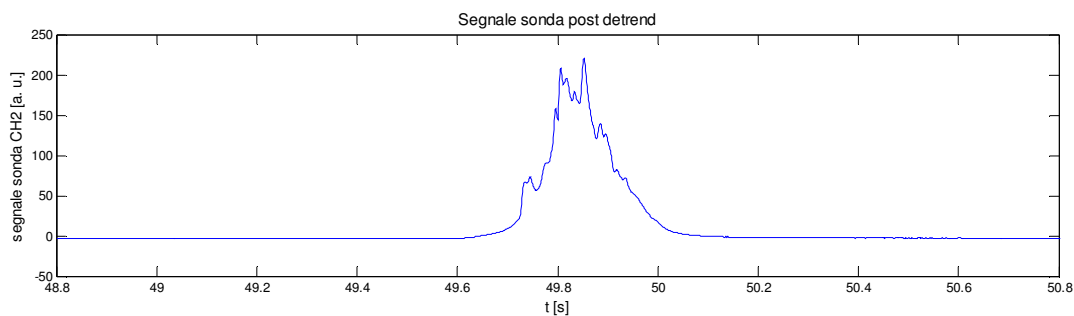
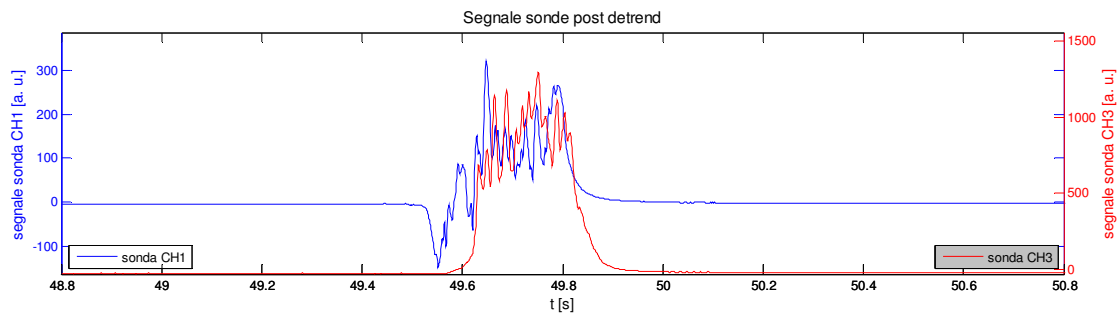
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 9.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



ore 13.40 giorno 07/09/11

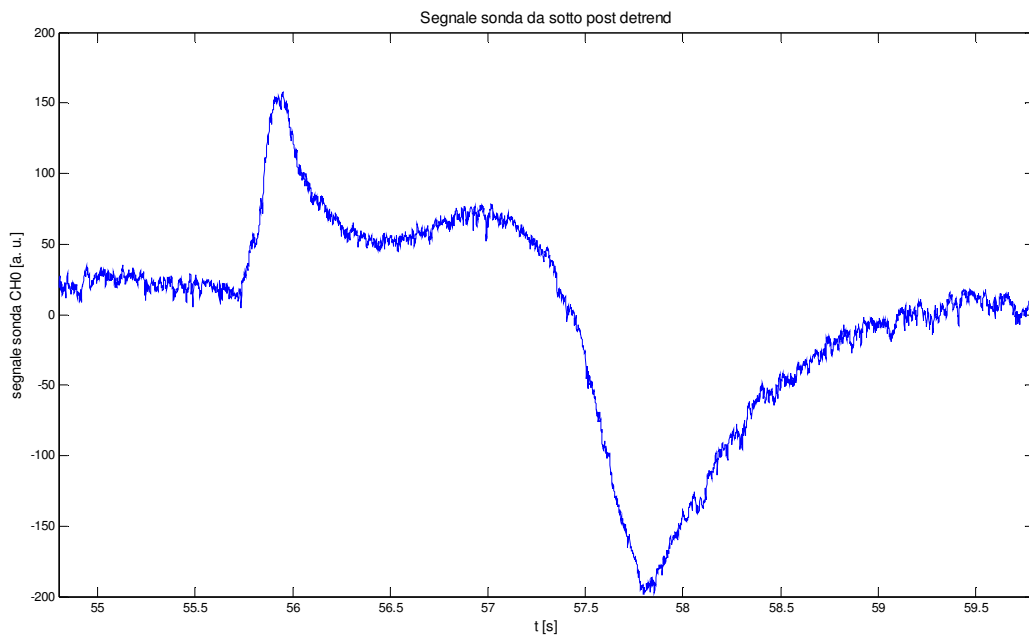
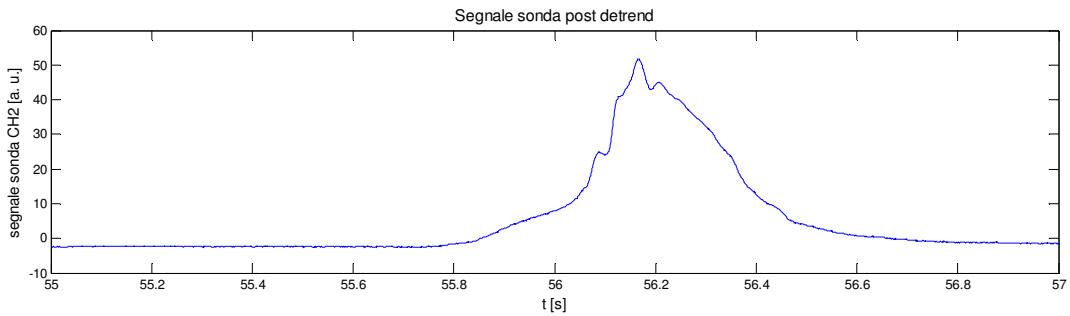
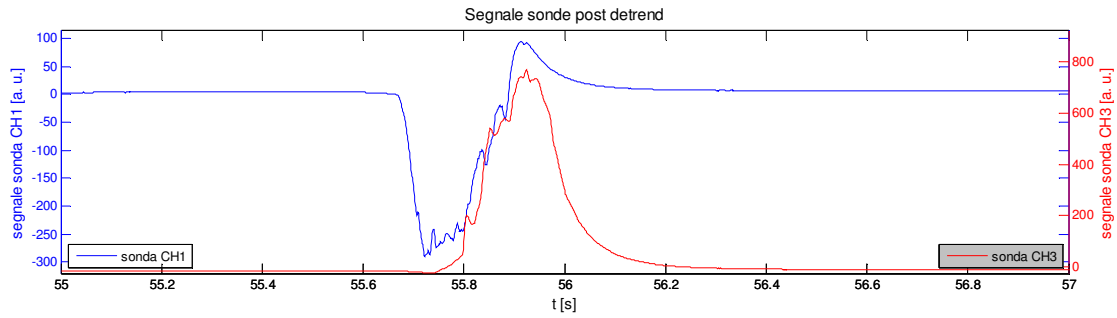
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 9.0% in oxycombustione

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 13.43 giorno 07/09/11

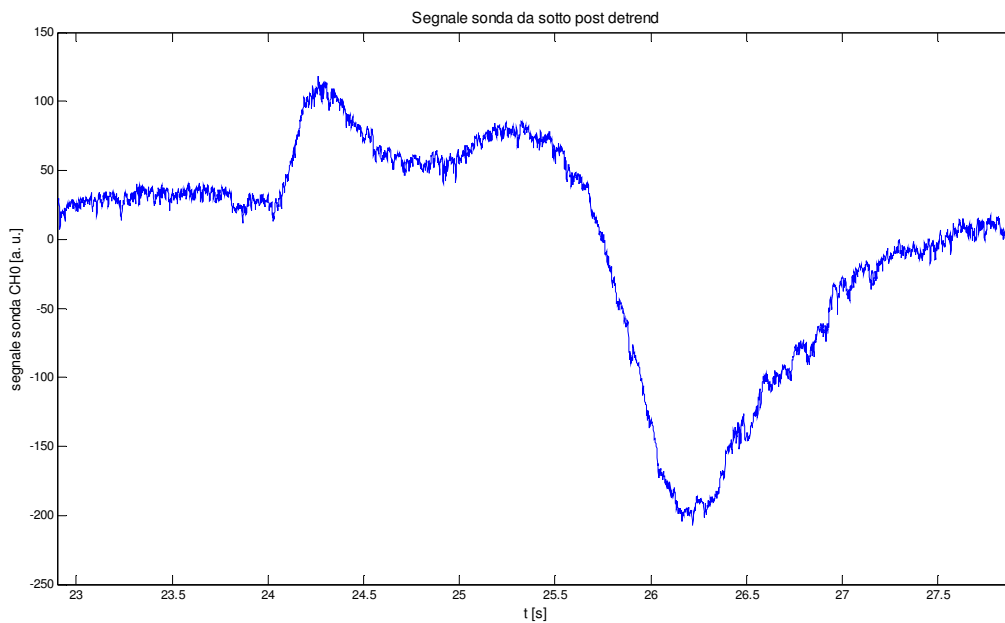
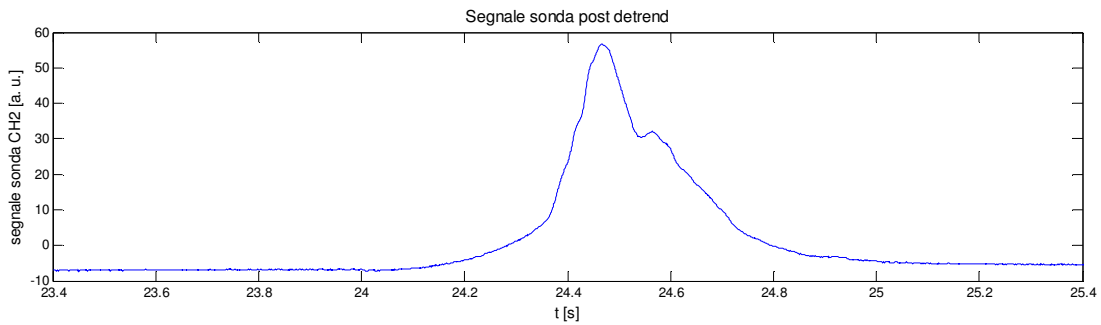
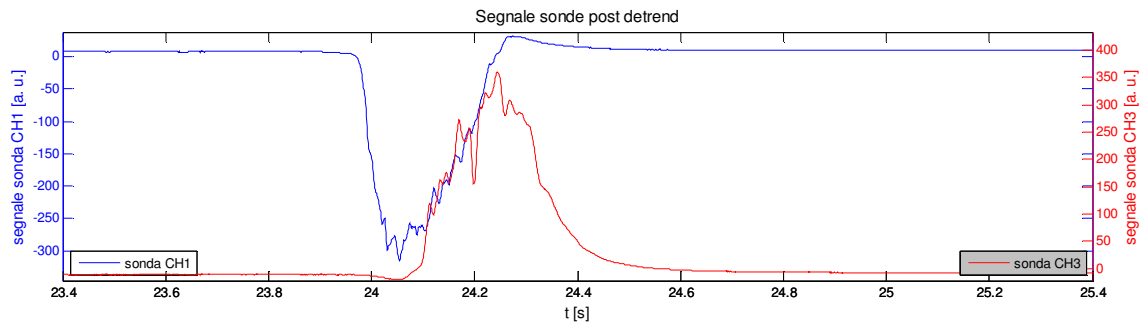
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0% in oxycombustione

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 13.46 giorno 07/09/11

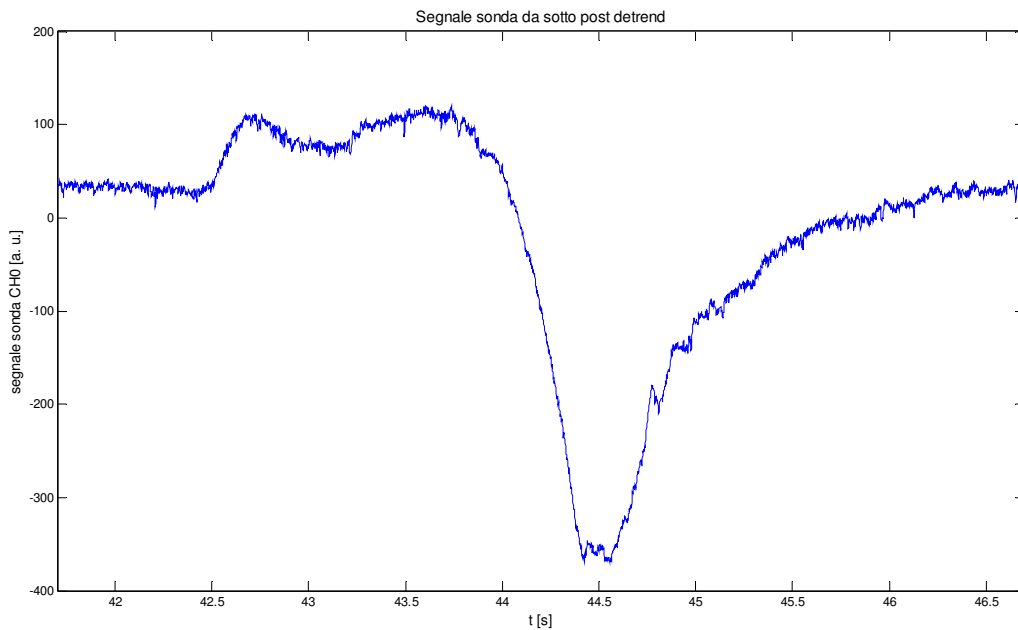
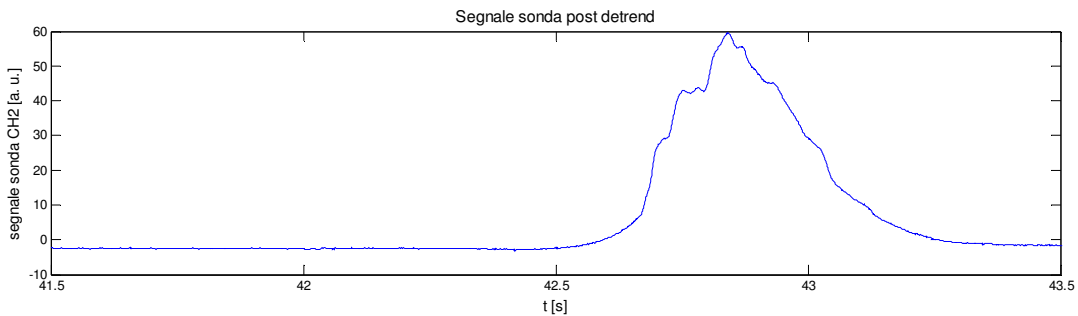
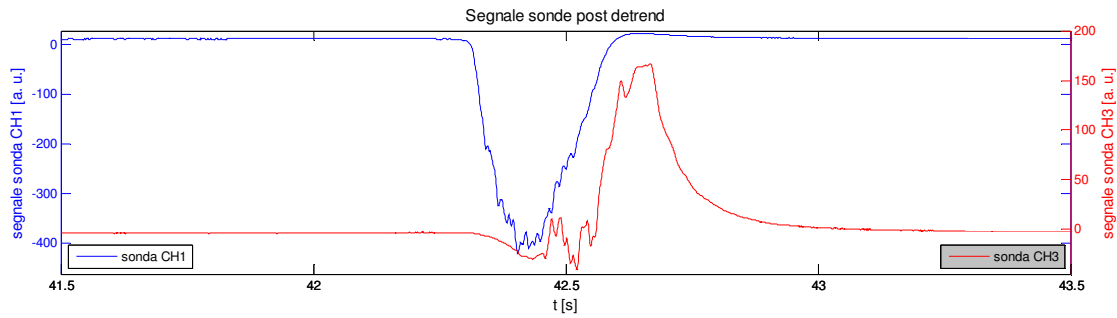
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.0% in oxycombustione

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 13.49 giorno 07/09/11

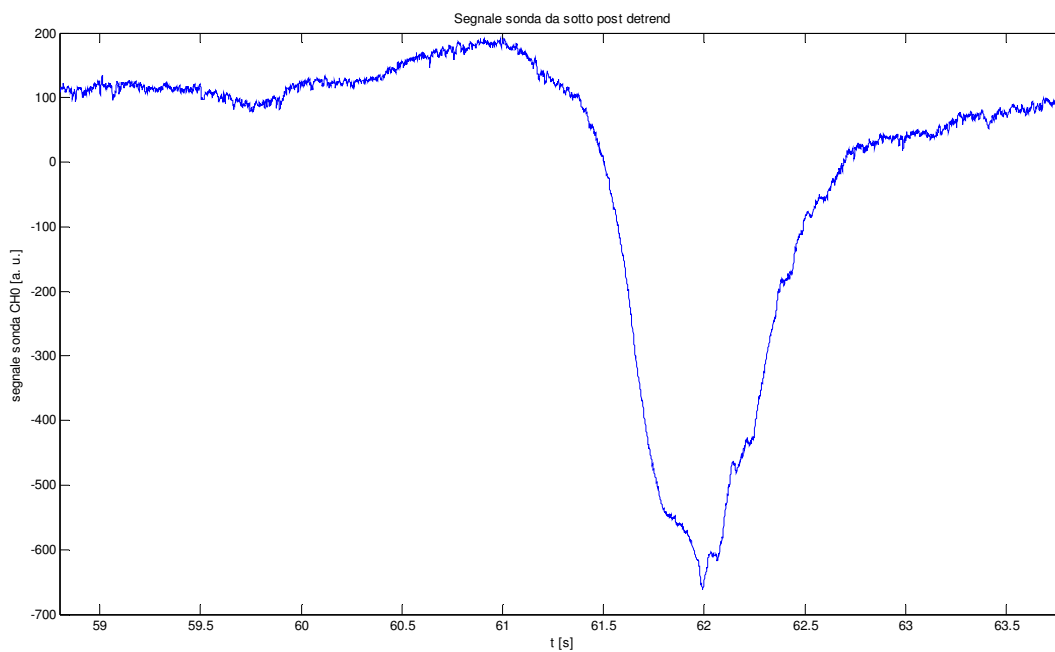
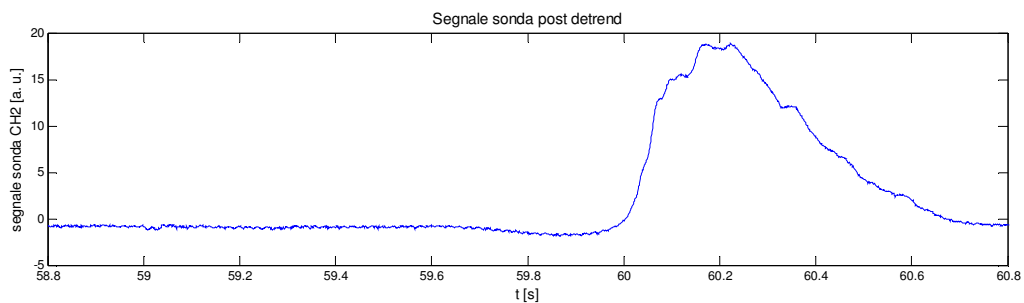
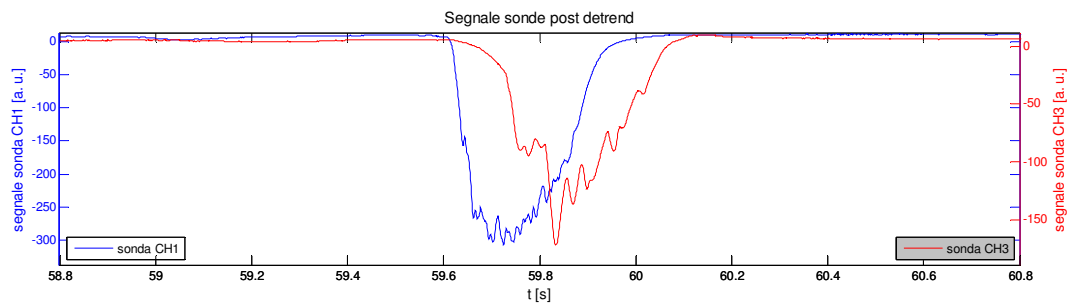
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.8% in oxycombustione

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 16.52 giorno 07/09/11

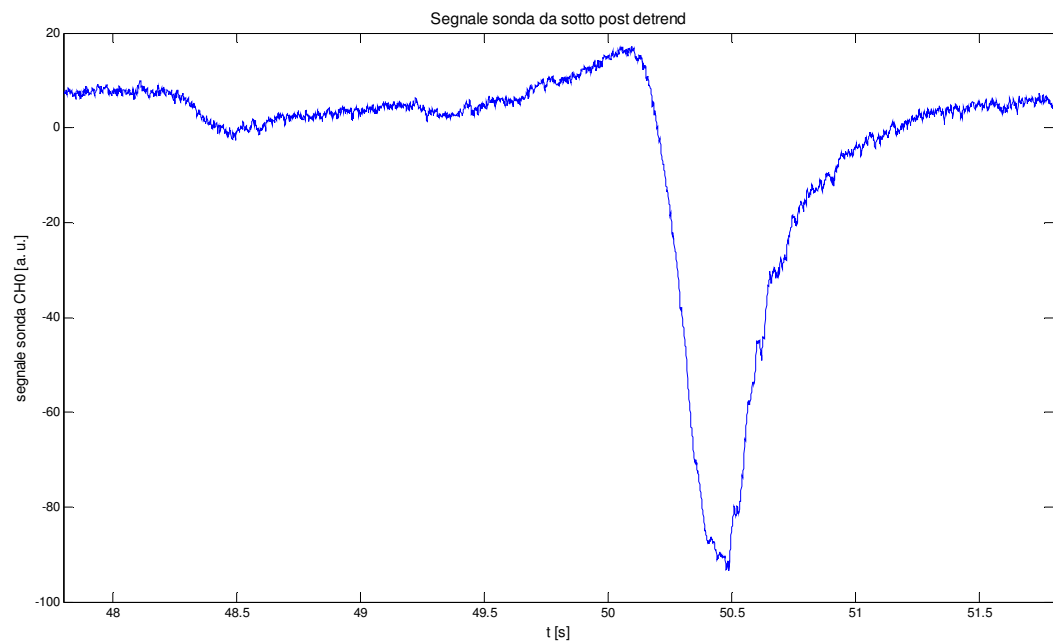
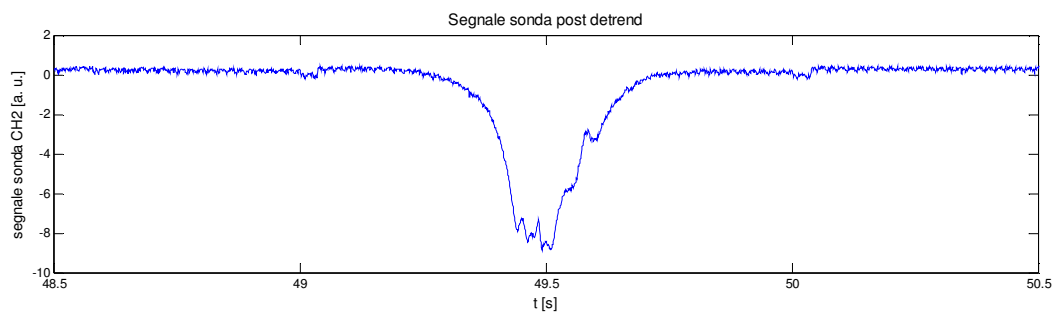
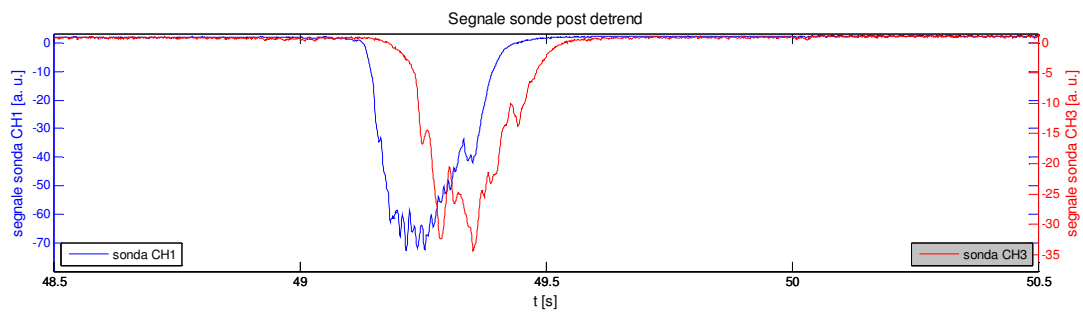
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 16.55 giorno 07/09/11

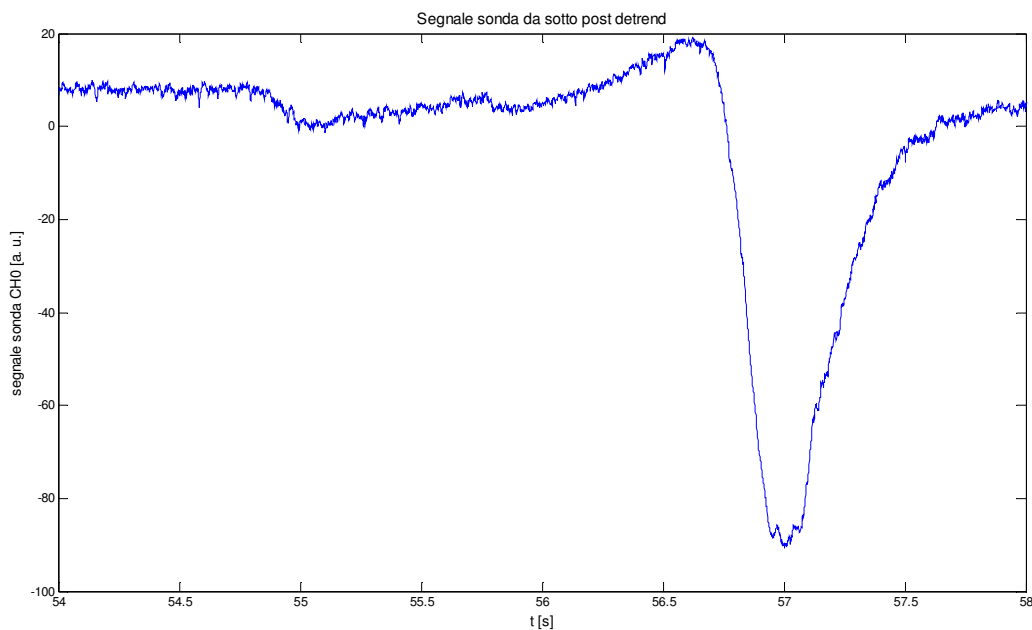
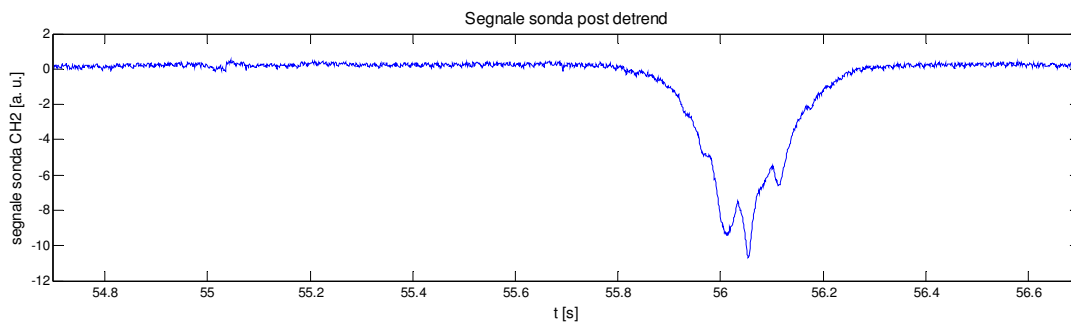
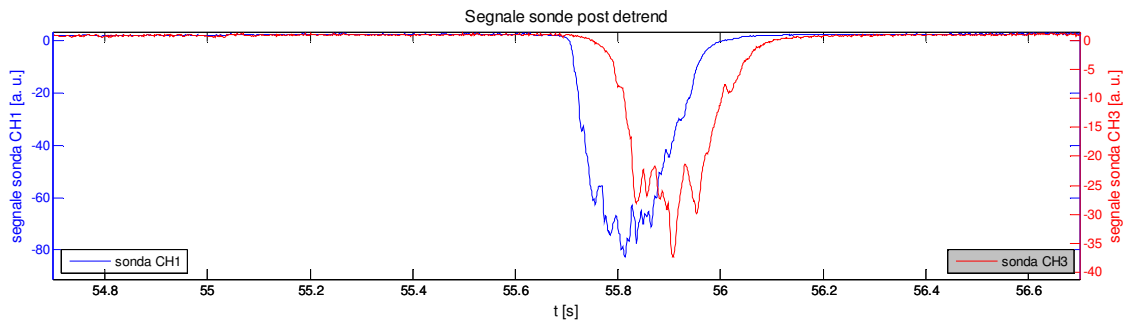
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.7%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.09 giorno 07/09/11

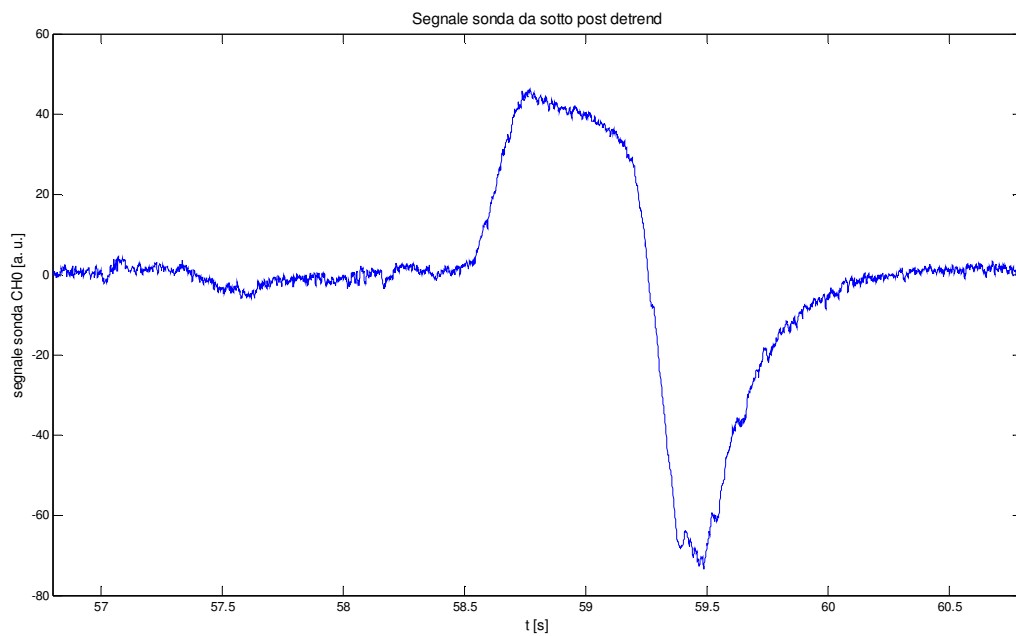
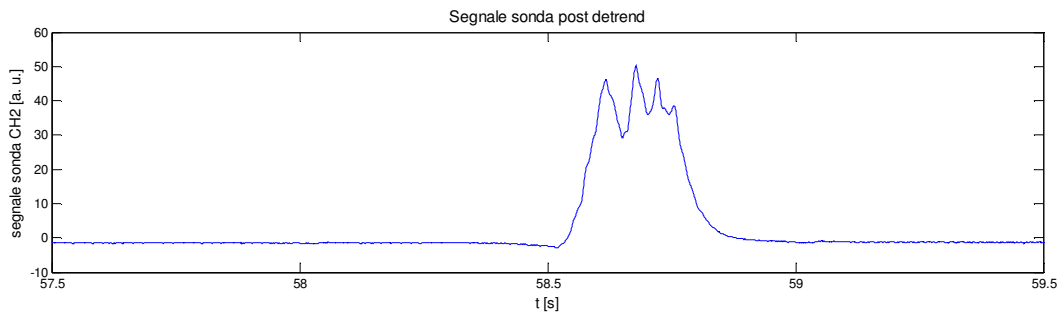
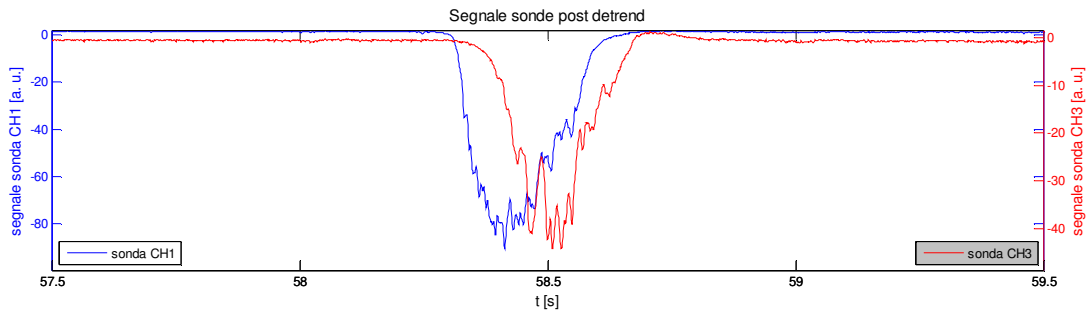
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.2%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.11 giorno 07/09/11

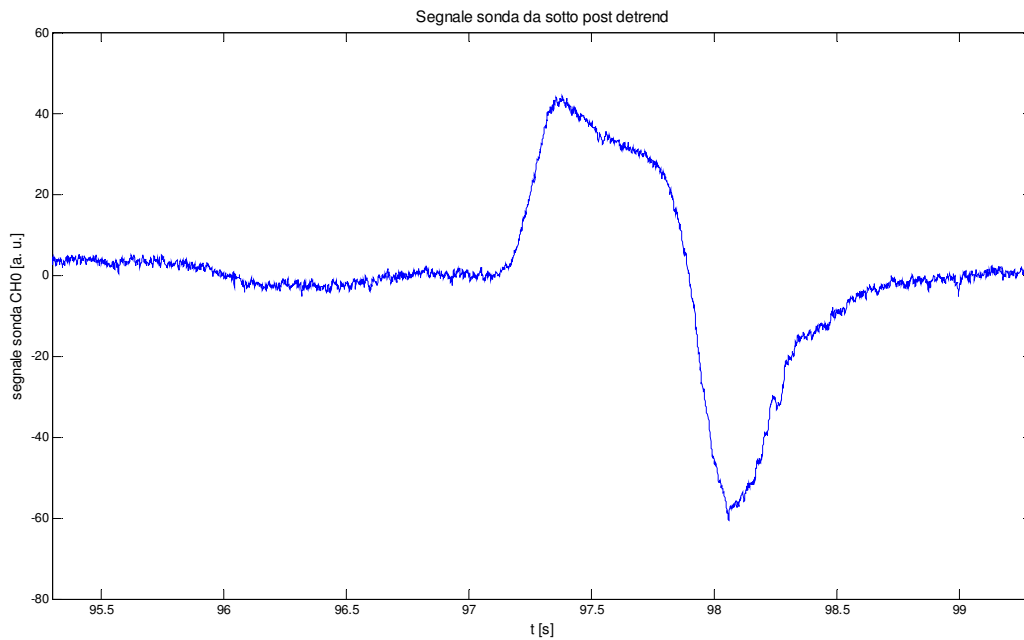
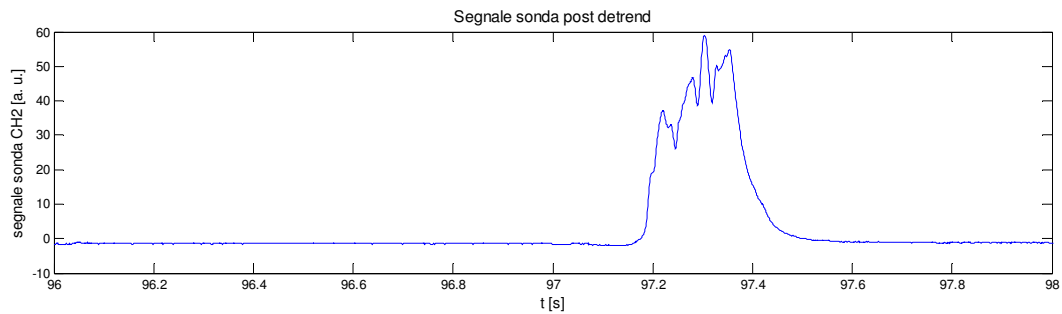
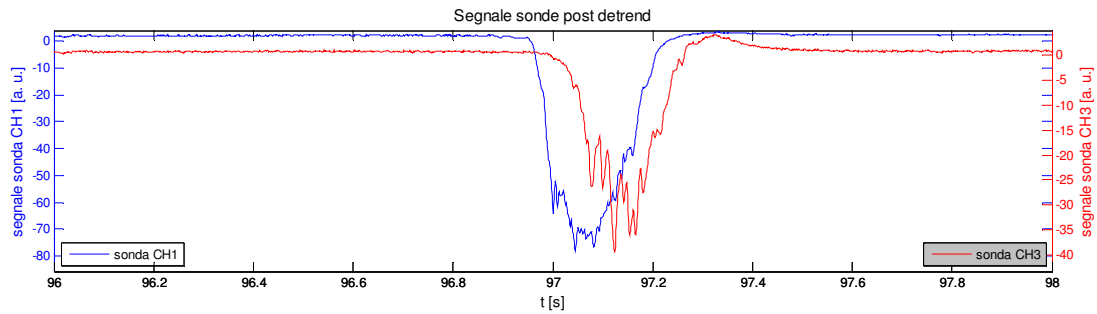
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.2%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.28 giorno 07/09/11

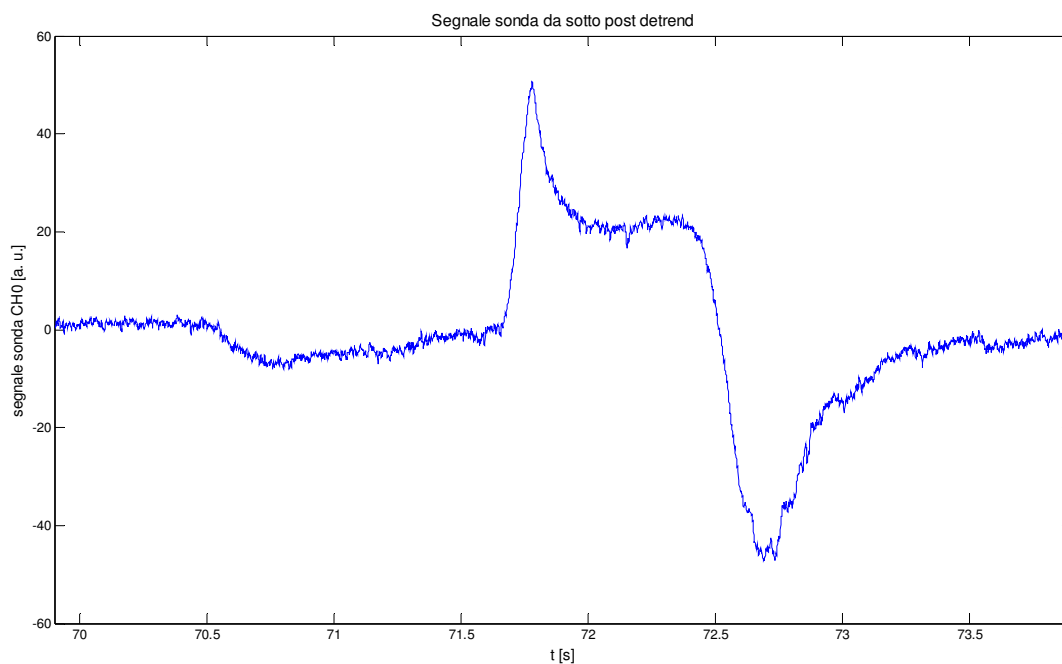
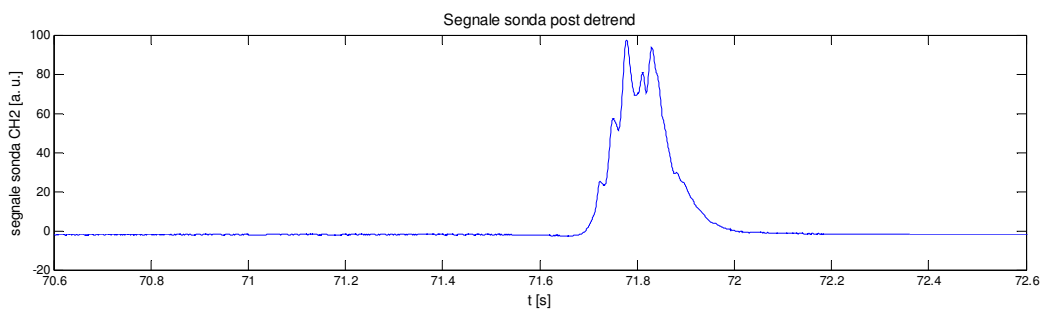
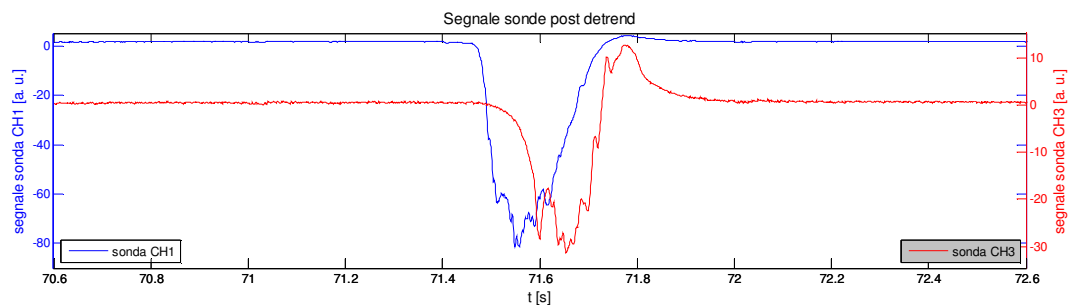
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.3%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.30 giorno 07/09/11

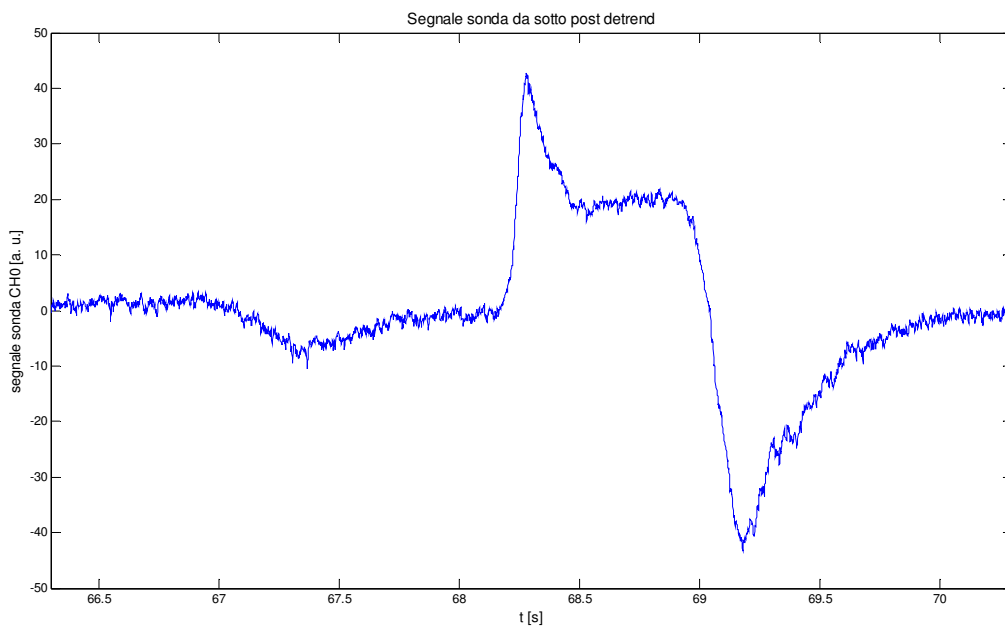
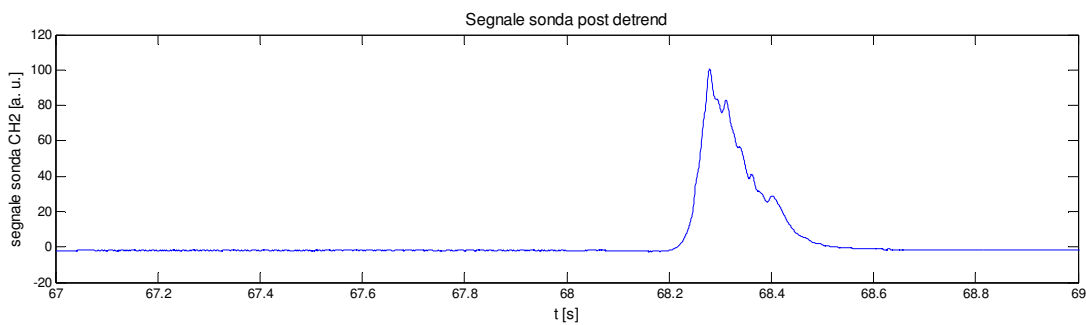
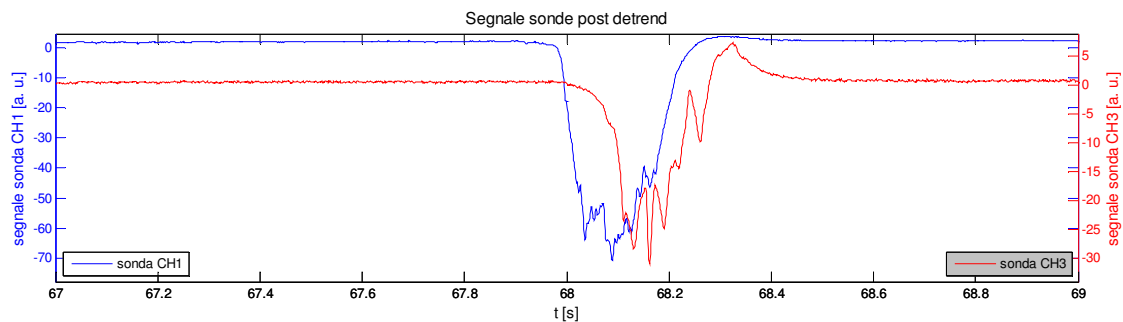
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $38 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.3%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.41 giorno 07/09/11

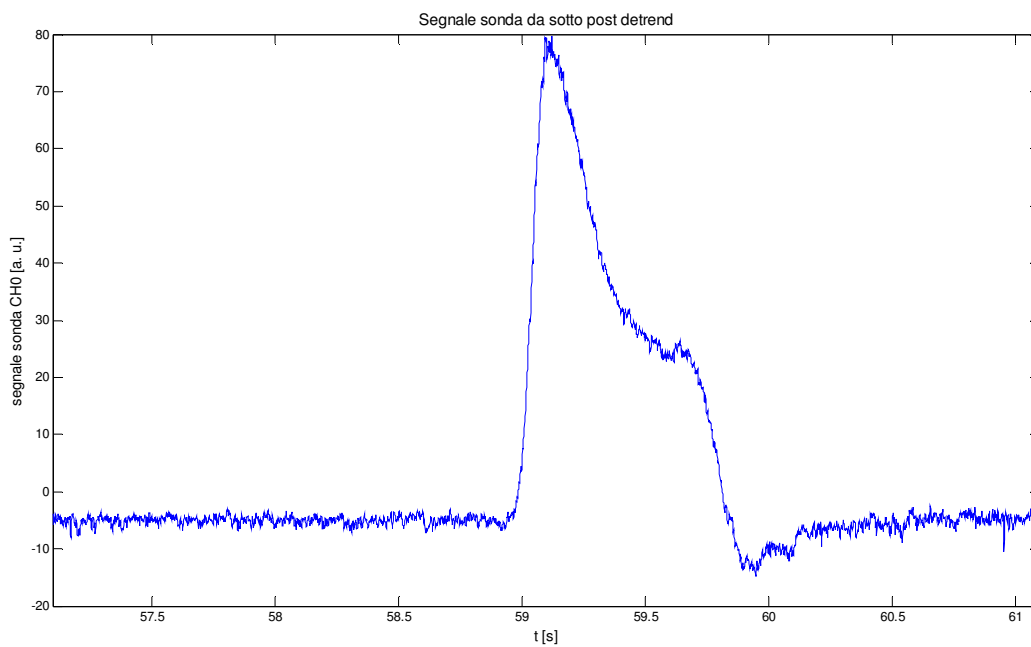
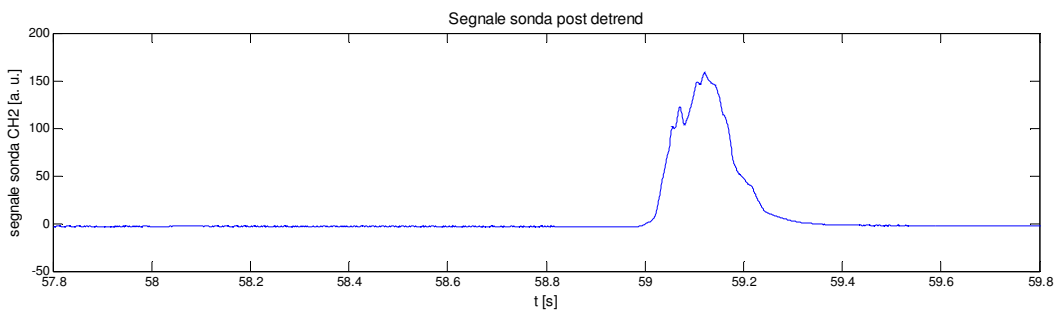
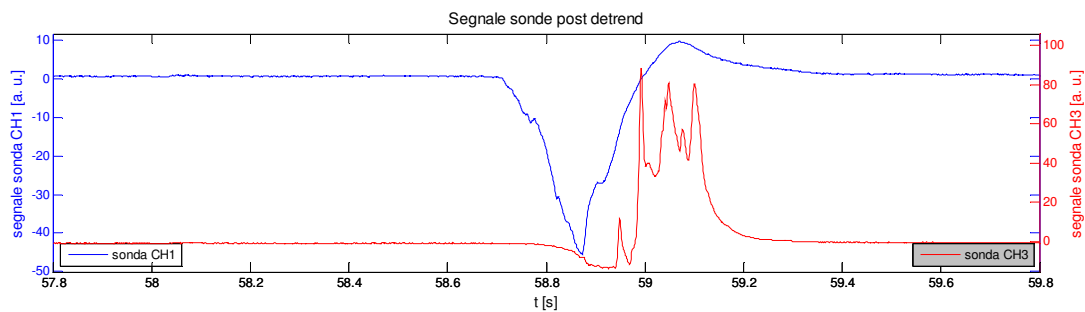
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.3%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.44 giorno 07/09/11

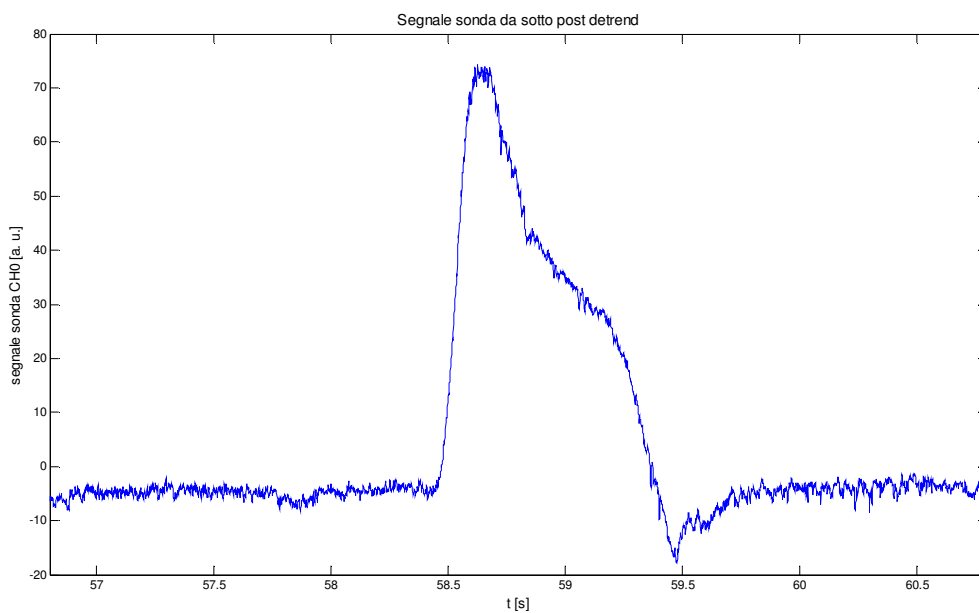
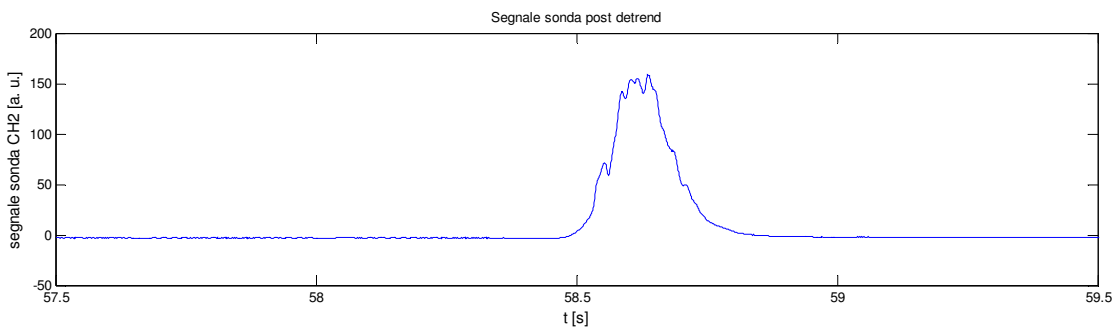
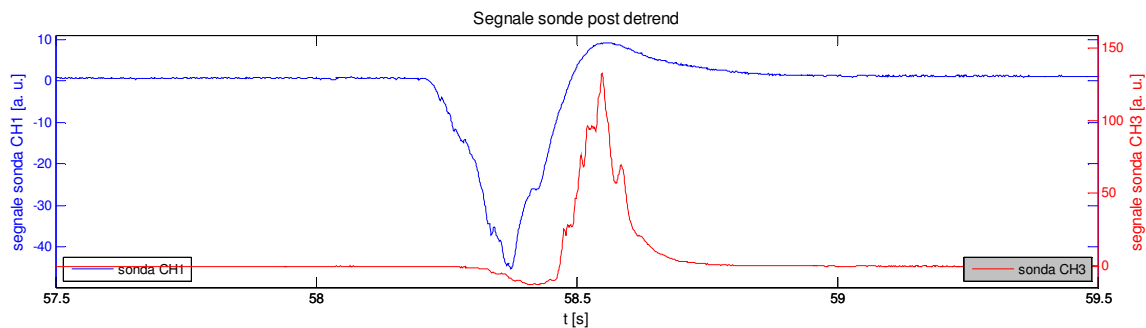
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.3%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.49 giorno 07/09/11

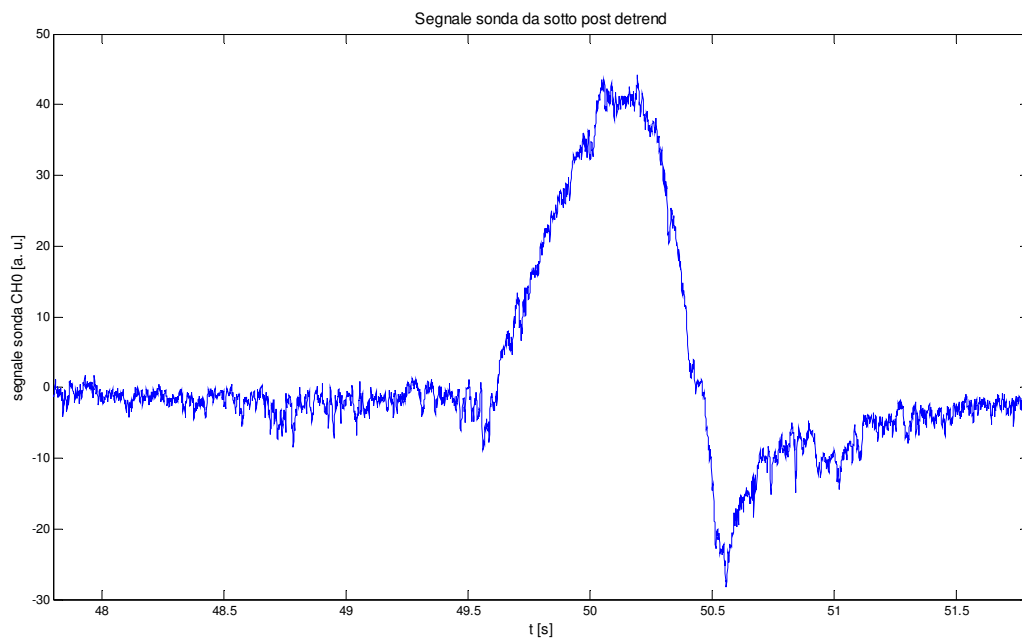
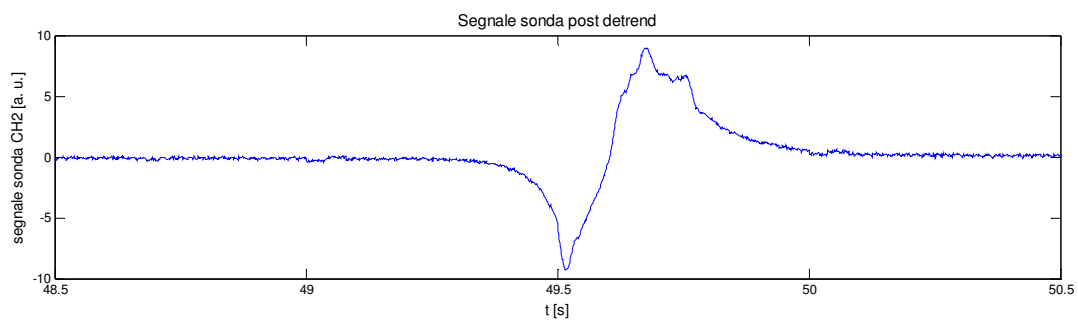
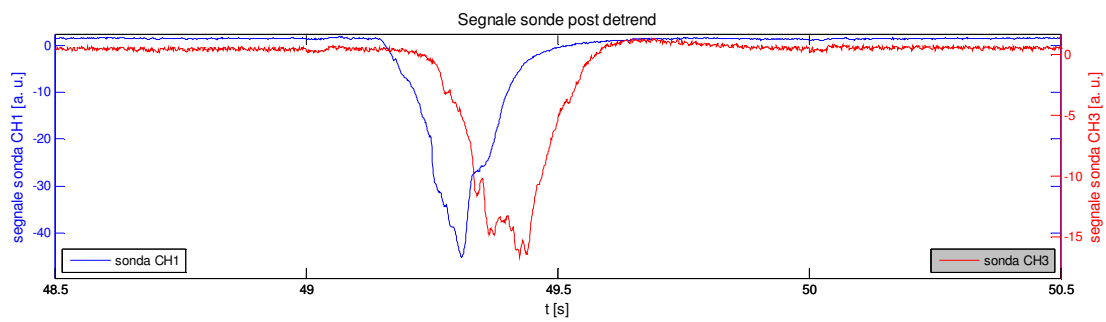
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.2%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.52 giorno 07/09/11

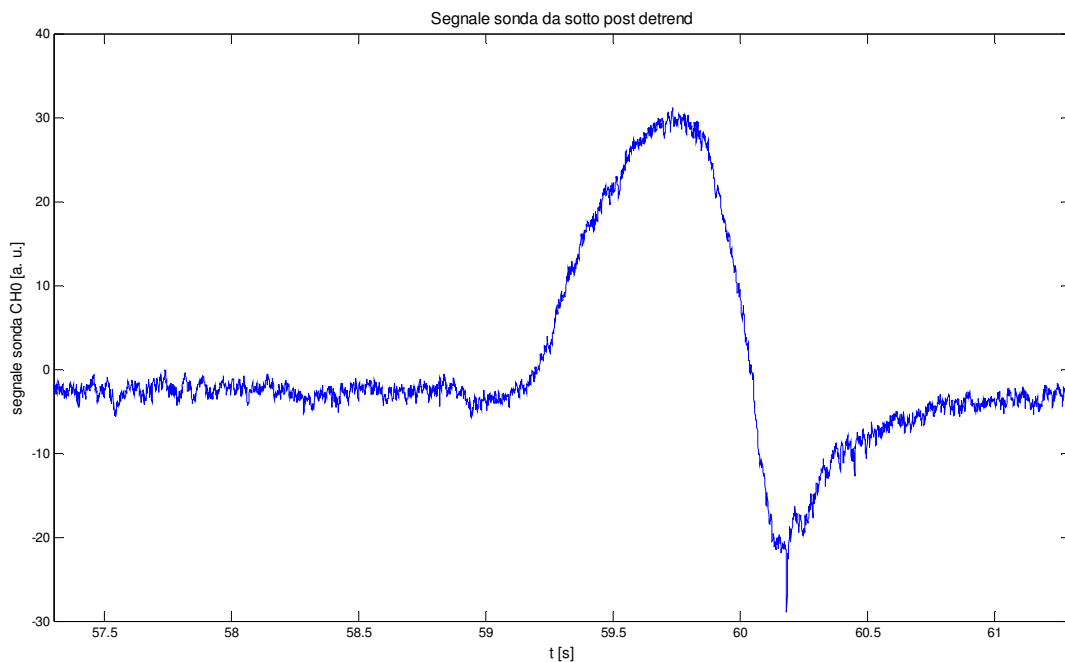
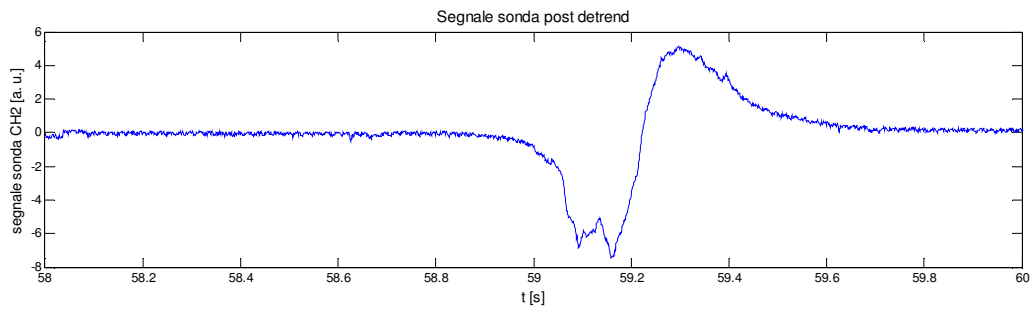
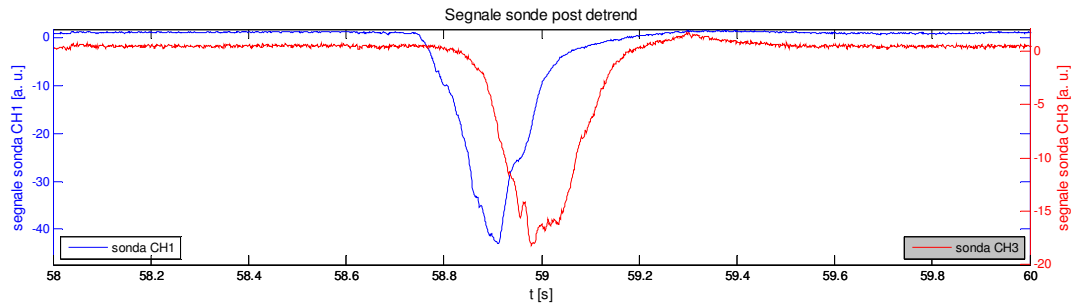
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 3.2%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 17.57 giorno 07/09/11

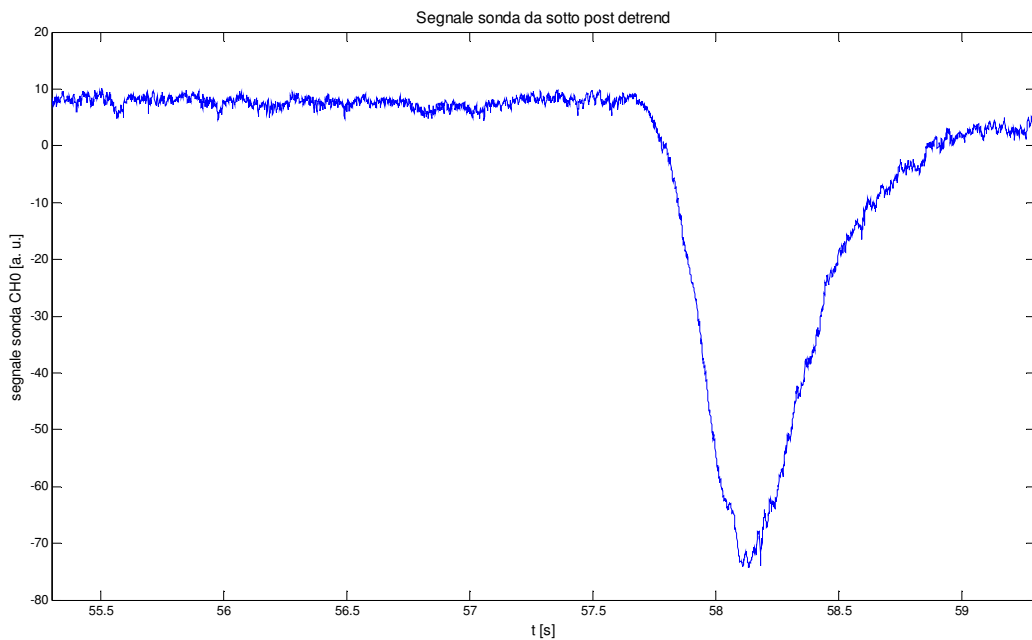
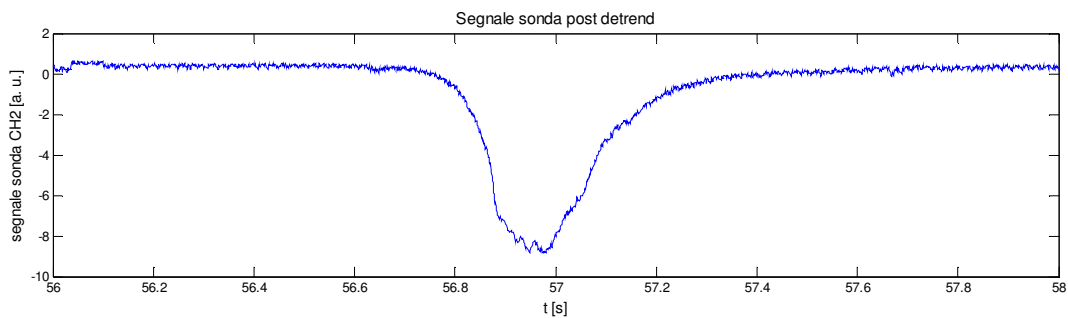
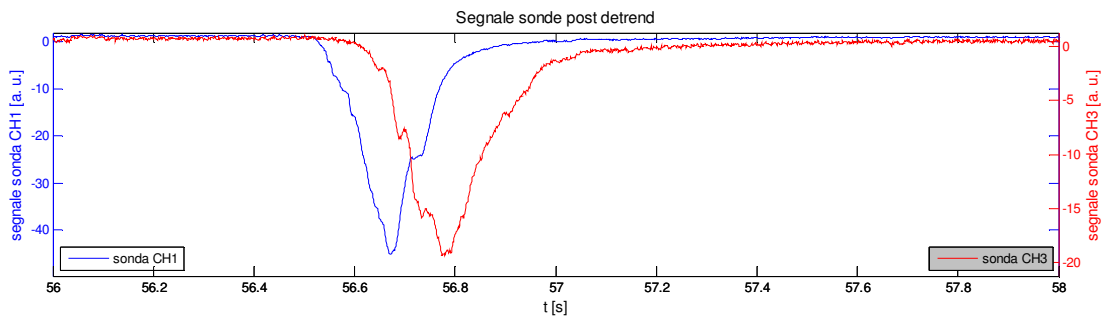
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 18.00 giorno 07/09/11

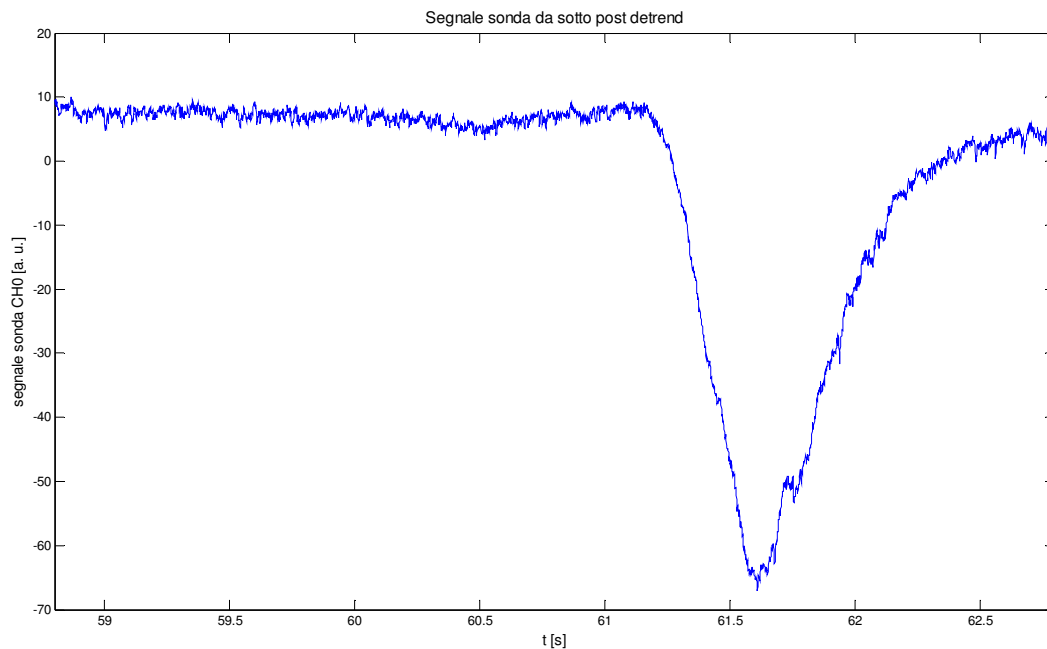
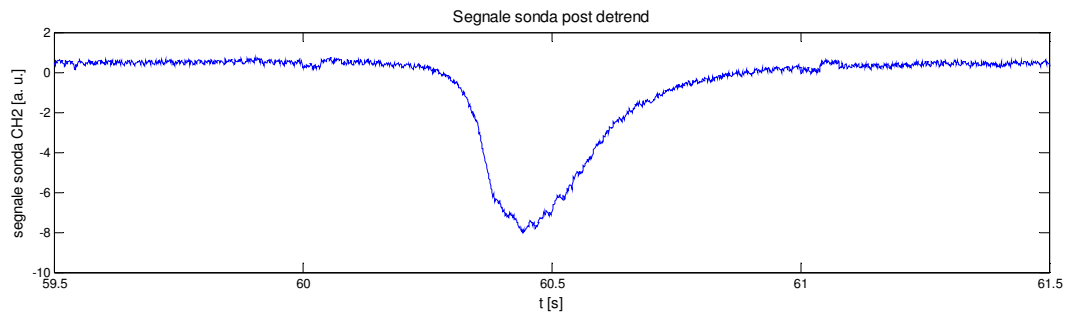
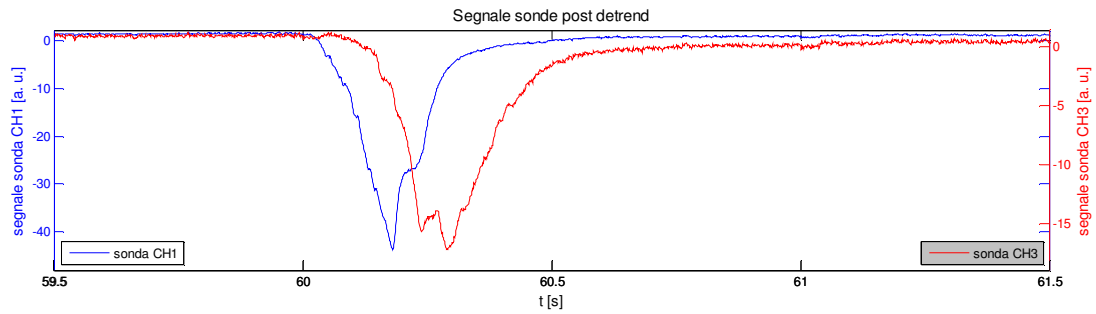
condizioni operative:

carbone S. A. tal quale granulometria $>125\ \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 0.5%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



4.2. Char di carbone

- ore 12.56 giorno 07/09/11

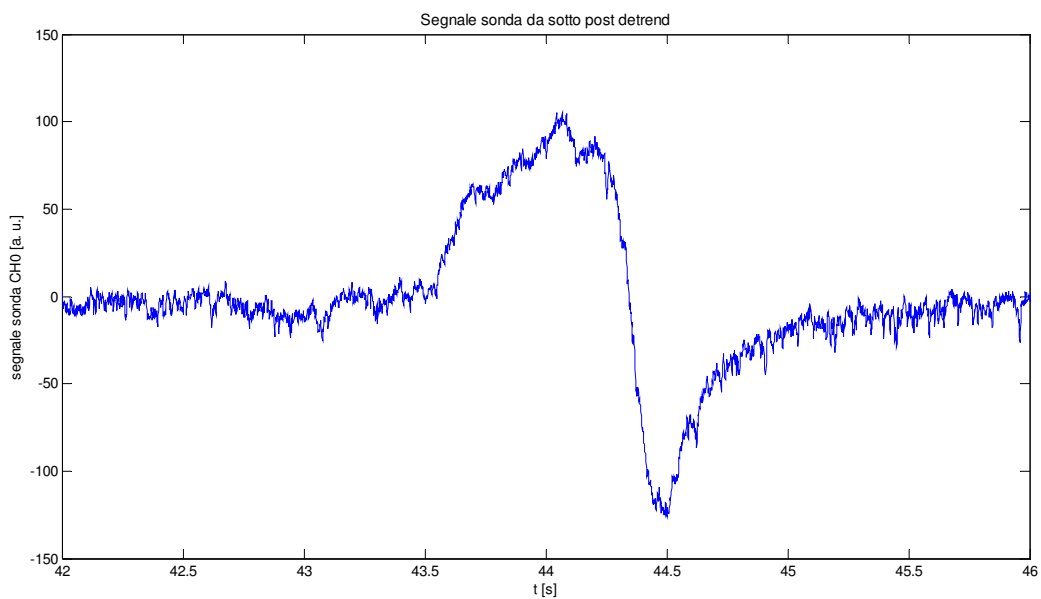
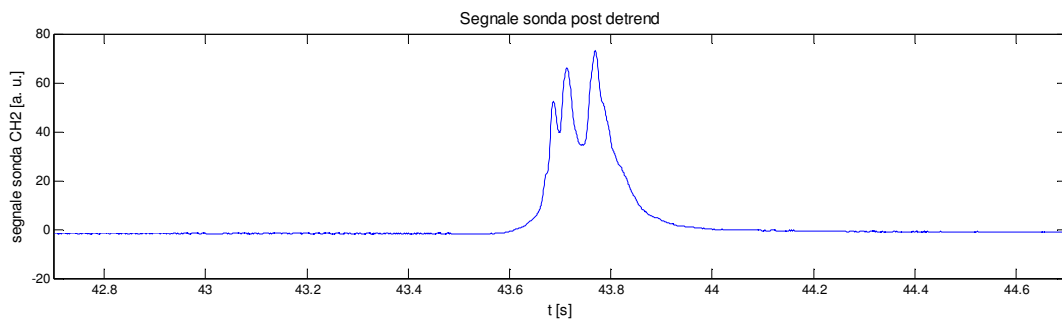
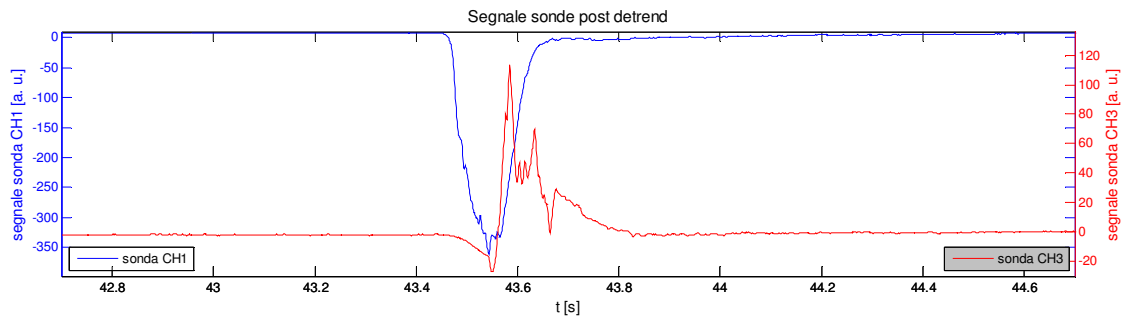
condizioni operative:

char di carbone S. A. granulometria $90 < x < 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 12.59 giorno 07/09/11

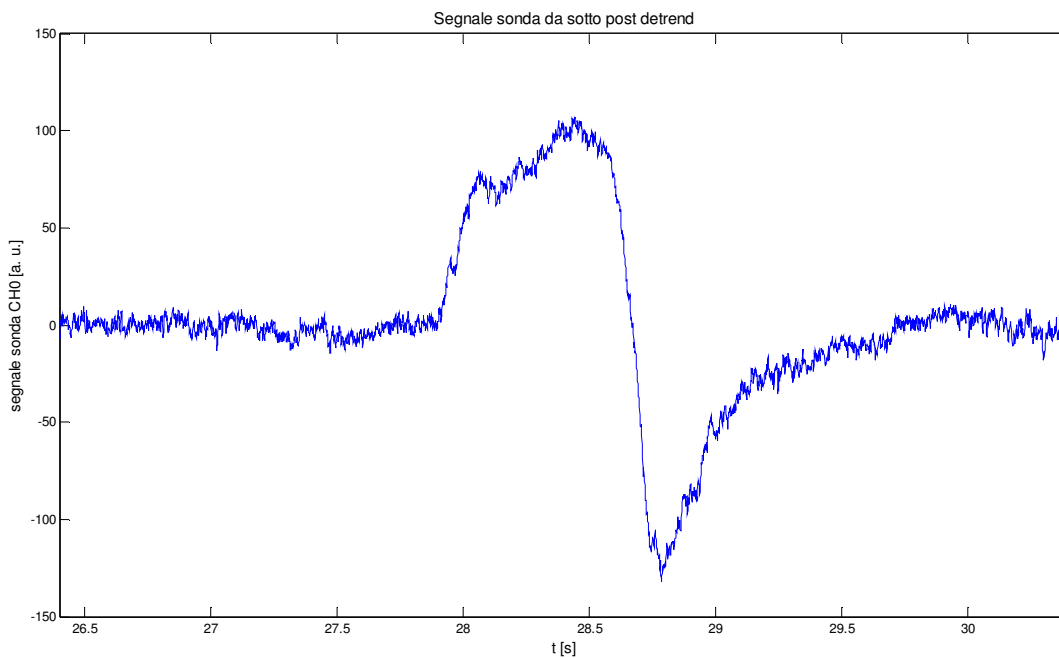
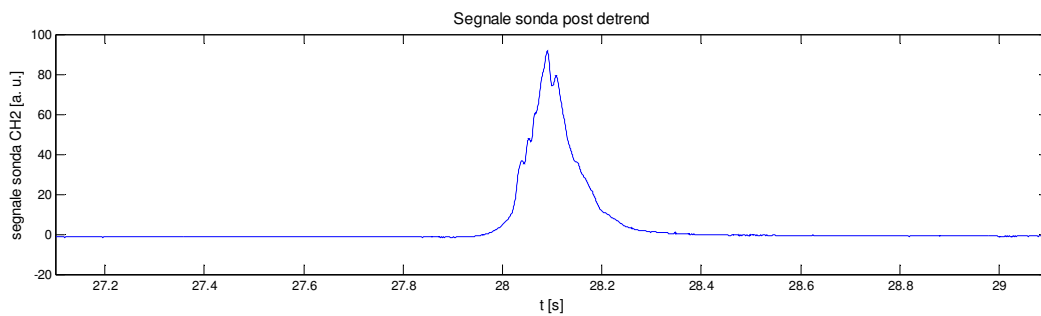
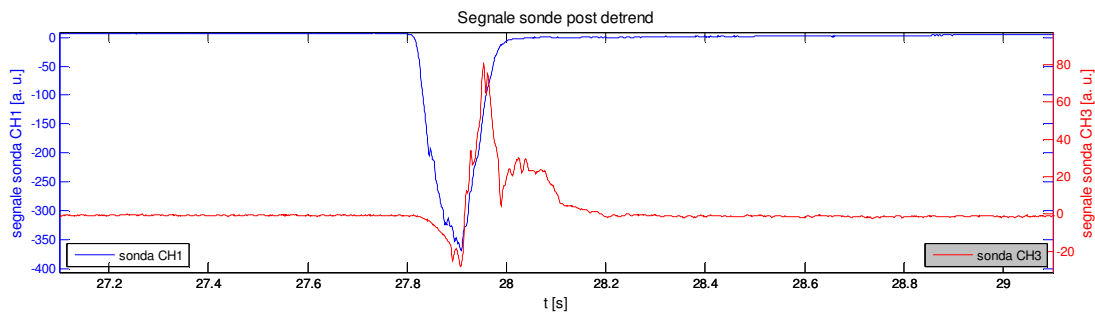
condizioni operative:

char di carbone S. A. granulometria $90 < x < 125 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 13.05 giorno 07/09/11

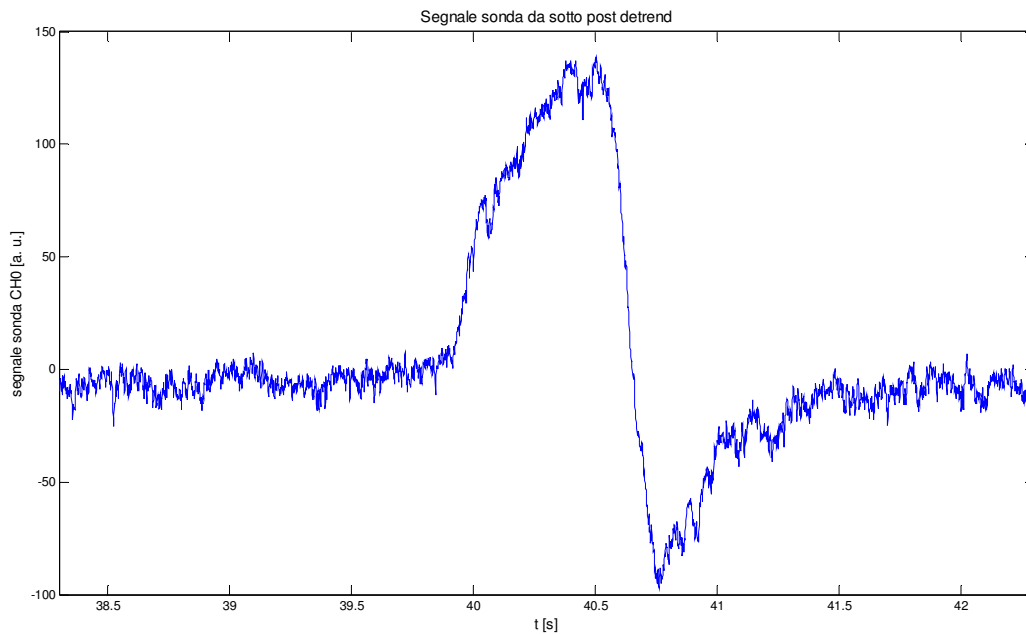
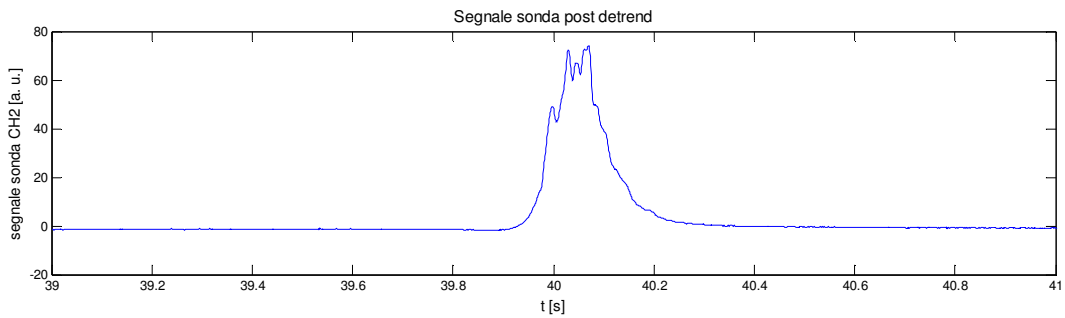
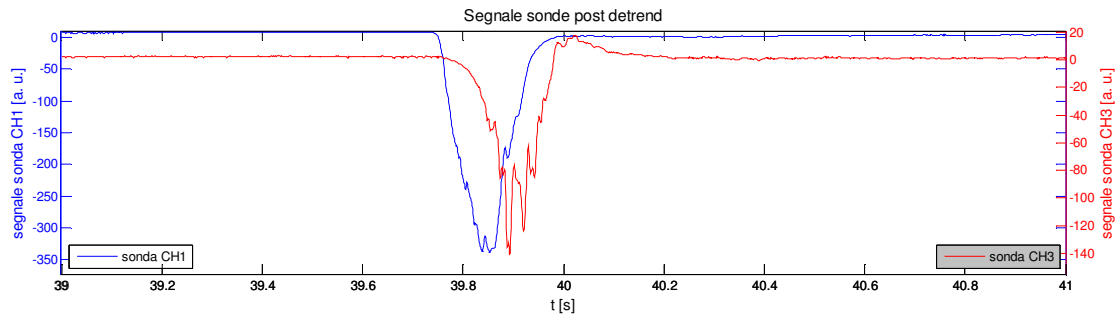
condizioni operative:

char di carbone S. A. granulometria $45 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 13.08 giorno 07/09/11

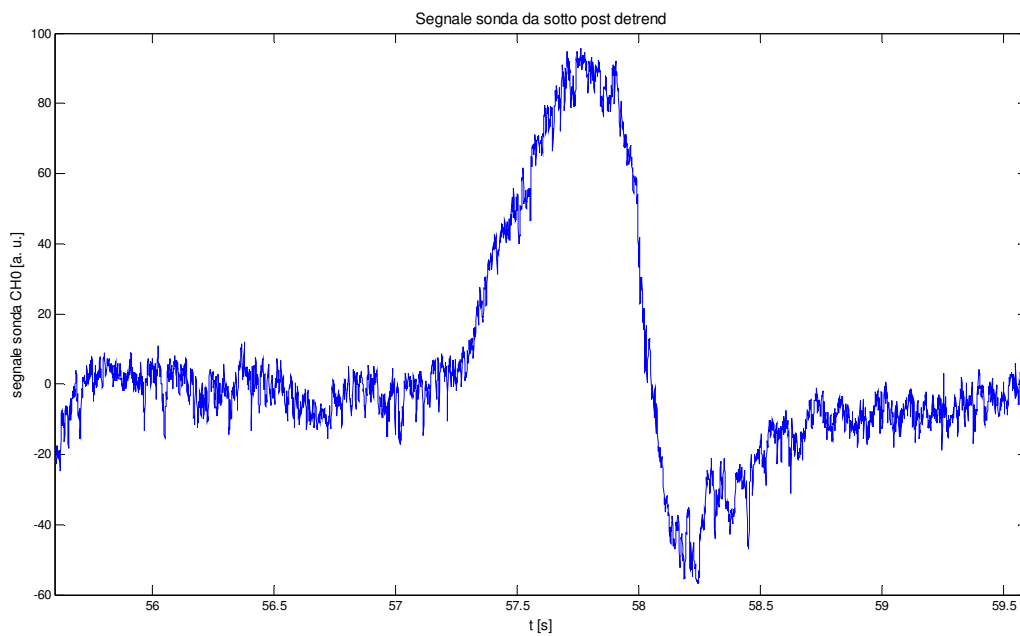
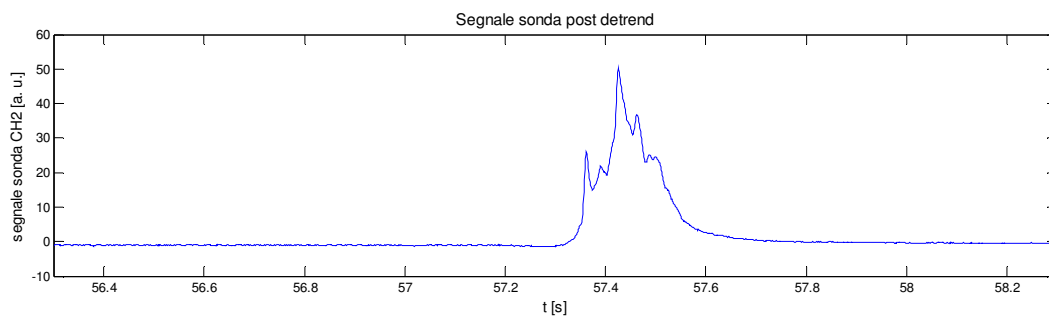
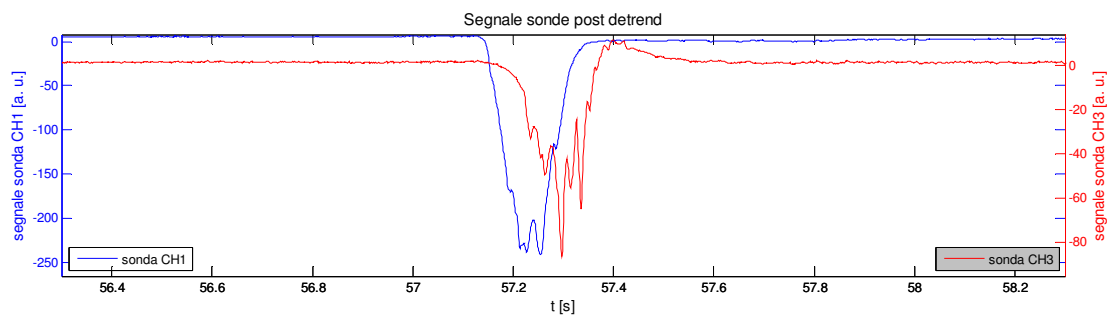
condizioni operative:

char di carbone S. A. granulometria $45 < x < 90 \mu\text{m}$

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 1100°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



4.3. Biomassa

- ore 18.06 giorno 07/09/11

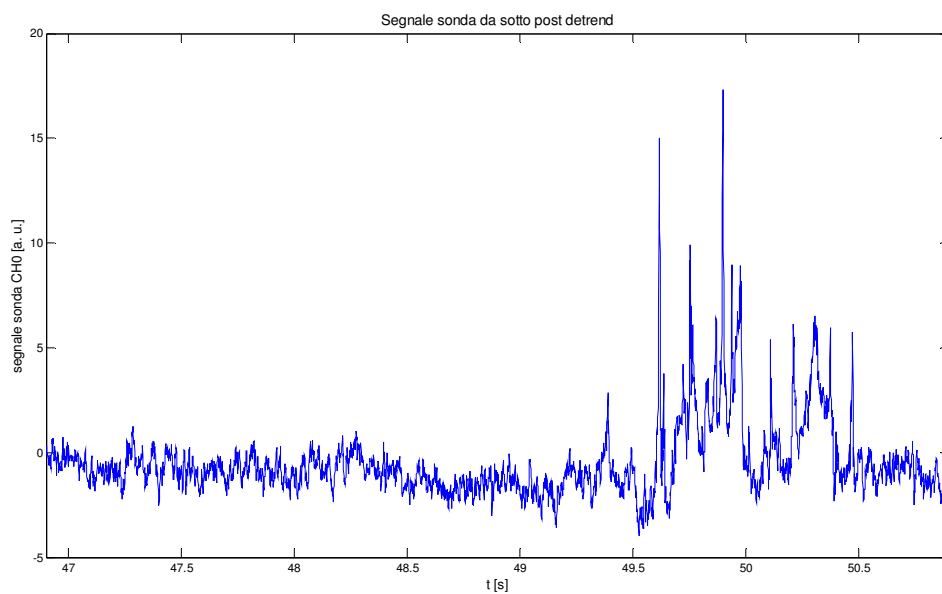
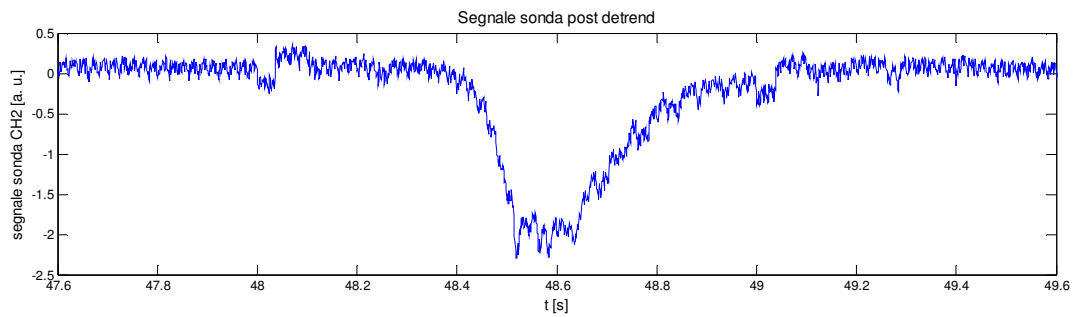
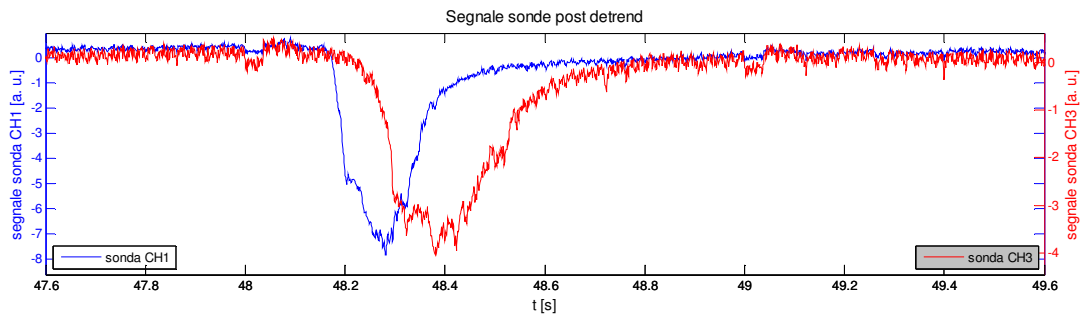
condizioni operative:

semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 0.4%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 18.09 giorno 07/09/11

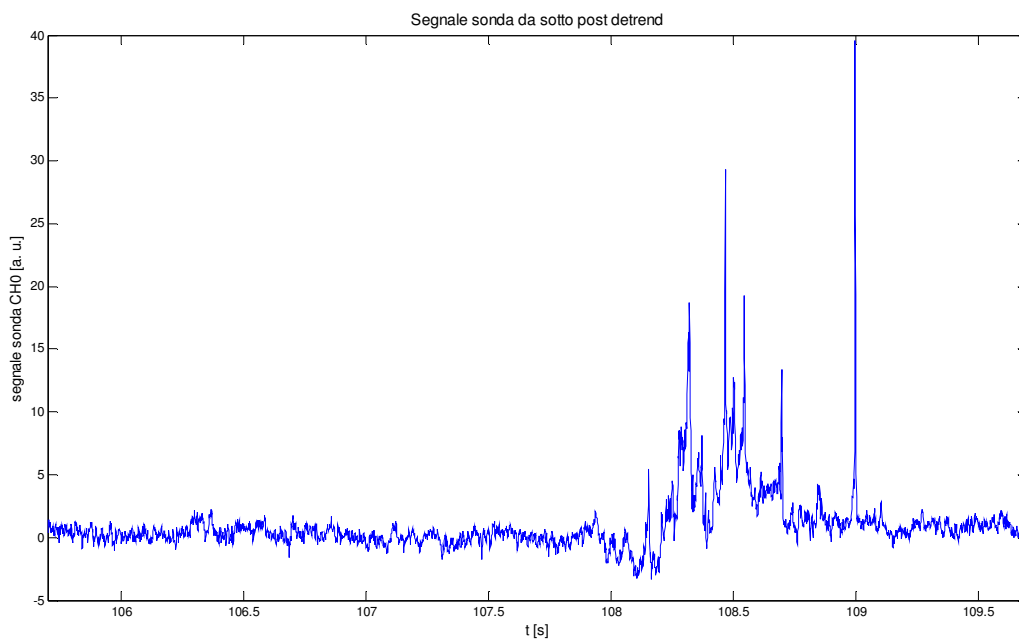
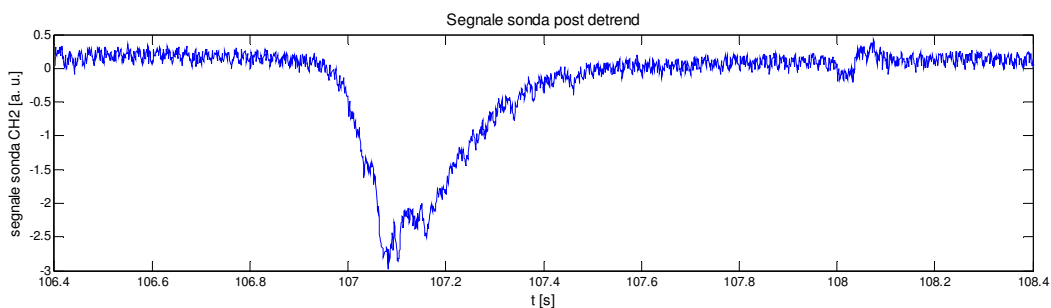
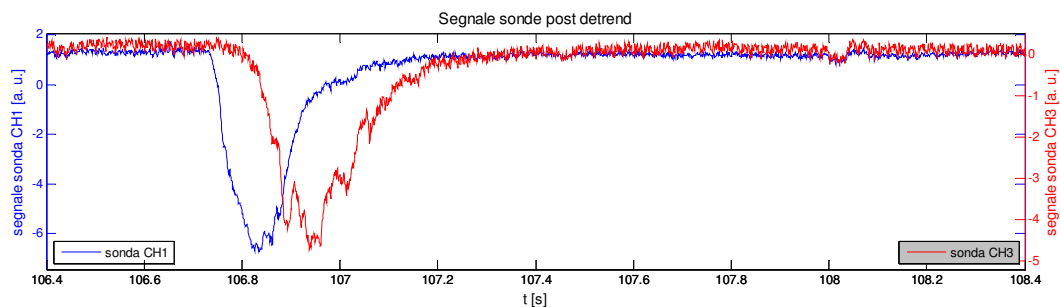
condizioni operative:

semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 0.4%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 18.12 giorno 07/09/11

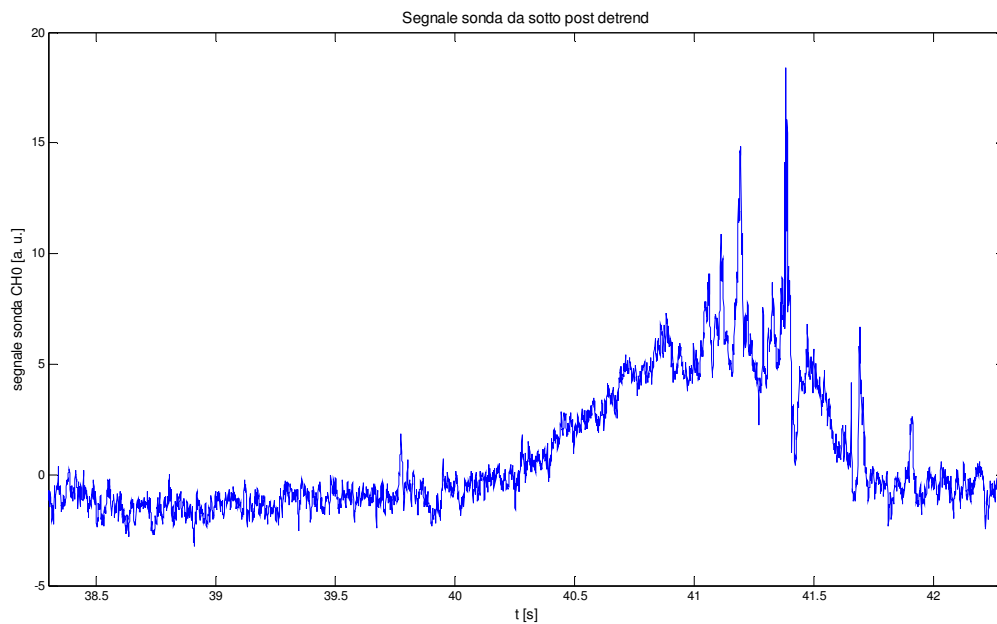
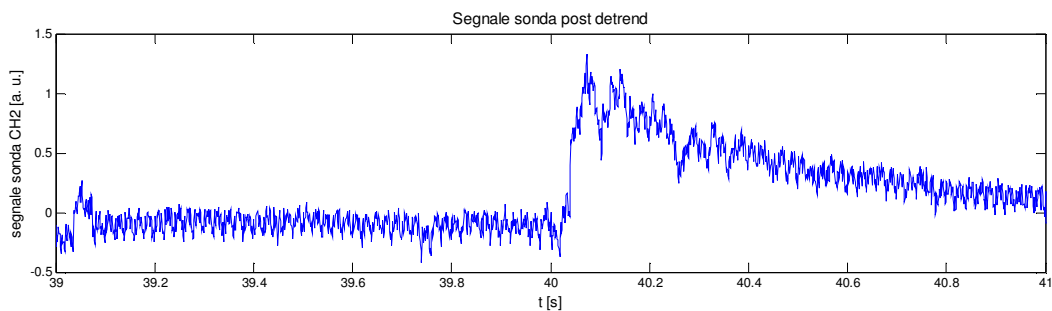
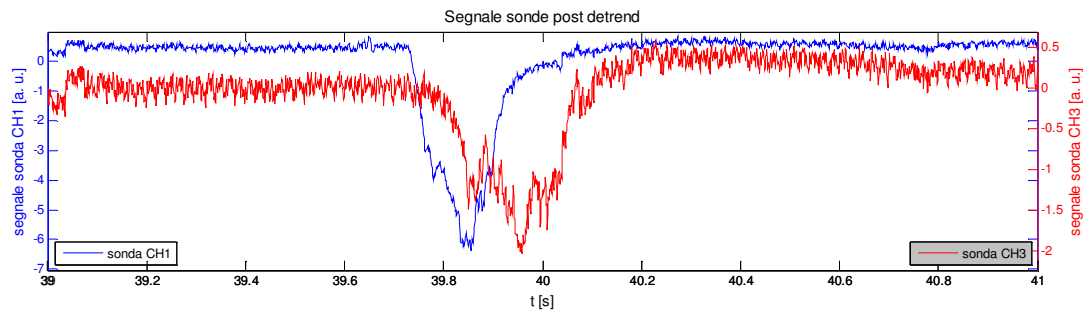
condizioni operative:

semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 3.2%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 18.16 giorno 07/09/11

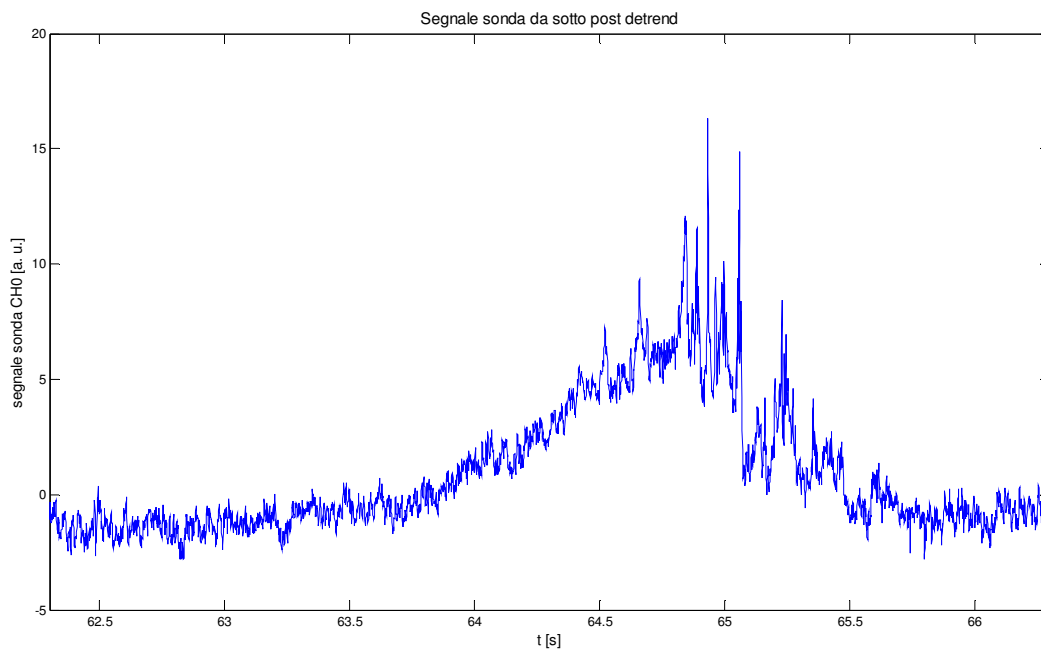
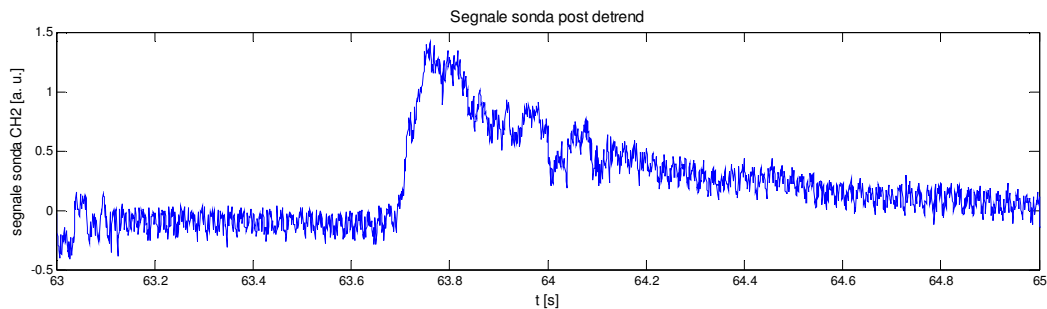
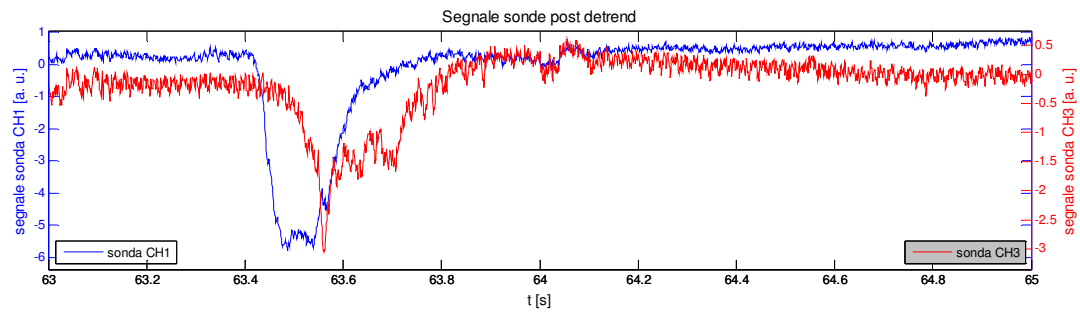
condizioni operative:

semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 3.2%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 18.23 giorno 07/09/11

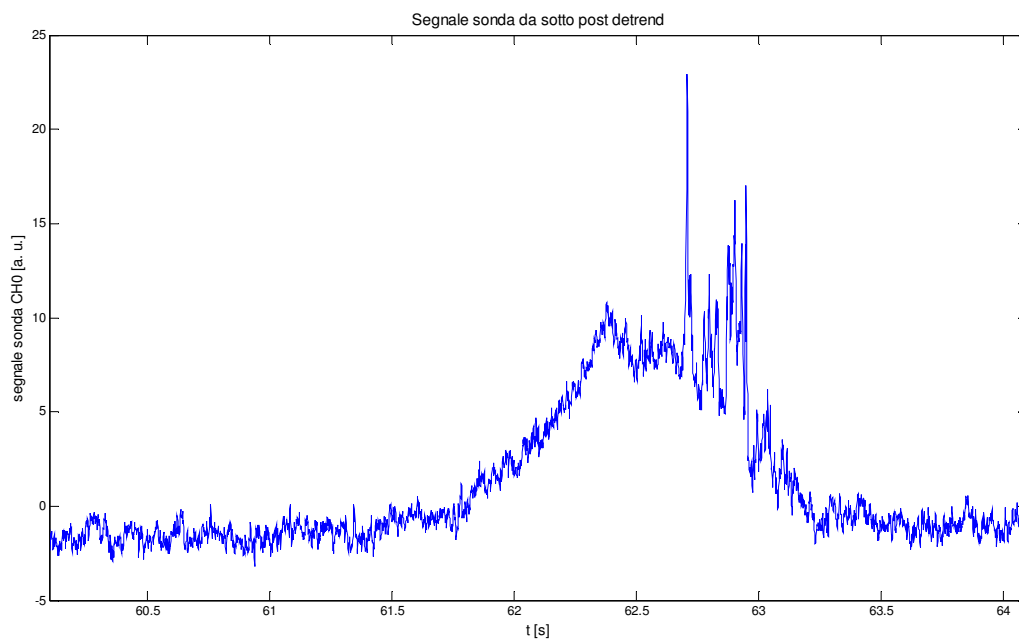
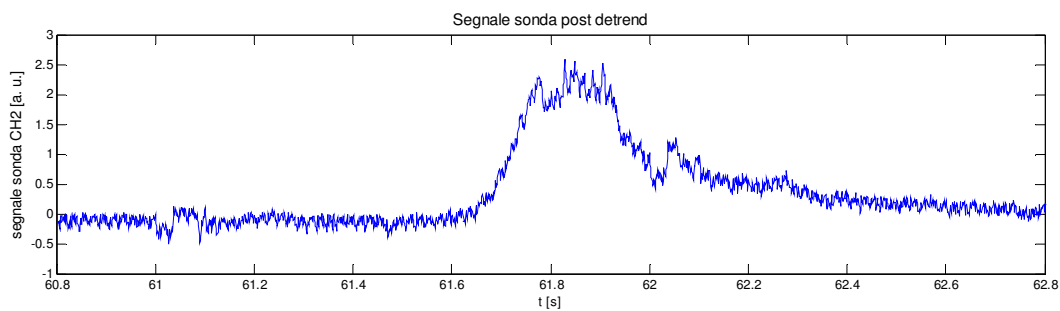
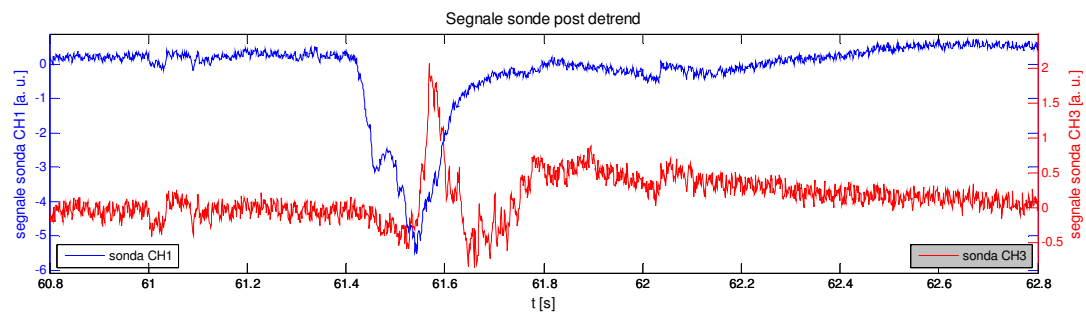
condizioni operative:

semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



- ore 18.25 giorno 07/09/11

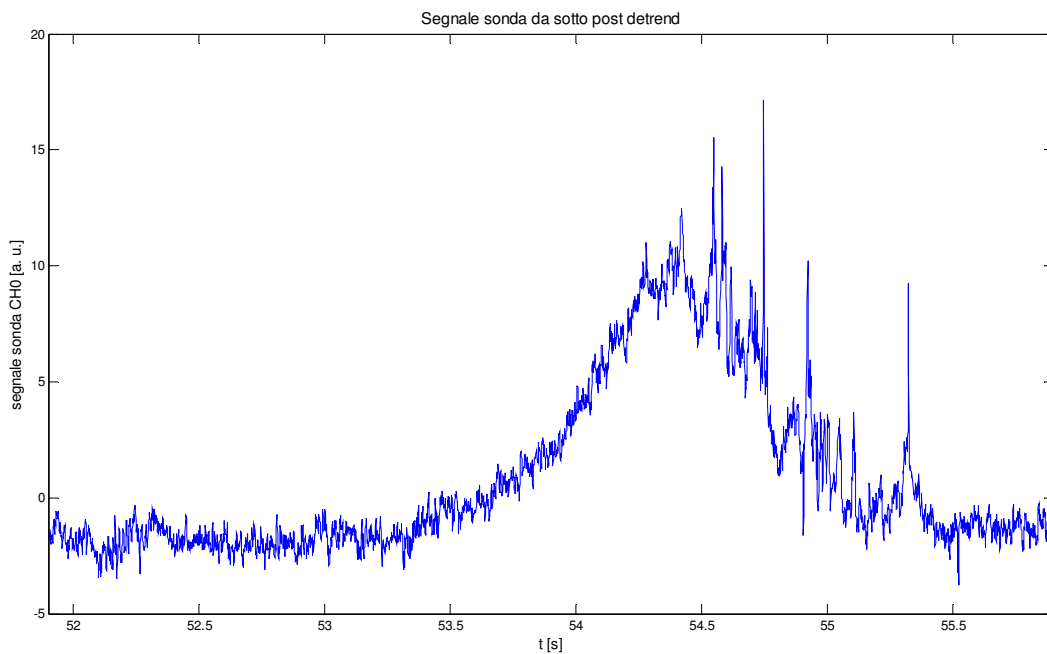
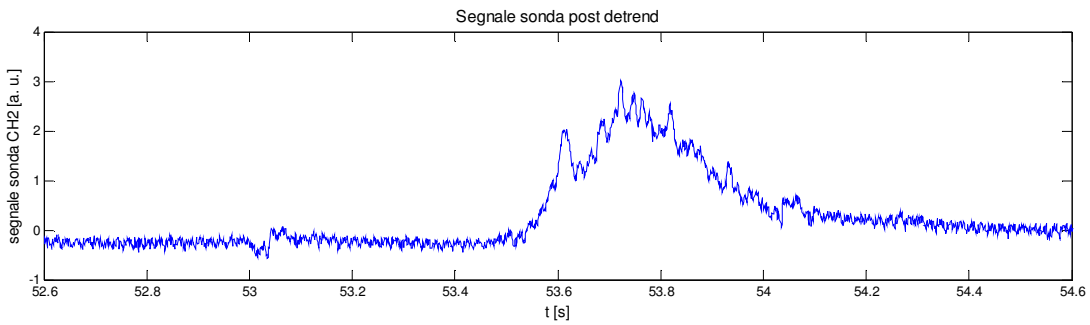
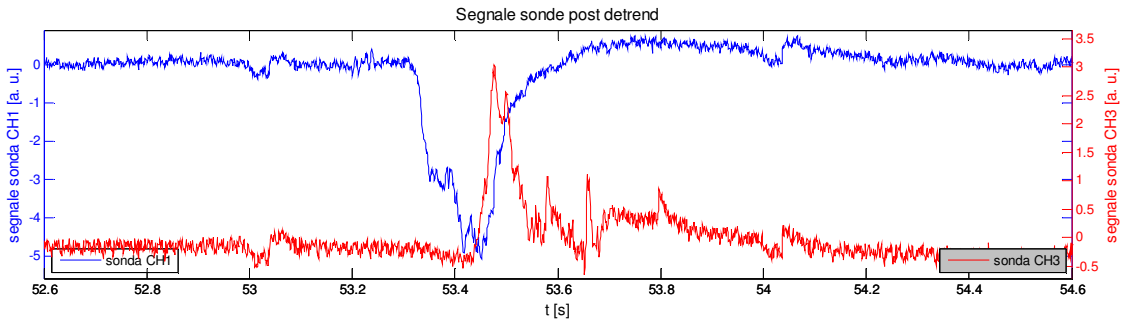
condizioni operative:

semi di girasole spremuti e macinati

concentrazione di O_2 nei fumi 6.0%

temperatura 900°C

posizione sonde: CH0 da fondo, CH1 porta 6, CH3 porta 8, CH2 porta 10



5. Discussione dei risultati prove settembre 2011

Dai segnali raccolti nelle prove sperimentali di settembre è possibile ricavare un numero notevole di informazioni, visto che è possibile avere sia una vista laterale che assiale (dal fondo) del reattore. In questo modo si hanno informazioni sia localizzate spazialmente che temporalmente. In particolare il segnale della sonda dal fondo contiene l'intera dinamica del processo combustivo da quando il combustibile entra a quando esce dopo aver subito il quench. L'informazione probabilmente più interessante che può essere tratta da questi dati riguarda l'ignition delay, ovvero il tempo che intercorre da quando le particelle entrano nel reattore e quando si ha la loro ignizione completa. Tale tempo in letteratura (Shaddix et al., 2011) viene valutato considerando due possibilità: valutare il tempo per avere l'ignizione del 50% dei volatili o valutare il tempo per avere la loro completa ignizione. Nel secondo caso si considera come estremo finale della valutazione il massimo del segnale corrispondente all'ignizione dei volatili, mentre nel primo caso si considera il punto corrispondente al 50% del valore massimo. Ovviamente i due valori sono leggermente diversi tra loro, ma ciò che conta è il confronto tra le diverse condizioni operative e Shaddix et al. hanno dimostrato che il trend è identico in entrambi i casi. Per stabilire il punto di massimo segnale dei volatili si deve notare come la curva registrata dalla sonda dal basso mostri sempre quattro zone più o meno accentuate:

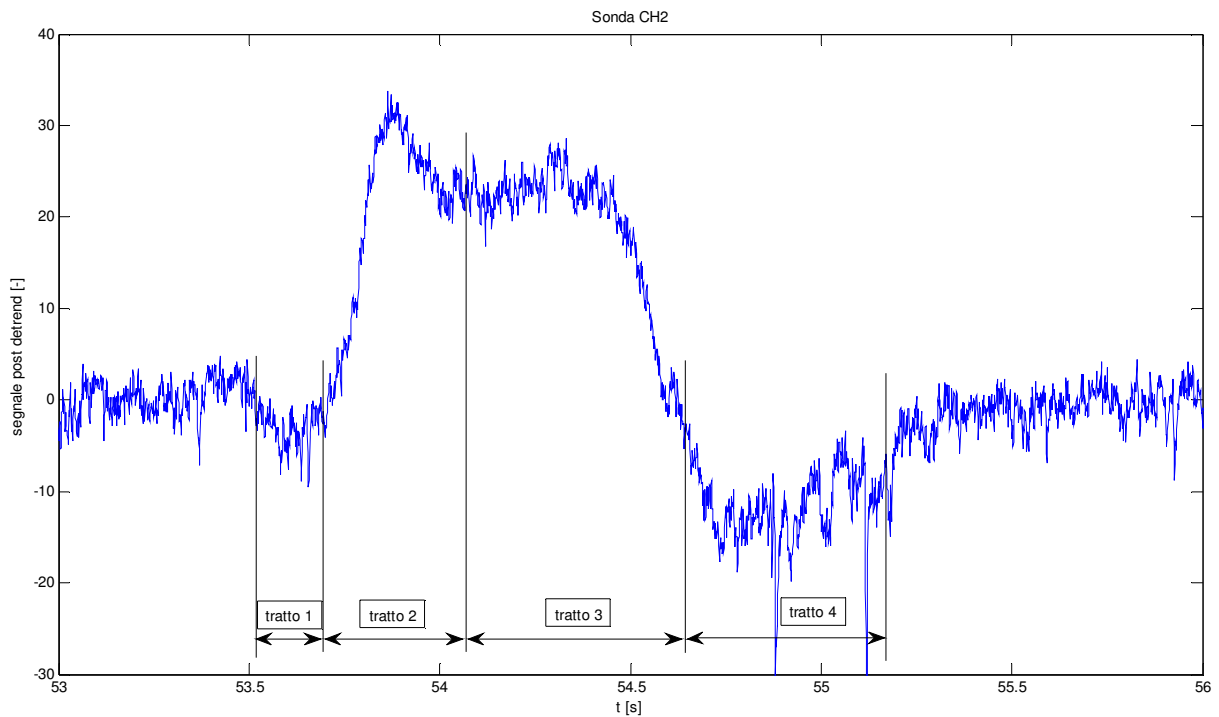


Figura 49: Dettaglio segnale registrato dalla sonda CH2 posta sul fondo del reattore in posizione assiale nella prova delle 16.42 del 14/04/11

Si possono distinguere chiaramente:

- tratto 1: rispetto ad un precedente valore pressoché costante del segnale si ha un abbassamento dovuto all'ingresso dalla porta 5 del reattore delle particelle di combustibile che sono a bassa temperatura perciò assorbono la radiazione delle pareti
- tratto 2: il segnale cresce velocemente fino ad un massimo per poi scendere nuovamente, in questo tratto le particelle raggiungono una temperatura tale da avere devolatilizzazione e conseguente ignizione dei volatili a cui corrisponde l'emissione registrata, via via che i volatili si consumano l'intensità del segnale diminuisce
- tratto 3: il segnale cresce nuovamente ma in maniera più lenta portandosi ad un valore di quasi stazionario per poi scendere nuovamente, in questo tratto si ha una parziale ossidazione del char formato post devolatilizzazione, via via che termina l'ossidazione del char per l'inizio del quench l'intensità dell'emissione cala
- tratto 4: le particelle ormai non più ignite si raffreddano per via del quench e percorrono l'ultimo tratto del reattore assorbendo la radiazione delle pareti, una volta uscite tutte le particelle il segnale torna ad essere grossomodo costante.

Il tratto 2 quindi corrisponde al processo di devolatilizzazione ed ignizione omogenea dei volatili.

Per quanto riguarda, invece, il tratto 1 si nota che in realtà se si stimasse il momento di ingresso del carbone dalle curve del segnale registrate dalla sonda dal sotto si commetterebbe un errore: infatti tale punto è mal distinguibile poiché le particelle entrano nel reattore fredde e assorbono calore ma poiché la sonda è sul fondo mentre le particelle entrano 3.3 metri più in alto dalla porta 5 l'abbassamento di segnale visto dalla sonda assiale è in realtà irrilevante. In pratica è vero teoricamente che il segnale dovrebbe abbassarsi, ma poiché la quantità di particelle iniettata è poca (250 mm^3) e la distanza elevata, tale abbassamento si distingue male dalle normali fluttuazioni del segnale. Risulta quindi più affidabile determinare il momento di ingresso delle particelle di combustibile esaminando il segnale della prima sonda laterale (la sonda CH1) posta nella porta 6 12.5 cm sotto l'iniezione del combustibile. Si può infatti affermare con sicurezza che fino a che il segnale registrato da tale sonda non varia bruscamente rispetto al segnale registrato delle pareti non si ha passaggio delle particelle. Si nota inoltre che il segnale della sonda CH1 varia nettamente appena inizia il passaggio delle particelle, come risulta visibile dalle immagini riportate in precedenza. Si può quindi determinare facilmente il punto in cui tale segnale varia. Ovviamente questo punto non è in corrispondenza dell'iniezione delle particelle poiché queste entrano 12.5 cm più in alto, perciò se ne deve tenere conto. Da precedenti valutazioni è stato stimato che per effetto essenzialmente del carrier di trasporto, le particelle di carbone si muovono nei primi istanti dopo l'iniezione a circa 5 m/s, perciò per percorrere 12.5 cm sono necessari circa 25 ms. I tempi valutati dalla variazione del segnale della sonda CH1 devono quindi essere corretti diminuendoli di 25 ms. In questo si ottengono dei valori sufficientemente accurati del momento di ingresso del combustibile nel reattore.

L'ignition delay è il tempo trascorso dal momento dell'iniezione del carbone e il momento in cui il segnale derivante dall'ignizione dei volatili raggiunge il massimo. In pratica si considerano quindi i seguenti punti:

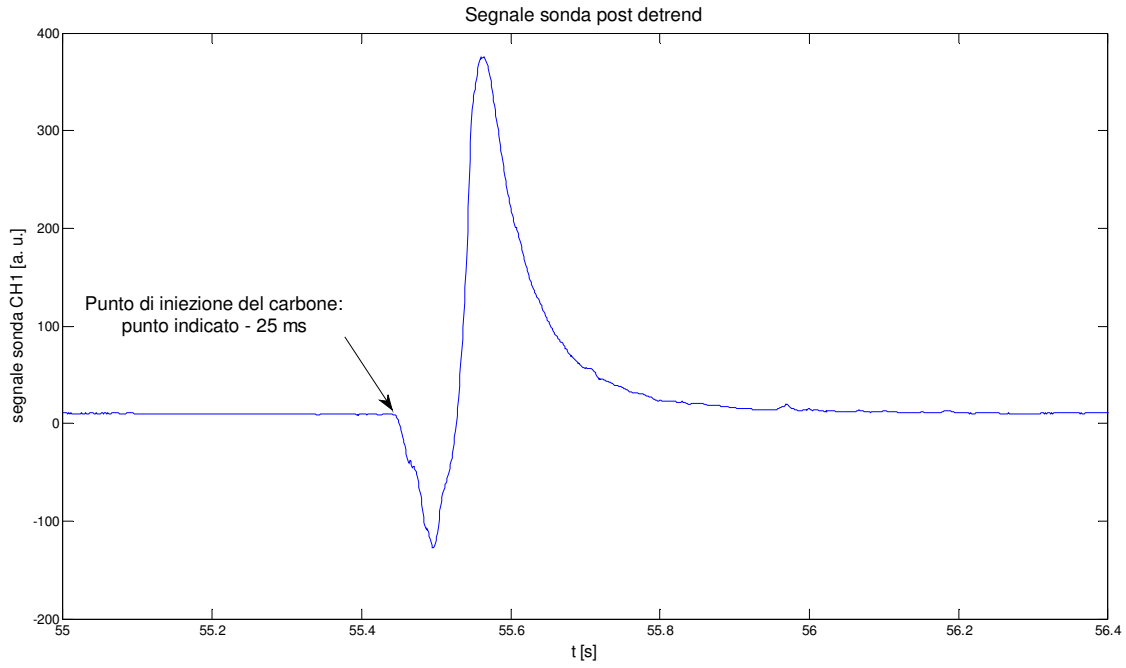


Figura 50: Esempio di segnale sonda CH1 porta 6

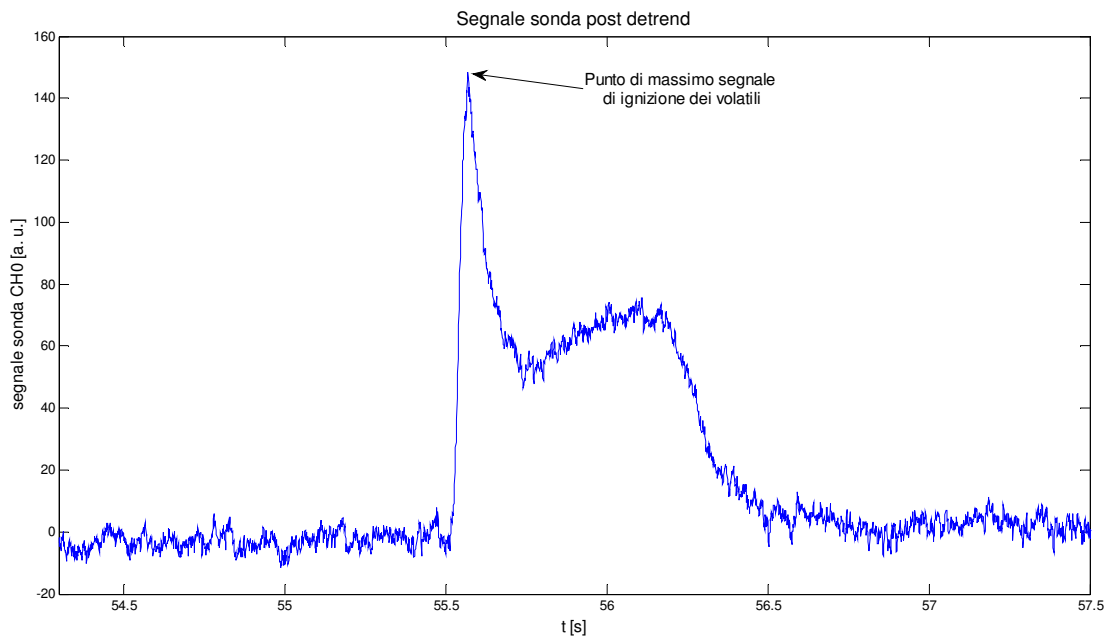


Figura 51: Esempio di segnale sonda CH0 da fondo reattore

Effettuando valutazioni di questo tipo per le diverse condizioni operative provate si ottengono dei trend dei tempi di ignition delay al variare di:

- temperatura
- concentrazione di ossigeno
- granulometria delle particelle
- ambiente di combustione (in aria o oxy).

Sezione 2

Test ed analisi su combustore semi-industriale per la verifica di tecniche diagnostiche ottiche avanzate per il controllo della ossi-combustione di carbone

Indice

1	L'impianto sperimentale.....	2
1.1	La fornace Fo.Sper.	2
1.2	Impianto.	3
1.3	Controllo di temperatura in camera di combustione	5
1.4	Combustibile.....	6
1.4.1	Carbone.....	6
1.4.2	Gas naturale.....	8
1.5	Configurazione impianto per ossi-combustione.....	9
2	Campagne sperimentali.....	15
2.1	Introduzione	15
2.2	Campagna di misura per l'impianto Fo.Sper.....	16
2.3	Condizione della Fornace durante i test	17
2.4	Primo intervallo di dati	19
2.4.1	Descrizione dei tre casi studiati	20
2.4.1.1	<i>Prima misurazione: Misura A</i>	<i>20</i>
2.4.1.2	<i>Seconda misurazione: Misura B</i>	<i>23</i>
2.4.1.3	<i>Terza misurazione: Misura C.....</i>	<i>26</i>
2.5	Secondo intervallo di dati	29
2.5.1	Descrizione dei tre casi studiati	30
2.5.1.1	<i>Prima misurazione: Misura D</i>	<i>30</i>
2.5.1.2	<i>Seconda misurazione: Misura E.....</i>	<i>33</i>
2.5.1.3	<i>Terza misurazione: Misura F.....</i>	<i>36</i>
2.6	Confronto tra spettri.....	38
2.6.1	Confronto tra lo spettro di Misurazione A e spettri di combustione convenzionale	39
2.6.2	Confronto tra lo spettro di Misurazione C e spettri di combustione convenzionale	41

L'impianto sperimentale

La fornace Fo.Sper.

Le campagne sperimentali eseguite dall'IFRF nel 2011 sono state condotte presso l'area sperimentale dell'ENEL di Livorno, sull'impianto Fo.Sper. (Forno Sperimentale) capace di ospitare bruciatori alimentati a gas metano, olio combustibile e carbone. Questa fornace è una riproduzione della Furnace #1 usata da IFRF a IJmuiden, Olanda.



Figura 0.1. Area sperimentale di Livorno: Fo.Sper.

La fornace è costituita da una struttura di tipo modulare a sviluppo orizzontale; le dimensioni interne sono 2 x 2,023 m per una lunghezza totale di 6,38 m.



Figura 0.2. *Fornace Fo.Sper.*

La struttura della fornace è modulare e consente assemblaggi tali da garantire la più ampia flessibilità operativa. L'estrazione del calore lungo la fornace viene assicurata da tubi raffreddati ad acqua che corrono lungo le pareti interne della fornace e da un quenching con acqua diretta sull'ultimo modulo.

La fornace è provvista di aperture disposte lungo le pareti che permettono l'introduzione delle sonde per il campionamento durante le sperimentazioni.

Impianto

L'impianto Fo.Sper. è mostrato nel seguente flow-sheet (fig.2.3).

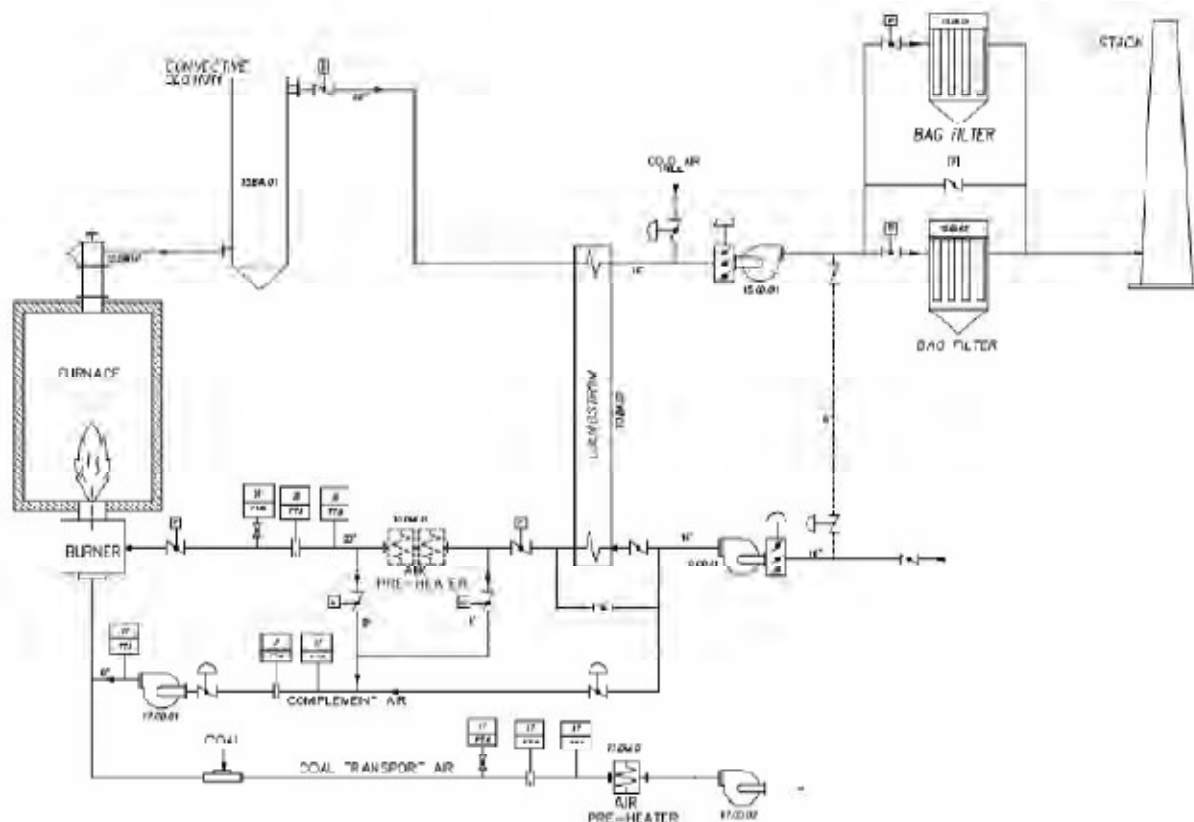


Figura 0.3. Flow – sheet dell’impianto Fo.Sper.

Il flue gas in uscita dalla camera di combustione viene aspirato da un ventilatore per l’estrazione dei fumi, posizionato a monte del filtro a maniche, ed entra prima nella sezione convettiva dove viene raffreddato fino a circa 400°C. La sezione convettiva è uno scambiatore di calore flue gas/acqua a circuito chiuso.

Successivamente i fumi attraversano lo scambiatore Ljungström che abbassa ulteriormente la temperatura fino a 150°C circa³, mentre viene aumentata la temperatura dell’aria comburente. A questo punto il flue gas raffreddato attraversa due filtri a maniche che rimuovono il particolato solido e quindi inviata al camino.

Sull’impianto sono presenti due ventilatori, uno a valle della fornace che regola la pressione in camera di combustione e uno a monte che regola i flussi; una ulteriore regolazione di sicurezza interviene in caso di alta temperatura dei fumi al filtro a maniche agendo su di una valvola di aspirazione di aria fredda.

L’aria primaria e secondaria⁴ (nella combustione standard con aria) attraversano due preriscaldatori elettrici, uno per ogni flusso. L’aria comburente viene alimentata al bruciatore mediante un ventilatore dedicato. La linea è dotata della strumentazione per misura della portata, temperatura e pressione.

La temperatura dell’aria di trasporto viene regolata agendo sulle quantità aspirate a monte (aria fredda) ed a valle dei riscaldatori (aria calda).

Controllo di temperatura in camera di combustione

Il raffreddamento dell'impianto utilizza un circuito dell'acqua a ciclo chiuso che asporta calore attraverso:

- camicia di raffreddamento del forno;
- cooling loops presenti nel forno;
- cooling pipe alla base del forno;
- sezione convettiva.

È costituita da 11 sezioni di refrattario raffreddate ad acqua in modo indipendente. All'interno della camera di combustione sono presenti 8 cooling loops a doppia spira e 5 cooling pipes. Un ulteriore sistema di raffreddamento è rappresentato da camice d'acqua sulla parte esterna dello strato di refrattario (fig.1.3). La fornace è provvista di 14 portine (tab.1.1) munite ognuna di aria di sbarramento in modo da prevenire eventuali rischi agli addetti ai lavori durante l'inserimento delle sonde.

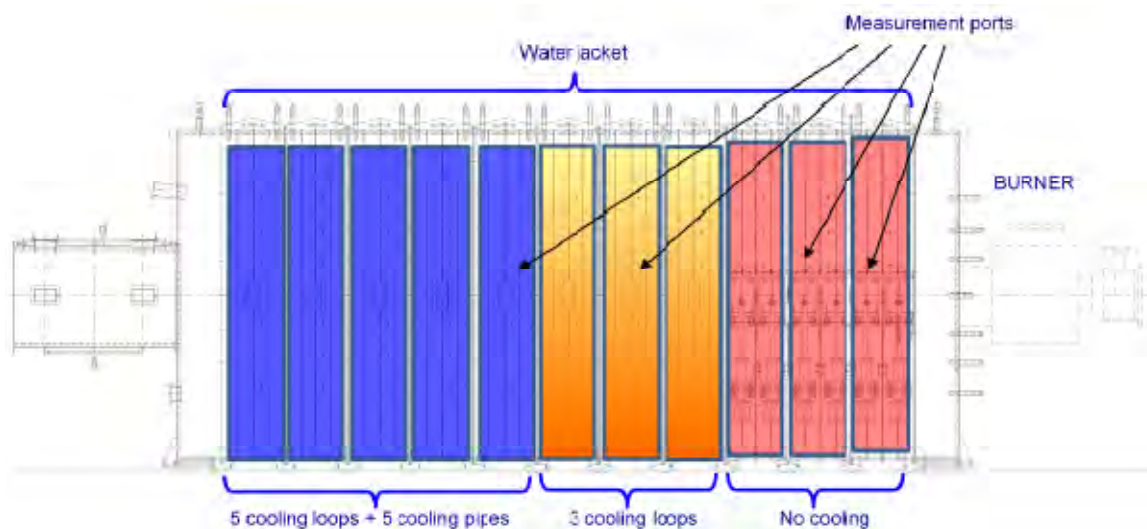


Figura 0.4. Posizione dei cooling loops in fornace

Port	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Distance from the burner (mm)	170	460	750	1040	1330	1620	2070	2660	3250	3840	4430	5020	5610	6200

Tabella 0.1. Distanza delle porte dal bruciatore

L'estrazione di calore si realizza principalmente attraverso i cooling loops (fig.1.4) che asportano calore secondo le necessità sperimentali, sono del tipo rimovibile a forno spento.

Il loro numero e la loro collocazione possono variare in modo da assicurare la rimozione del calore richiesta. Per ogni modulo è previsto l'impiego di un misuratore di portata acqua e di trasmettitori di temperatura in ingresso ed in uscita (fig.1.4).

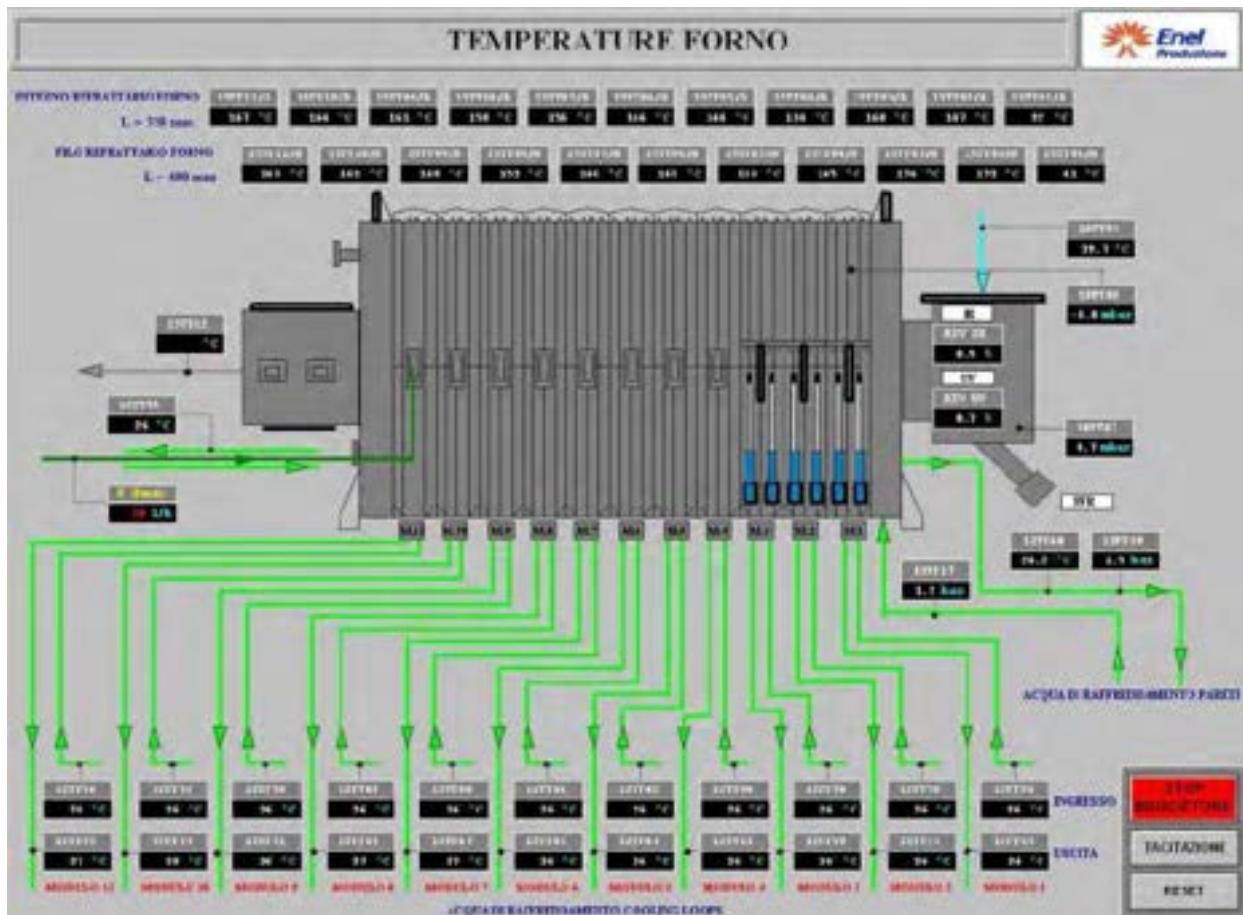


Figura 0.5. Monitoraggio delle temperature in fornace

Portata d'acqua di raffreddamento e temperatura per ogni sezione e circuito sono monitorate istante per istante in modo da determinare l'estrazione di calore totale dalla fornace

Combustibile

Carbone

In considerazione della distanza relativamente elevata tra i serbatoi di stoccaggio ed il forno, è previsto un trasporto pneumatico in fase densa fino ad un silo intermedio posto nelle vicinanze del Forno e dal quale si procede con un trasporto tradizionale in fase diluita fino al bruciatore.

Il polverino di carbone, stoccato nei due serbatoi di stoccaggio, arriva per caduta al serbatoio di lancio del trasporto pneumatico ad alta pressione alimentato da aria compressa. In un tipico ciclo di trasporto, il propulsore viene riempito per gravità.

Quando esso è pieno, le valvole di carico e di sfiato sono chiuse, il sistema viene pressurizzato, ed il materiale defluisce entro la tubazione di trasporto arrivando ad un silo giornaliero da 8 m³. Tale sistema è in grado di riempire il silo di servizio in un tempo relativamente breve (1 – 2 ore).

Al raggiungimento del minimo livello nel propulsore, si apriranno in sequenza le valvole di sfiato permettendo la depressurizzazione controllata del sistema sino a zero pressione (controllata da un pressostato a bordo propulsore), poi la valvola di carico ed il propulsore verrà riempito per il ciclo successivo.

Il sistema è controllato attraverso un PLC locale, che gestisce secondo tali logiche le singole apparecchiature fino al silo giornaliero. La predisposizione all'avvio dei cicli sono comandate e controllate dal sistema di supervisione generale [2].

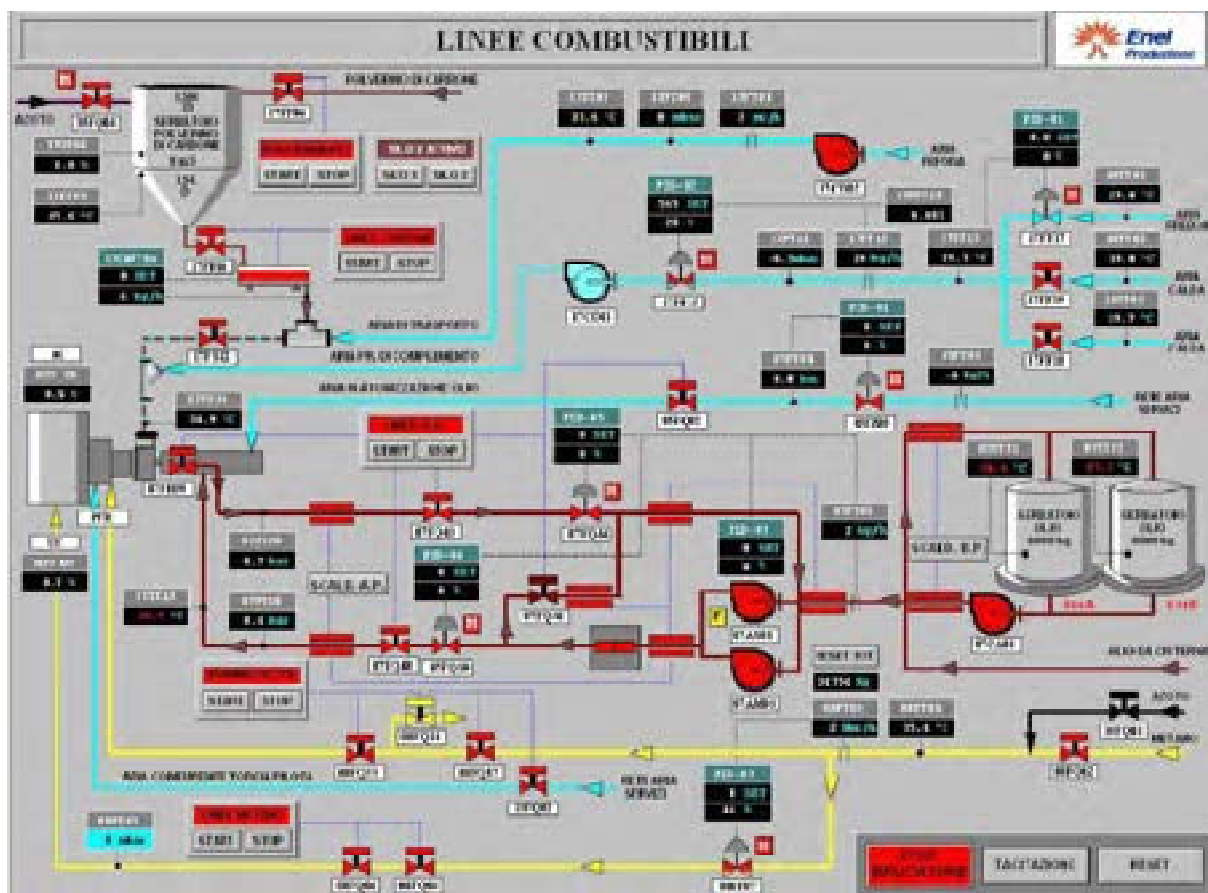


Figura 0.6. Schermata del controllo Linee Combustibili

Nella progettazione esecutiva è stata posta particolare attenzione per garantire la stabilità della portata del polverino di carbone, smorzando le fluttuazioni per evitare pulsazione di fiamma.

Durante le prove sperimentali è stata usato il carbone Indonesiano Sebuksu sia per la combustione convenzionale che per l'ossicombustione. La tabella di seguito riporta la composizione del carbone (tab.1.2) mentre il grafico la sua distribuzione granulometrica (fig.1.7).

Proximate analysis	Mass Fraction (% dry)
Maisture	8.4*
Fixed carbon	51.1
Volatile matter	37.1
Ash	11.9
Ultimate Analysis	Mass Fraction (% dry)
C	71.4
H	4.1
N	1.4
S	0.5
O (by difference)	10.7
HHV	6202 kcal/kg
LHV	5959 kcal/kg

Tabella 0.2. *Composizione del combustibile durante combustione aria-carbone e O₂-carbone*

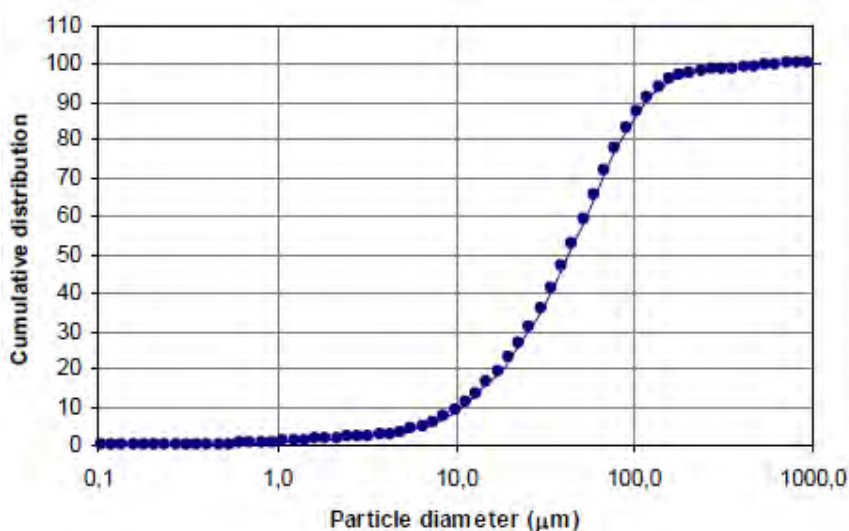


Figura 0.7. *Distribuzione granulometrica del carbone indonesiano Sebuk*

Gas naturale

Il metano viene alimentato realizzando uno stacco dalla tubazione esistente allacciata alla linea cittadina. Oltre all'impiego come combustibile principale, esso viene utilizzato per alimentare la torcia pilota di accensione. In ciascuna linea, bruciatore principale e pilota, l'intercettazione del combustibile viene assicurata da un sistema a doppia valvola. Le linee del gas saranno dotate di un sistema per l'inertizzazione delle stesse tramite azoto prelevato dallo stoccaggio esistente. L'inertizzazione sarà effettuata durante i periodi di inattività del bruciatore. Durante la campagna di prova il NG è stato usato per mantenere in temperatura la fornace di notte e durante il riscaldamento.

Configurazione impianto per ossi-combustione

Durante la campagna di misura svolta su Fo.Sper. con metodologia ODC. La fornace è stata esercita in ossi-combustione con RFG che in combustione convenzionale. Di seguito si riporta la configurazione di impianto per l'ossicombustione. Un ampio studio è stato condotto dalla *International Flame Research Foundation* (IFRF) al fine di valutare la combustione di gas e carbone polverizzato con una miscela di ossigeno e gas di ricircolo con il principale obiettivo di aumentare la concentrazione di CO₂ a circa il 90% per la cattura o per il sequestro. I gas che escono dalla fornace dopo la combustione sono divisi in due correnti: una, prima di essere liberata in atmosfera, viene inviata agli scrubbers (e in un impianto di scala industriale potrebbe essere adeguatamente processata per recuperare CO₂ pronta per il sequestro); l'altra passa da un ciclone per rimuovere le ceneri volatili e poi aspirata da ventilatori in acciaio inossidabile. In uscita dai ventilatori la corrente è divisa e fornita al bruciatore come aria primaria e secondaria. I flussi di massa di entrambe sono continuamente monitorati e controllati per assicurare che venga mantenuto il desiderato rapporto di ricircolo; la frazione in massa del flue gas ricircolato viene dedotto dal seguente rapporto:

$$R = \frac{F_{RFG}}{F_{RFG} + F_{chim}}$$

dove la massa totale di gas che attraversa la camera di combustione è data dalla somma tra i gas di scarico riciclati F_{RFG} e quelli prodotti dalla combustione F_{chim} che vanno al camino.

Per trasportare il carbone fino al bruciatore, dove è miscelato con l'O₂ primario e i gas di ricircolo primari, si usa una corrente di 95 kg/h di O₂ puro. Se necessario i gas di ricircolo primari vengono raffreddati per mantenere la temperatura a 100 °C. In figura 2.5 è riportato il flow-sheet semplificato dell'impianto.

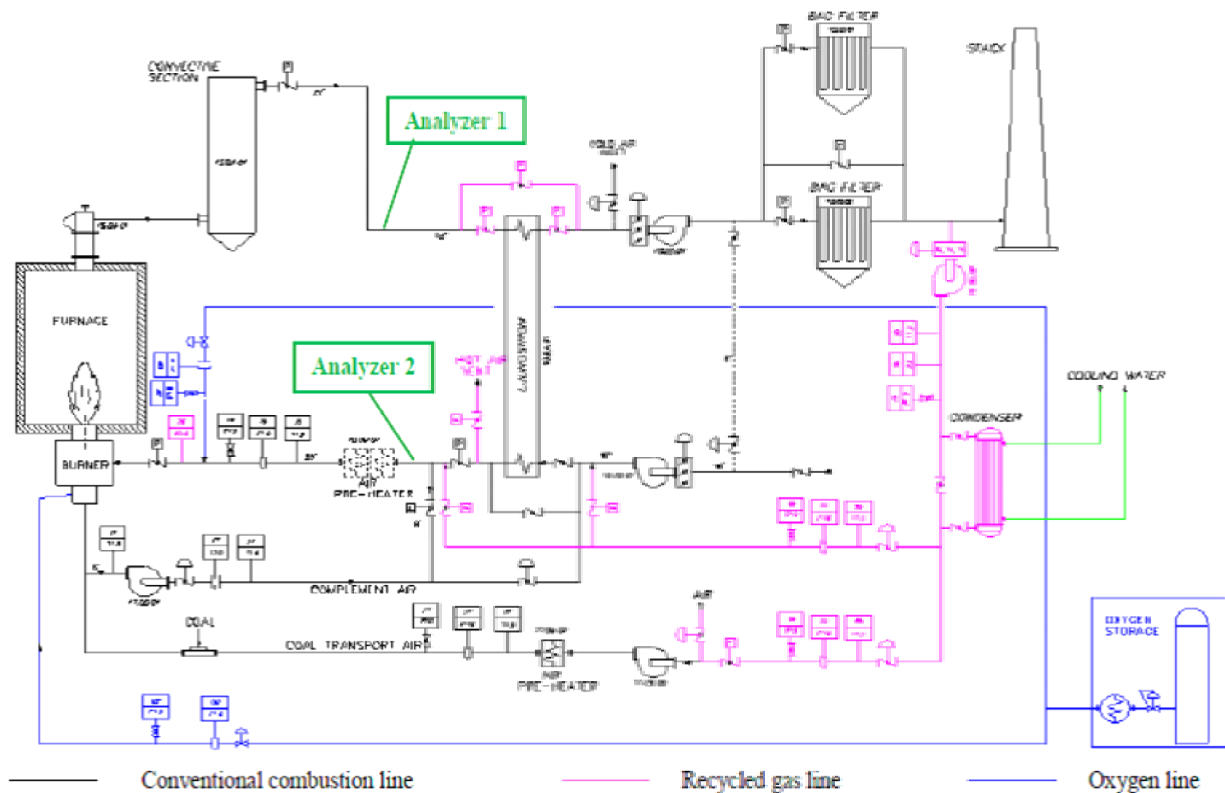


Figura 0.8. Flow-sheet semplificato dell'impianto Fo.Sper.

Le condutture degli RFG e quelle del condensatore sono indicate con le linee rosa mentre quelle per il passaggio dell'ossigeno e il serbatoio di stoccaggio dell'ossigeno sono indicate con linee blu. Tale configurazione rappresenta lo schema di impianto usato per il miscelamento di una frazione controllata di gas di post-combustione miscelata con ossigeno prima di essere impiegata come comburente. Il flue gas in uscita dalla camera di combustione viene aspirato da un ventilatore per l'estrazione dei fumi posizionato a monte del filtro a maniche per poi entrare prima nella sezione convettiva (fig.2.6) dove viene raffreddato fino a circa 400°C. La sezione convettiva è uno scambiatore di calore flue gas/acqua a circuito chiuso.

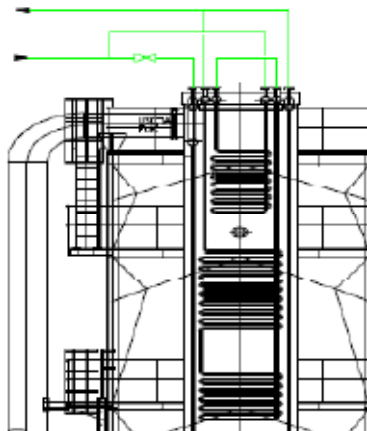


Figura 0.9. Sezione convettiva

Successivamente i fumi attraversano lo scambiatore Ljungström che abbassa ulteriormente la temperatura fino a 150°C circa, mentre viene aumentata la temperatura dell'aria comburente. A questo punto il flue gas raffreddato attraversa due filtri a maniche che rimuovono il particolato solido. Successivamente il flue gas viene suddiviso in due flussi, uno viene inviato al camino e l'altro al condensatore e riciclato.

Sull'impianto sono presenti due ventilatori, uno a valle della fornace che regola la pressione in camera di combustione e uno a monte che regola i flussi; una ulteriore regolazione di sicurezza interviene in caso di alta temperatura dei fumi al filtro a maniche agendo su di una valvola di aspirazione di aria fredda.

Un ventilatore ubicato a monte della fornace e del Ljungström provvede all'alimentazione di flue gas riciclati primari e secondari al bruciatore dopo essere stati fatti passare attraverso due preriscaldatori elettrici, uno per ogni flusso (l'aria secondaria passa prima attraverso il Ljungstrom e poi nei riscaldatori elettrici per arrivare ad una T di circa 300°C).

Ogni gasdotto è equipaggiato con strumentazione per la misurazione di portata, temperatura e pressione.

La temperatura degli RFG viene regolata agendo sulle quantità aspirate a monte (RFG freddi) ed a valle dei riscaldatori (RFG caldi).

L'impianto presenta grande flessibilità in modo da soddisfare diverse configurazioni. Durante i test di oxy-combustion possono essere variati i seguenti parametri:

1. Ricircolo umido/secco – un condensatore installato sulla linea permette di avere gas riciclati sia secchi che umidi. I gas di scarico possono essere impiegati come comburente secondario o terziario e come gas di trasporto primario per il trasporto del polverino di carbone in modo da poter studiare l'influenza dell'umidità sul trasporto di carbone che risulta interessante riguardo l'applicazione di questa tecnologia su un impianto industriale.
2. Ljungström – il Ljungström ha la possibilità di essere by-passato sia lato comburente che lato fumi in modo da studiare l'influenza dell'*air in leak-age* di aria persa all'interno del sistema. I possibili assetti che lo scambiatore può assumere sono:
 - a. completamente by-passato;
 - b. completamente in servizio con flue gas sia su lato caldo che su lato freddo;
 - c. parzialmente by-passato con aria su lato freddo e flue gas su lato caldo.
3. Oxygen-injecton – si può avere iniezione diretta di ossigeno nel condotto primario del bruciatore. Per motivi di sicurezza non si miscela l'ossigeno con i RFG per motivi legati alla sicurezza. La variazione del punto di iniezione dell'O₂ permette di studiare l'influenza di questo sulla stabilità della fiamma e l'emissione degli NO_x che è una delle principali questioni circa la progettazione di oxy-burners. Riguardo al gas secondario/terziario,

l'ossigeno viene miscelato prima che i fumi entrino nel bruciatore, ma c'è anche la possibilità di iniettare una parte dell'ossigeno nelle lance posizionate all'interno del bruciatore.

A valle dell'impianto si trova uno scambiatore di calore a condensazione (figg. 2.9 – 2.10) dotato di un sistema di neutralizzazione del pH dei fumi prima che questi vengano inviati all'interno della fornace. Lo scambiatore usa una soluzione di NaOH; tale processo è lento a causa della bassa solubilità dell' SO_2 presente negli RFG e che a contatto con le molecole di acqua presenti nei gas si trasforma in H_2SO_4 . Il gas di combustione circola all'interno dei tubi dello scambiatore di calore e la condensa viene raccolta sul lato opposto.

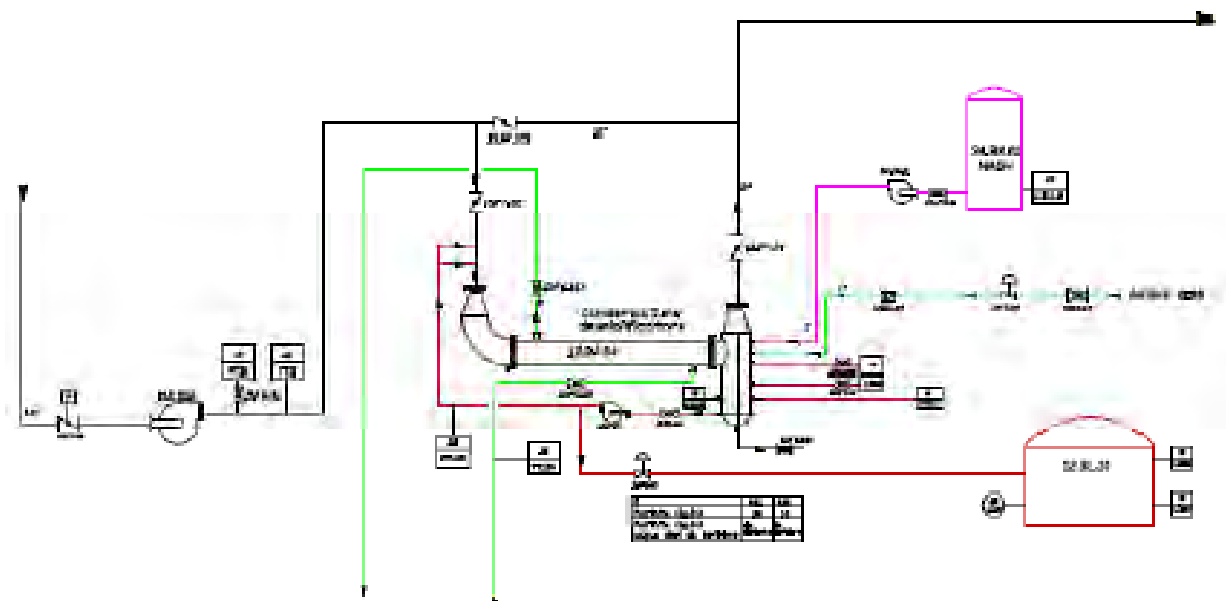


Figura 0.10. Flow sheet del sistema di condensazione e neutralizzazione del pH degli RFG



Figura 0.11. Sistema di condensazione e neutralizzazione del pH degli RFG

L'alimentazione continua di ossigeno è garantita da un serbatoio criogenico di 30 m³. Il serbatoio e l'evaporatore, per la gassificazione dell'ossigeno liquido, sono progettati per fornire una portata di almeno 1000 kg/h di O₂.

Le potenziali problematiche che possono presentarsi nella realizzazione del retrofitting di un impianto sono legate a:

- rientrate di aria – è il problema principale di un impianto a oxy-combustion. Per limitare tali rientranze (+0.3 bar realtivi), ma si hanno comunque depressioni sulle linee a monte, sui ventilatori e si hanno rientrate di aria anche dalle sonde;
- problema del condensato – non è un problema direttamente legato al retrofitting dell'impianto. È dovuto all'installazione di un condensatore sulla linea fumi per la condensazione dell'acqua. Questo condensatore crea problemi di trascinamento sulla linea di ricircolo che può portare anche all'intasamento e rottura della soffiante dell'aria;
- problemi su filtri a maniche.

Durante la campagna sperimentale la composizione secca del gas all'ingresso e all'uscita della fornace era continuamente monitorata da due analizzatori (fig.2.7) le cui caratteristiche sono riportate in tabella (tab.2.3). in assenza di infiltrazioni o perdite di aria lungo l'impianto i due analizzatori dovranno fornire misurazioni identiche delle concentrazioni di O₂ e CO₂.

Gas analyzed	Analyzer 1			Analyzer 2		
	Analysers model	Measurement unit	Analysis technique	Analysers model	Measurement unit	Analysis technique
O ₂	Siemens Oxymat	% vol. dry	Paramagnetic	Siemens Oxymat	% vol. dry	Paramagnetic

CO ₂	Siemens Ultramat 6E	% vol. dry	NDIR	Siemens Ultramat 5E	% vol. dry	NDIR
NO _x	Siemens Ultramat 6E	ppm dry	NDIR	Siemens Ultramat 5E	ppm dry	NDIR
CO ₂	Siemens Ultramat 6E	ppm dry	NDIR	Siemens Ultramat 5E	ppm dry	NDIR

Tabella 0.3. *Caratteristiche degli analizzatori di gas dell'impianto*

Campagne sperimentali

Introduzione

In riferimento alla qualificazione dello strumento ODC per il monitoraggio e la diagnostica dei processi combustivi legati all'uso di carbone, sia come polverino che come slurry acquoso, sono state effettuate due campagne di misura da IFRF, su impianti del centro sperimentale ENEL di Livorno.

Le sonde in zaffiro usate durante la prima campagna sperimentale erano del tipo *max working temperature* in grado cioè di lavorare in ambienti con temperature fino a 1800 °C e per questo inserite direttamente in camera di combustione. Nel cavedio ottico del Fo.Sper., di lunghezza pari a 500 mm, sono state introdotte coppie di sonde con lunghezza differente e pari a 200 mm una e 150 mm l'altra. Le sonde di minore lunghezza sono state impiegate in modo da ridurre possibili perturbazioni del segnale dovute a vibrazioni delle stesse. Gli impianti pilota utilizzati per la campagna sono stati eserciti sia in condizioni di combustione convenzionale che ossicombustione. Per le misurazioni in fiamma, sia per il Fo.Sper. che per l'IPFR, sono state adoperate due sonde denominate Ch.0 e Ch.1. Per le misurazioni in fornace la Ch.0 fa riferimento alla prima portina (PORT1) mentre la Ch.1 alla terza portina (PORT3) con interasse pari a 570 mm come evidenziato in figura 2.1.

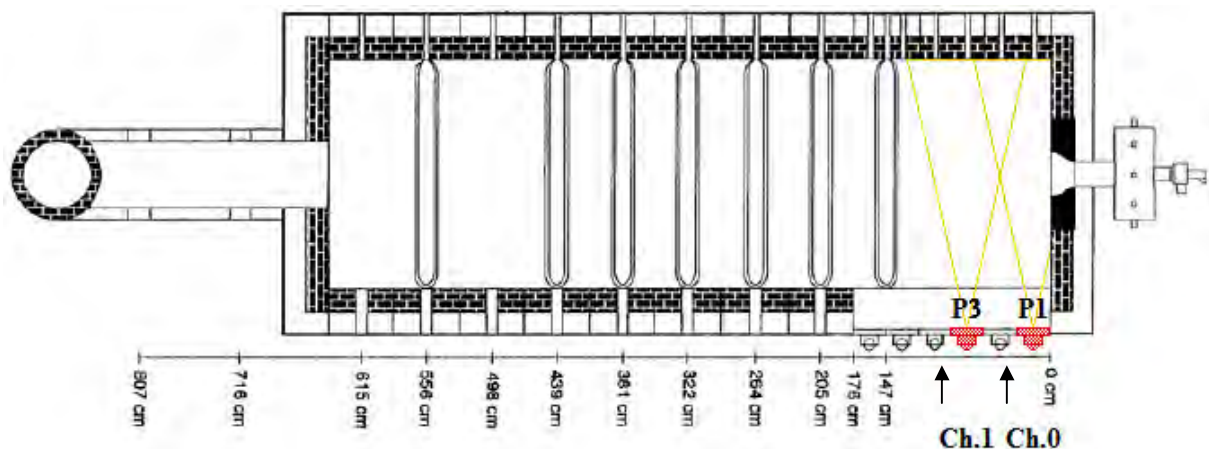


Figura 0.1. Ubicazione delle sonde nella Fo.Sper. La Ch.0 è posizionata nella portina 1 (P1), la Ch.1 nella portina 3 (P3)

Le misurazioni svolte con le sonde ottiche sono state ottenute con frequenza pari a 5 MHz e successivamente mediati a blocchi di 5000 ottenendo una frequenza di scansione equivalente di 1 kHz (il tempo di integrazione rimane costante, ma è la media su 5000). La lunghezza delle misurazioni può essere di 1, 2 o 4 minuti.

I *rough data* ottenuti sono stati successivamente analizzati sfruttando l'ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica implementato dal programma MatLab. I grafici di segnale ottenuti per ognuna delle due sonde sono stati studiati suddividendoli in intervalli uguali per ogni segnale ottenendo istogrammi e spettri di potenza per ogni intervallo riferito a ciascuna sonda. Per ogni misurazione sono state riportate tre tabelle, nella prima si trovano gli estremi di inizio e fine intervallo di misurazione denotati con la lettera T1 (inizio primo intervallo) e T2 (fine primo intervallo) e così a seguire nel caso di più intervalli. Nella stessa tabella vengono riportati il numero di dati campionati ed i valori dei picchi di frequenza massima presente in ogni intervallo. La terza ed ultima tabella riguarda i valori statistici per ogni intervallo di dati riferiti alle relative sonde. Per ogni intervallo si è poi cercata la media dei valori, lo scarto quadratico medio, il curtosi e lo skewness. In seguito è stato graficato il rapporto rms/mean per uno studio più dettagliato dell'andamento della combustione.

Di seguito dopo una breve introduzione sulle condizioni di funzionamento della fornace vengono analizzate in maniera dettagliata le misurazioni compiute negli intervalli di tempo.

Campagna di misura per l'impianto Fo.Sper.

L'impianto Fo.Sper. è un forno sperimentale alimentabile a gas e a polverino di carbone di cui in figura 3.1 se ne riportano due immagini; nella vista laterale sono evidenziate le portine di accesso ottico utilizzate per la misurazione in fiamma e nella vista posteriore il bruciatore, un Aerodynamically Air Staged Burner di derivazione IFRF utilizzato nelle prove.

Le condizioni operative e le prestazioni dell'impianto durante i test sono riportate nell'allegato 1, **ODC tests on the furnace nr.1, Fosper, IFRF.**

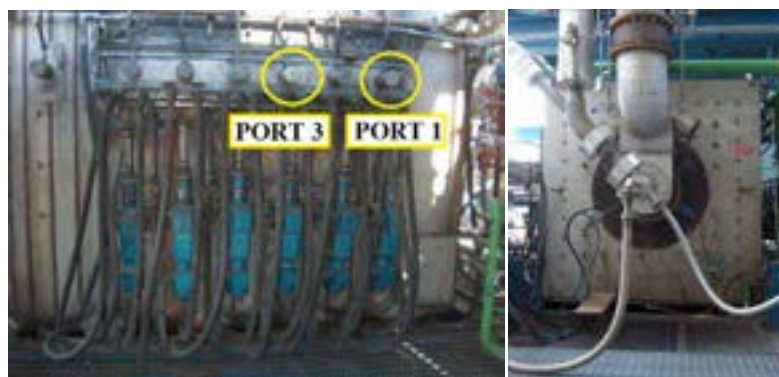


Figura 0.2. *Impianto FOSPER , vista laterale con le porte di accesso ottico e vista testa di alimentazione*

Durante la campagna di misura la fornace è stata esercita a 3 MW impiegando polverino di carbone come combustibile raggiungendo una temperatura di esercizio pari a 1200 °C e una pressione di 5 bar. Il Fo.Sper. è stato utilizzato in due diverse condizioni di combustione:

- combustione convenzionale: aria – gas naturale/carbone
- ossicombustione: O_2/CO_2 – gas naturale/carbone

I test sono stati effettuati allo scopo di valutare l'osservabilità, da parte delle sonde ODC, della combustione di polverino di carbone , 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 Fo.Sper. sono state individuate due porte di accesso laterali, PORT1 e PORT3 (in prossimità dei sistemi di iniezione), su cui hanno avuto luogo le misure. La procedura usata per andare in ossicombustione è esposta di seguito:

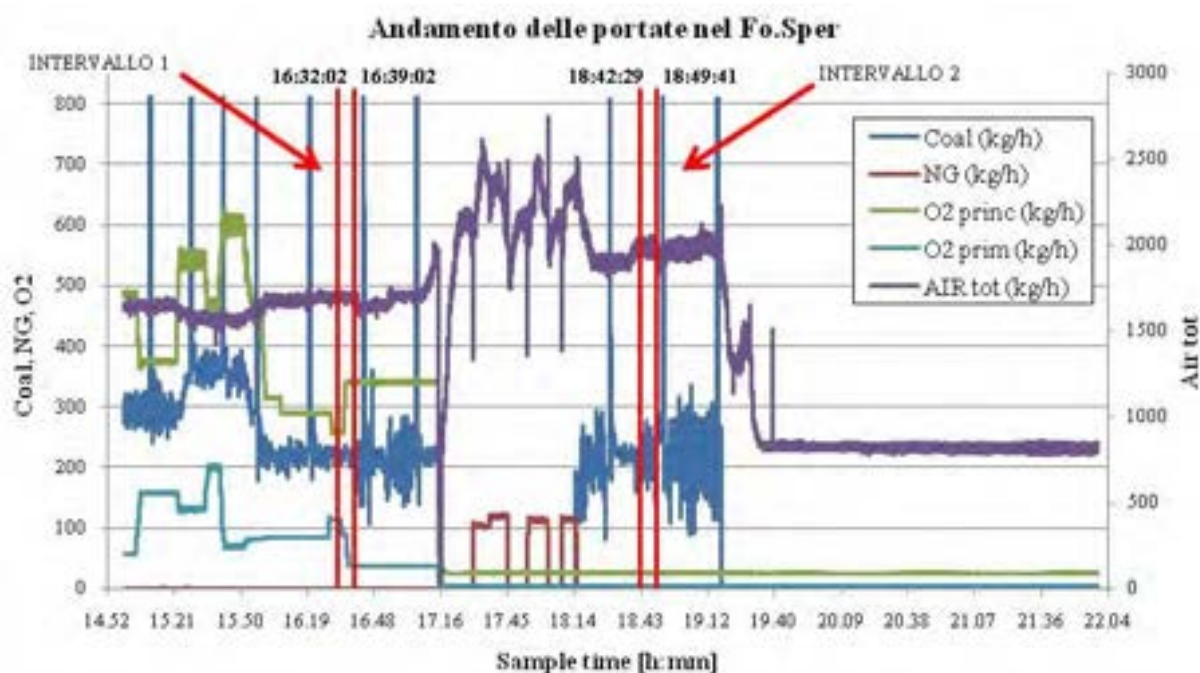
1. combustione diffusiva aria-metano, andata a temperatura di esercizio;
2. ricircolo fumi per diluizione miscela aria-gas (e raffreddamento);
3. immissione graduale di ossigeno, andata in ossicombustione gassosa;
4. immissione di polverino di carbone e contemporanea riduzione gas. La procedura si continua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

Le fasi sono state seguite con il sistema ODC. La posizione delle sonde è ipotetica; solo a posteriori (dopo l'analisi delle misure) è possibile individuare la posizione ottimale per l'osservazione delle fenomenologie legate al processo.

Condizione della Fornace durante i test

La fornace è stata esercita a una potenza di 3 MW. La fiamma non era mai stabile causa oscillazioni nell'alimentazione del combustibile con periodo di 15 minuti circa. Le misurazioni ottenute con il sistema ODC sono state prese nell'intervallo tra due impulsi di alimentazione, per cui dato che le rilevazioni sono state eseguite nel momento di alimentazione non perturbata esse possono essere considerate effettuate durante periodi stazionari. Durante la campagna di prova come combustibile è stato utilizzato polverino di carbone Indonesiano. Il grafico di figura 3.2 riporta i parametri operativi ed i due range temporali di misurazione indicati con INTERVALLO 1 e INTERVALLO2.

Figura 0.3. *Andamento dei parametri operativi nella Fo.Sper durante la campagna di prova*



Per

ognuno dei due range temporali considerati durante la campagna di prova svolta sul FOSPER, sono state svolte tre misurazioni di 1,2 e 4 minuti rispettivamente. Come è visibile dall'andamento delle portate il forno è andato in blocco intorno alle 17:16 ed è stato riavviato impiegando gas naturale ed aria; la riaccensione ha richiesto circa un'ora. Per una corretta interpretazione del grafico è da tener presente che i valori sotto i 100 kg/h sono da considerarsi trascurabili (nulli). Nel grafico i valori riportati sono forniti da flussimetri ubicati a valle della fornace che danno misurazioni di quantità che in fornace saranno leggermente diverse. Inoltre poiché i misuratori di portata per il gas naturale ne davano il valore in Nm^3/h , per portarlo in kg/h è stata usata la sua densità calcolata per mezzo dei valori della composizione media considerati a condizioni standard (273,15 K, 101325 Pa) e riportati in tabella 2.1.

% vol (composizione volumetrica gas media)

CH ₄	88.31
C ₂ H ₆	7.52
C ₃ H ₈	1.78
Butano C ₄ H ₁₀	0.43
Pentano	0.36
C ₅ H ₁₂	0.36
CO ₂	1.01
N ₂	0.59

Tabella 0.1. Composizione media del gas naturale durante la campagna di prova

Durante le misurazioni sono stati impiegati fumi di scarico come gas di ricircolo al posto dell'aria. Nel grafico non appaiono differenze poiché il condotto da dove passano sia l'aria che i fumi di ricircolo è lo stesso e questi vengono alternati per mezzo di uno switch, poiché i misuratori di

portata sono gli stessi, non si notano apparenti differenze nel grafico, va però tenuto presente che durante le zone di regime non vi è aria, ma fumi.

Primo intervallo di dati

Il grafico di figura 3.3 mostra l'andamento dei parametri operativi nel primo intervallo di misura. Le tre misurazioni sono state effettuate in un range temporale di circa 7 minuti tra le 16:32:02 e le 16:39:13 i cui intervalli temporali sono mostrati in tabella 2.2.

	INTERVALLO 1
Misurazione A	16:32:02 – 16:33:02
Misurazione B	16:34:17 – 16:36:17
Misurazione C	16:37:13 – 16:39:13

Tabella 0.2. Misurazioni riferite al primo intervallo

Durante le tre misurazioni la fornace era esercita in ossicombustione con polverino di carbone e gas di ricircolo. Sono state effettuate misurazioni in fase transitoria durante il passaggio da ossigeno primario a principale. Non essendo state svolte misurazioni in regime di combustione con aria e gas naturale non è stato possibile un confronto tra i dati ottenuti con polverino e senza polverino, ciò è rilevante a livello analitico per una migliore comprensione dell'andamento in fiamma delle particelle di carbone o strutture (eddy). Durante la seconda misurazione, indicata con la lettera B nel grafico, è stata eseguita la chiusura dell'ossigeno primario con aumento dell'ossigeno principale. Tenendo presente che i valori inferiori a 100 kg/h possono essere considerati trascurabile, se ne deduce che la misurazione B evidenzia il passaggio dalla combustione con ossigeno primario e principale a combustione con solo ossigeno principale.

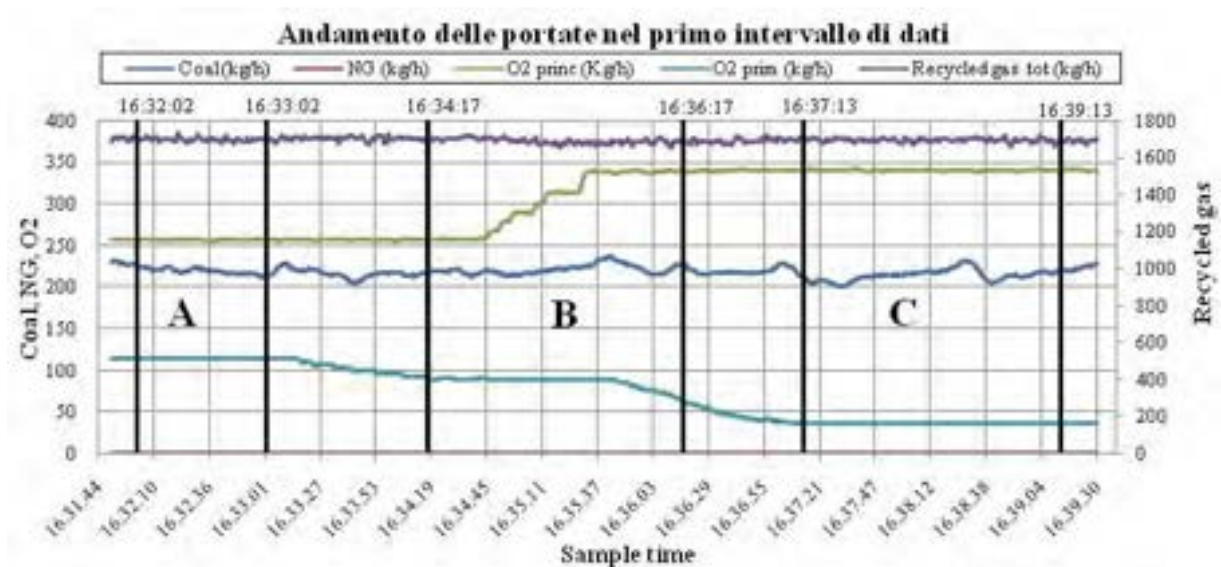


Figura 0.4. Andamento dei parametri di processo nel primo intervallo di misurazione in ossicombustione

Descrizione dei tre casi studiati

Di seguito vengono riportate le descrizioni dei tre casi studiati nel primo intervallo di misurazione con relative interpretazioni. Per ogni intervallo sono stati estrapolati due spettri di potenza media uno per ogni portina e relativi andamenti degli istogrammi per valutare la bontà della misurazione. Sono state utilizzate sonde di lunghezza 200 mm per le misurazioni A e B e sonde di 150 mm per la misurazione C in modo da evitare perturbazioni nel segnale dovute probabilmente a oscillazioni delle sonde.

Prima misurazione: Misura A

Si hanno le seguenti condizioni di impianto:

- ossicombustione con cabone
- ricircolo gas combusti
- O_2 su aria principale e primaria
- sonda Ch.0 su portina 1, sonda Ch.1 su portina 3
- lunghezza sonde 200 mm

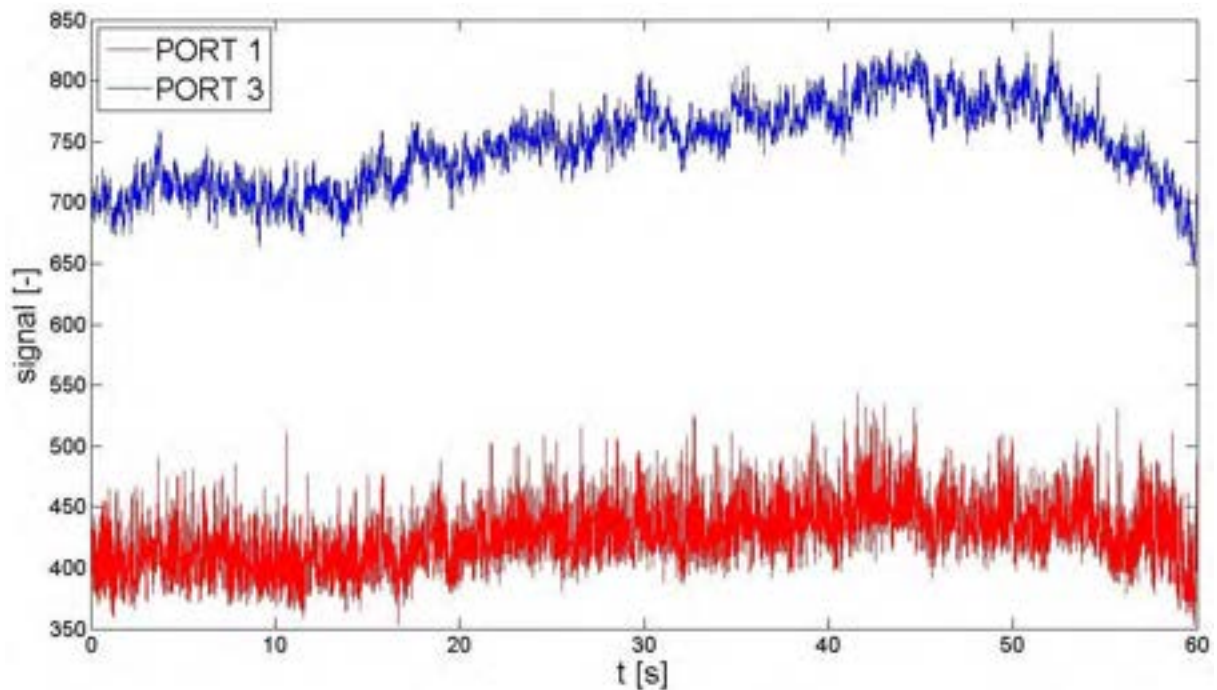


Figura 0.5. Segnali delle due sonde riferiti all'intervallo di misurazione A

Visto l'andamento del segnale, riportato in figura 3.4, per l'ottenimento degli spettri di potenza è stato preso un intervallo studio compreso nei primi 20 secondi. La scelta è stata fatta poiché per

intervalli maggiori gli istogrammi presentavano andamento bimodale, sinonimo di elevata variazione del segnale (vedi appendice).

Number of samples	Range		Frequency Max	
	T1	T2	Ch.0	Ch.1
59999	0,5	14	0,07	0,07

Ch.0 - PORT 1				Ch.1 - PORT 3			
mean	rms	skewness	kurtosis	mean	rms	skewness	kurtosis
407,6	20,1	0,57	3,52	706,6	13,5	0,13	3,09

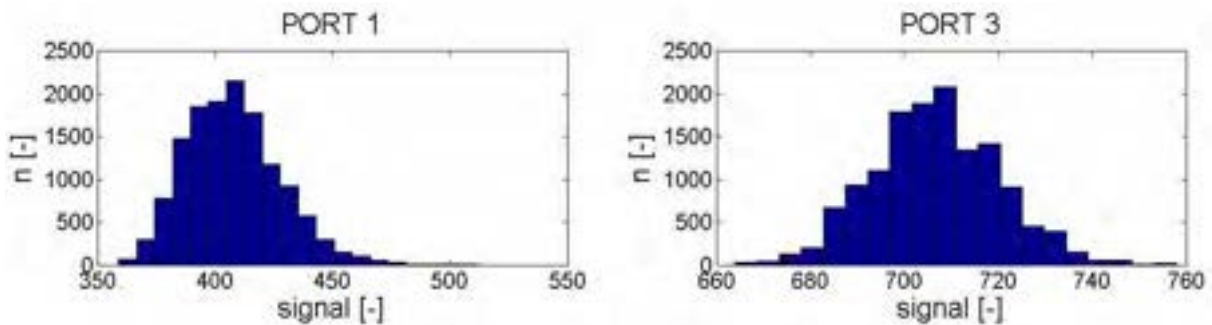


Figura 0.6. Istogrammi relativi alla distribuzione di popolazione

I due spettri di potenza linearizzati mostrano un picco di frequenza nei pressi di 0.07 Hz poiché nell'intervallo preso il segnale mostra una oscillazione.

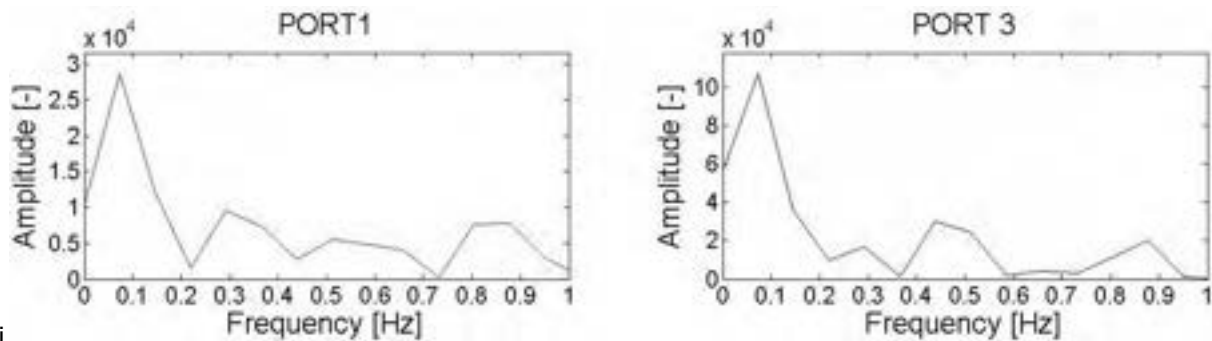


Figura 0.7. Spettri di potenza per le due sonde (scala lineare)

Nel grafico si riporta lo spettro di potenza media di figura 3.7 si nota una frequenza di 22.5 Hz rilevata dalla sonda Ch.0 ubicata nella portina 1 pari ad una sub-armonica dovuta ai 50 Hz della rete di alimentazione elettrica.

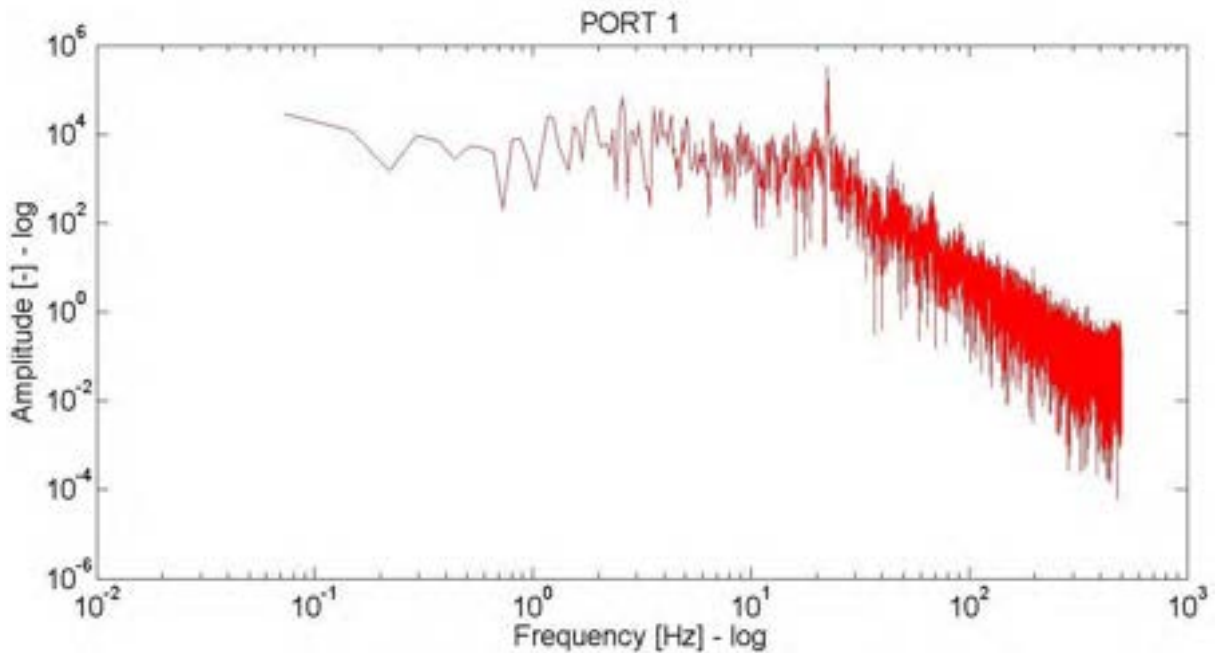


Figura 0.8. Spettro di potenza per la sonda Ch.0 in portina 1

Le motivazioni relative alla presenza di tale frequenza possono essere riassunte secondo le due seguenti ipotesi:

1. ipotesi 1 – la sonda, essendo una barra di piccole dimensioni inserita in un cavedio flussato con aria in pressione, potrebbe mostrare vibrazioni a tale frequenza. In questo caso il cattivo set-up della sonda ubicata nella prima portina comporterebbe ripercussioni negative sul segnale;
2. ipotesi 2 – fenomenologia imputabile al campo visivo della sonda Ch.0 dovuta alla possibile presenza di fluttuazioni nell'alimentazione del forno che effettivamente in seguito è andato in blocco

La stessa frequenza non compare nello spettro rilevato dalla sonda Ch.1 affacciata sulla portina 3, come evidente dalla figura 3.8.

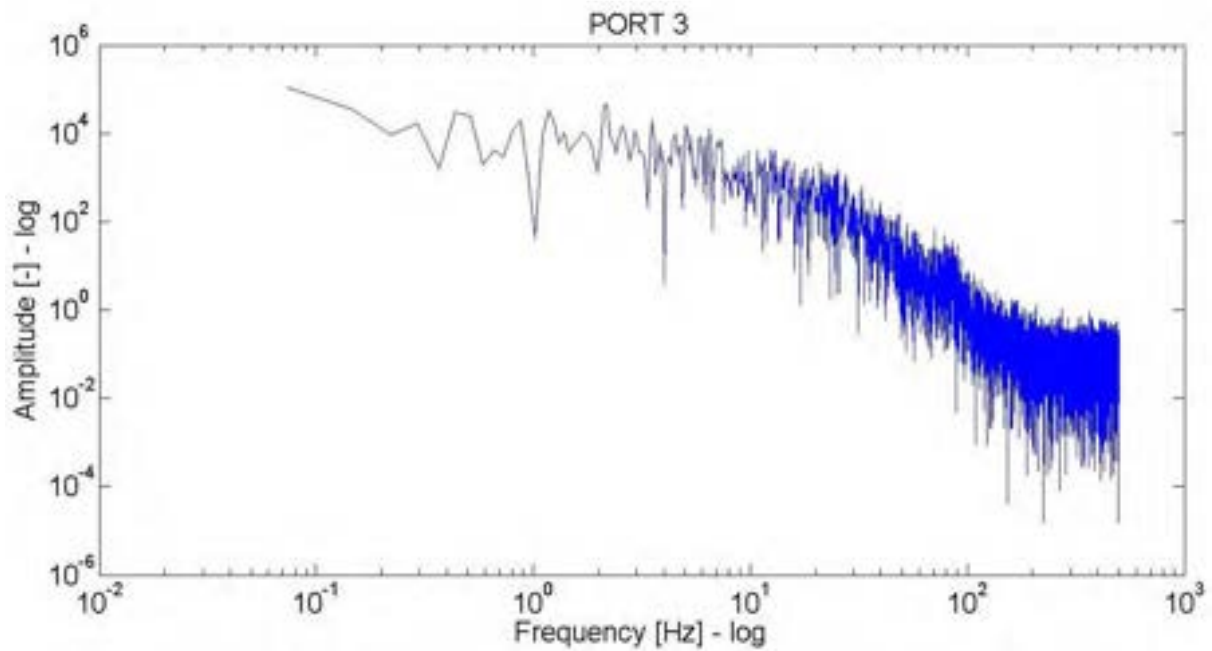


Figura 0.9. Spettro di potenza per la sonda Ch.1 in portina 3

Seconda misurazione: Misura B

Si hanno le seguenti condizioni di impianto:

- ossicombustione con carbone
- ricircolo gas combusti
- passaggio di tutto l' O_2 su aria principale
- sonda Ch.0 su portina 1, sonda Ch.1 su portina 3
- lunghezza sonde 200 mm

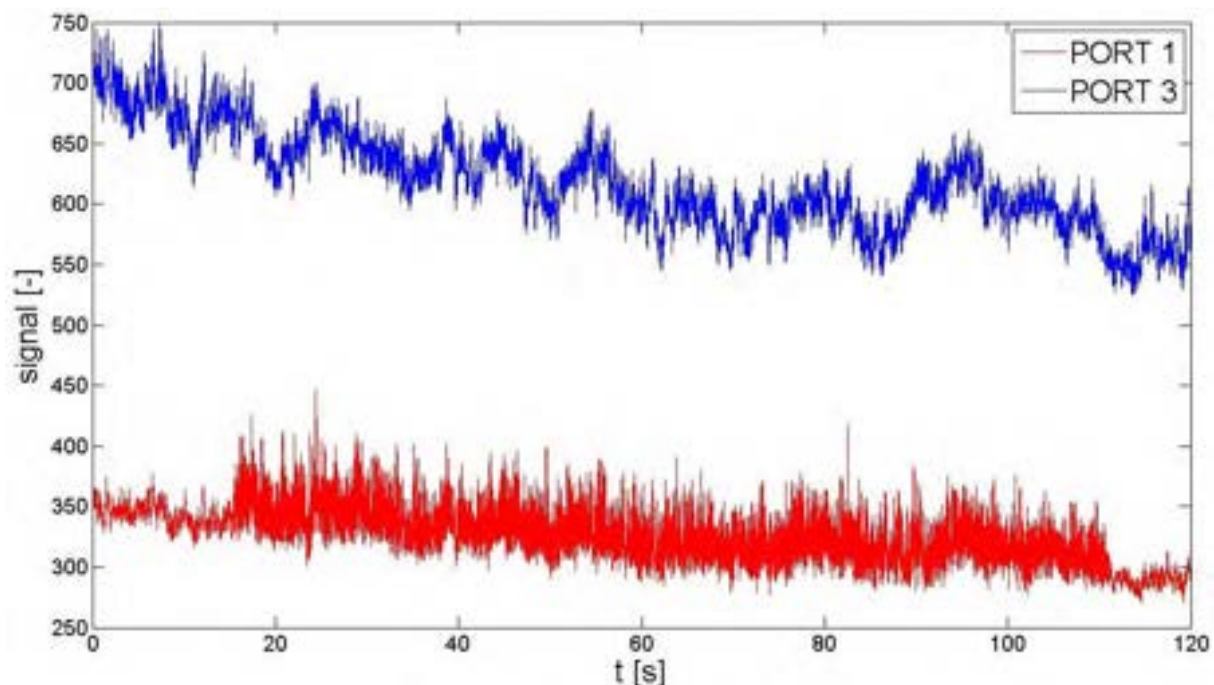


Figura 0.10. Segnali delle due sonde riferiti all'intervallo di misurazione B

In questo caso l'andamento del segnale riportato in figura 3.9, rilevato dalla sonda Ch.0 nella portina 1 appare attenuato alle estremità; l'attenuazione è dovuta ad assestamenti della sonda effettuati durante la misurazione. Per evitare deformazioni spettrali è stato preso un intervallo di misura compreso tra 20 s e 100 s.

Number of samples	Range		Frequency Max	
	T1	T2	Ch.0	Ch.1
119999	19	105	0,012	0,012

Ch.0 - PORT 1				Ch.1 - PORT 3			
mean	rms	skewness	kurtosis	mean	rms	skewness	kurtosis
327,8	19,9	0,47	3,18	613,31	28,21	0,12	2,55

Gli istogrammi mostrano buona simmetria, segno che l'intervallo di misura può essere considerato opportuno.

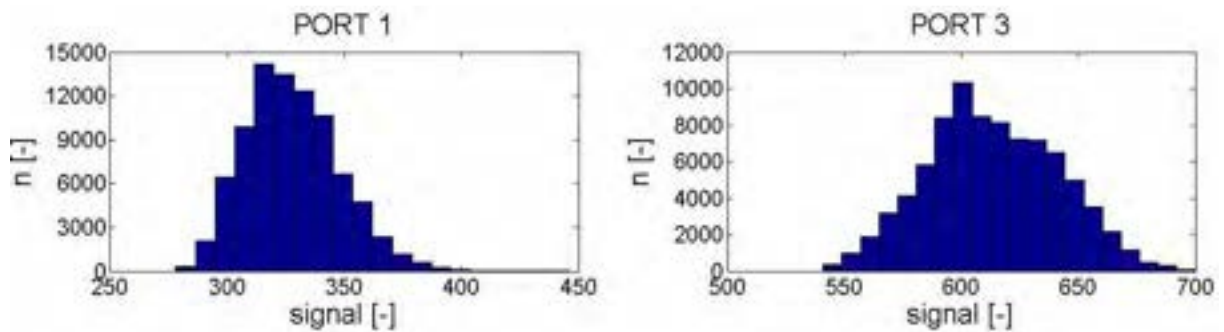


Figura 0.11. Istogrammi relativi alla distribuzione di popolazione

I due spettri di potenza linearizzati mostrano dei picchi a bassa frequenza (< 0.1 Hz) che però risultano non ben definiti. Ciò è in parte imputabile al limitato intervallo temporale di campionamento.

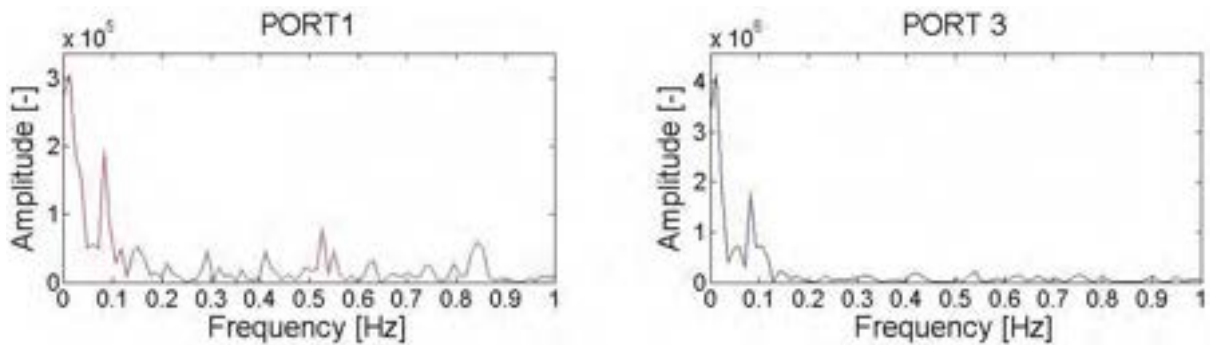


Figura 0.12. Spettri di potenza per le due sonde (scala lineare)

Anche in questo caso i due spettri di potenza di figura 2.12 e figura 2.13 mostrano un picco a 22.5 Hz. Le ipotesi sulle motivazioni sono come le precedenti.

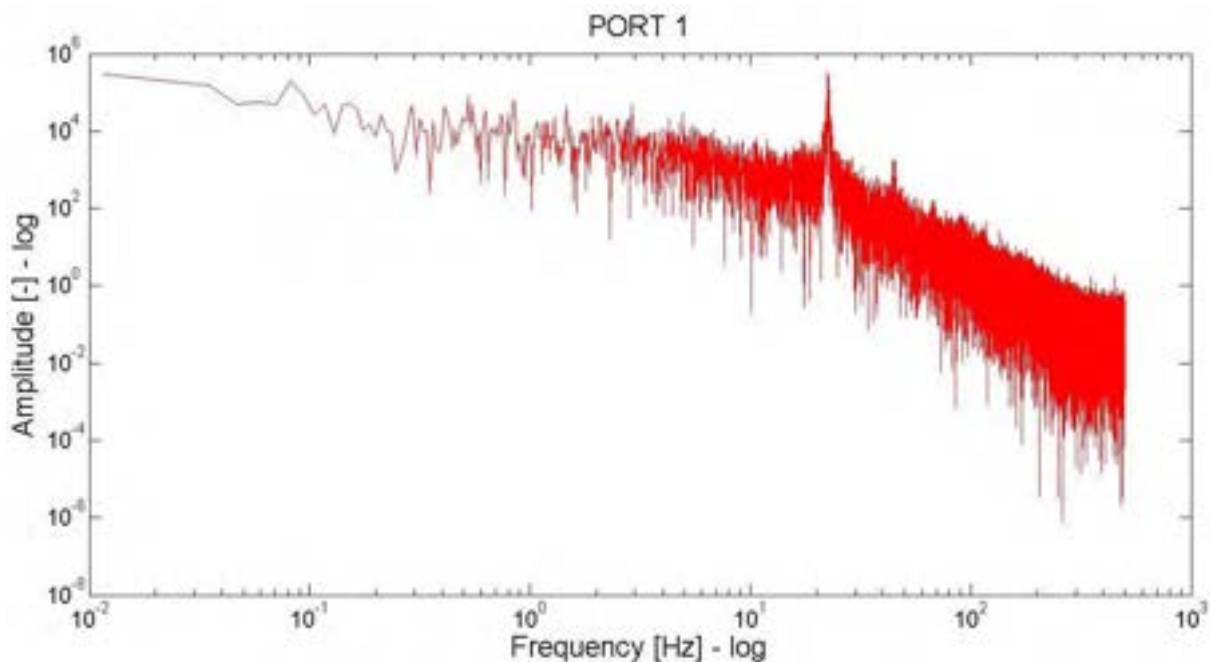


Figura 0.13. Spettro di potenza per la sonda Ch.0 in portina 1

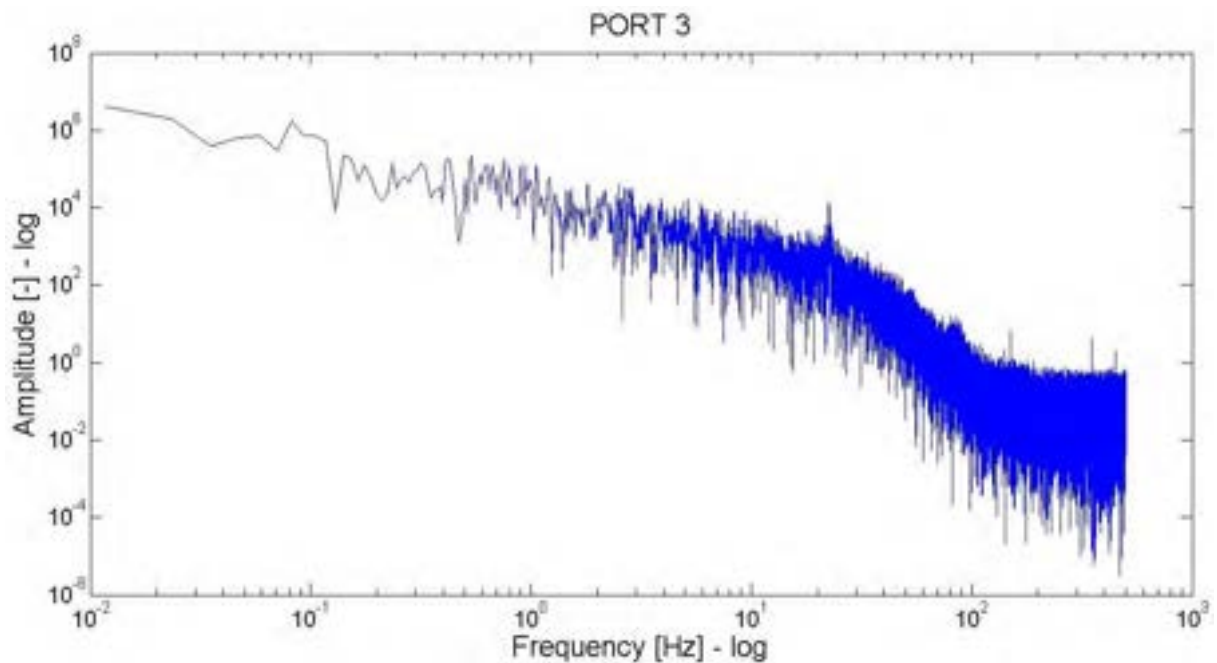


Figura 0.14. Spettro di potenza per la sonda Ch.1 in portina 3

Terza misurazione: Misura C

Si hanno le seguenti condizioni di impianto:

- ossicombustione con cabone
- ricircolo gas combusti
- tutto l' O_2 su aria principale
- sonda Ch.0 su portina 1, sonda Ch.1 su portina 3
- lunghezza sonde 150 mm

Dai segnali ottenuti con la seguente misurazione appare evidente la presenza di un disturbo relativo alla sonda ubicata nella prima portina. Data la singolarità e non ripetitività di questo nelle precedenti e successive rilevazioni e poiché il disturbo in evidenza mostra andamento singolare è possibile imputarne la causa ad eventuali agenti esterni di ordine meccanico come ad esempio un aggiustamento della sonda in fase di misurazione. Entrambi i segnali hanno oscillazioni costanti dando una frequenza di 0.4 Hz evidenziata nei grafici dello spettro in scala lineare.

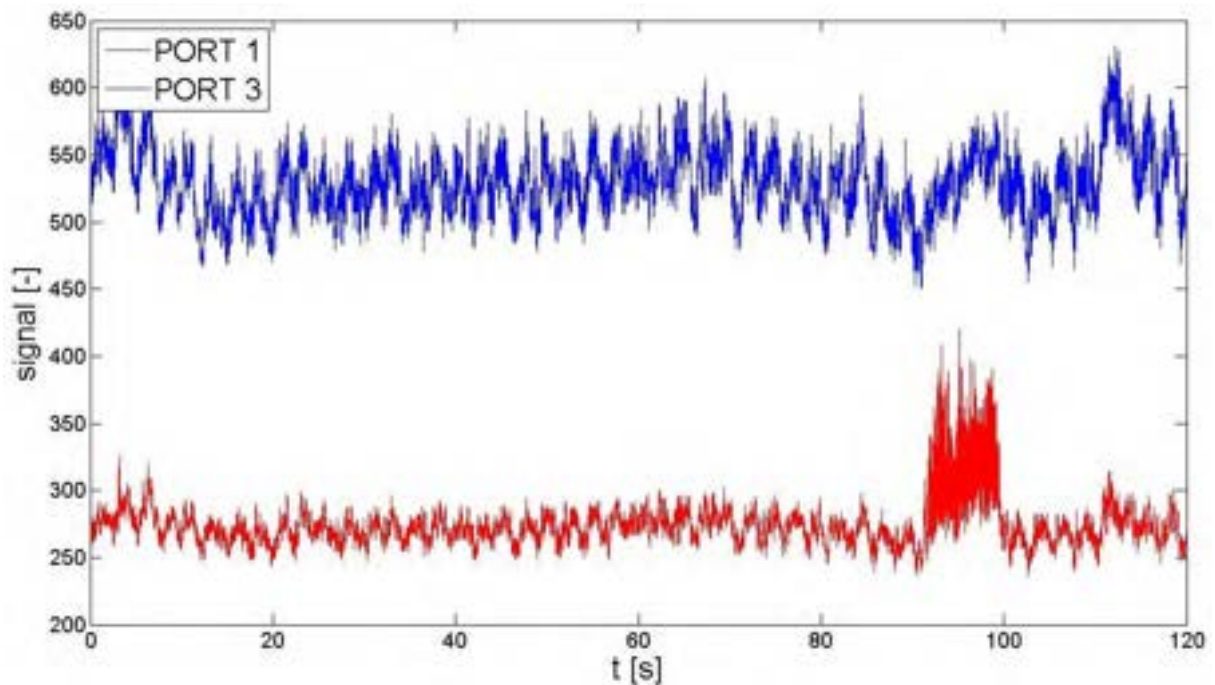


Figura 0.15. Segnali delle due sonde riferiti all'intervallo di misurazione C

Number of samples	Range		Frequency Max	
	T1	T2	Ch.0	Ch.1
119999	13	59	0,42	0,42

Ch.0 - PORT 1				Ch.1 - PORT 3			
mean	rms	skewness	kurtosis	mean	rms	skewness	kurtosis
269,9	8,8	0,13	2,73	522,5	19,8	0,12	2,53

Gli istogrammi mostrati in figura 2.15 mettono evidenziano un andamento regolare, segno che l'intervallo preso può essere considerato opportuno.

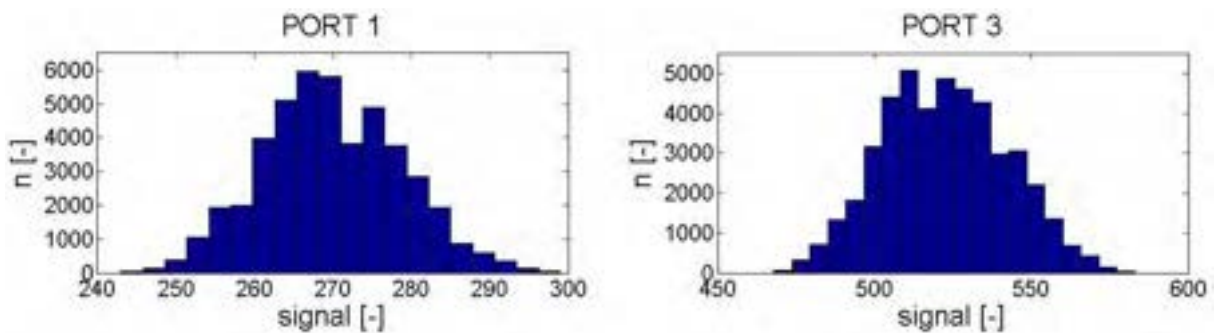


Figura 0.16. Istogrammi relativi alla distribuzione di popolazione

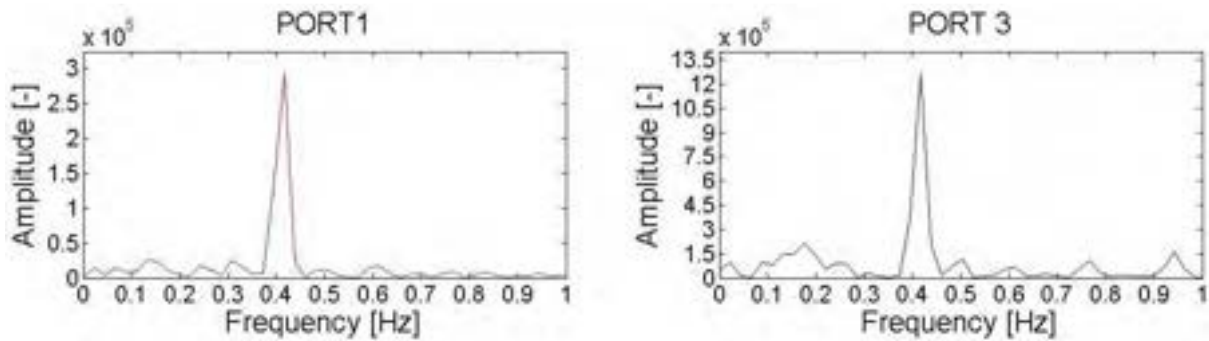


Figura 0.17. Spettri di potenza per le due sonde (scala lineare)

In questa condizione, dovuta alla differente lunghezza delle sonde, negli spettri di potenza scompare l'armonica alla frequenza di 22.5 Hz, ma sorge un picco a 90-100 Hz su entrambe. Inoltre 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 provocando un decadimento più veloce [

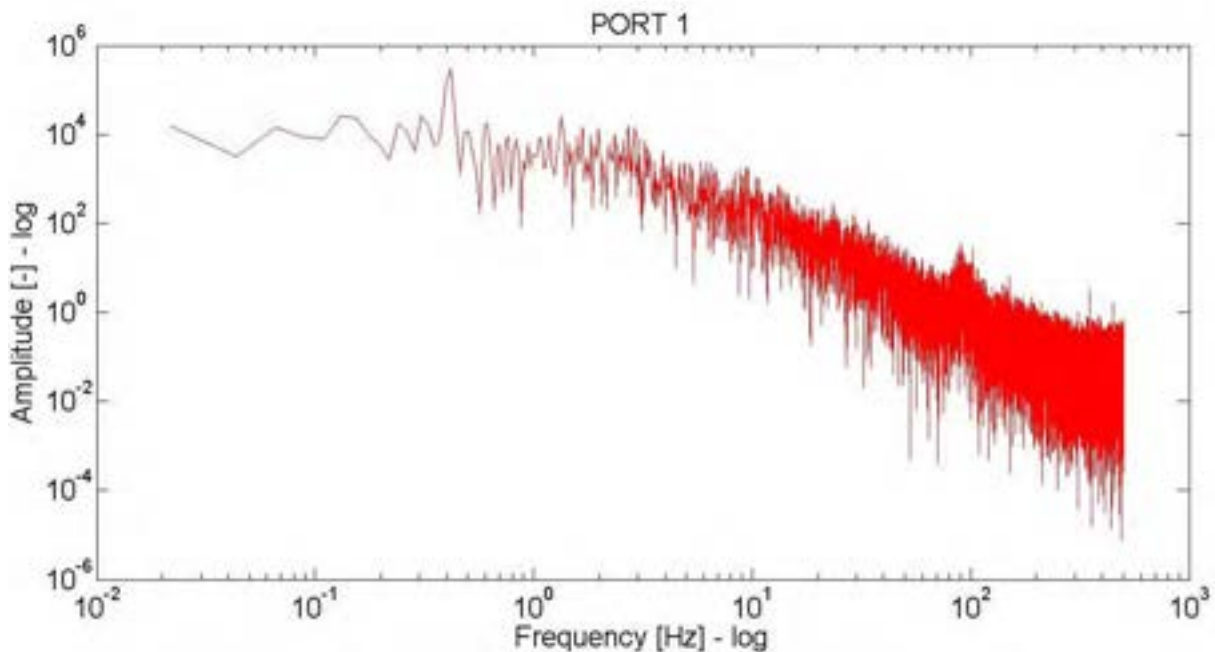


Figura 0.18. Spettro di potenza per la sonda Ch.0 in portina 1

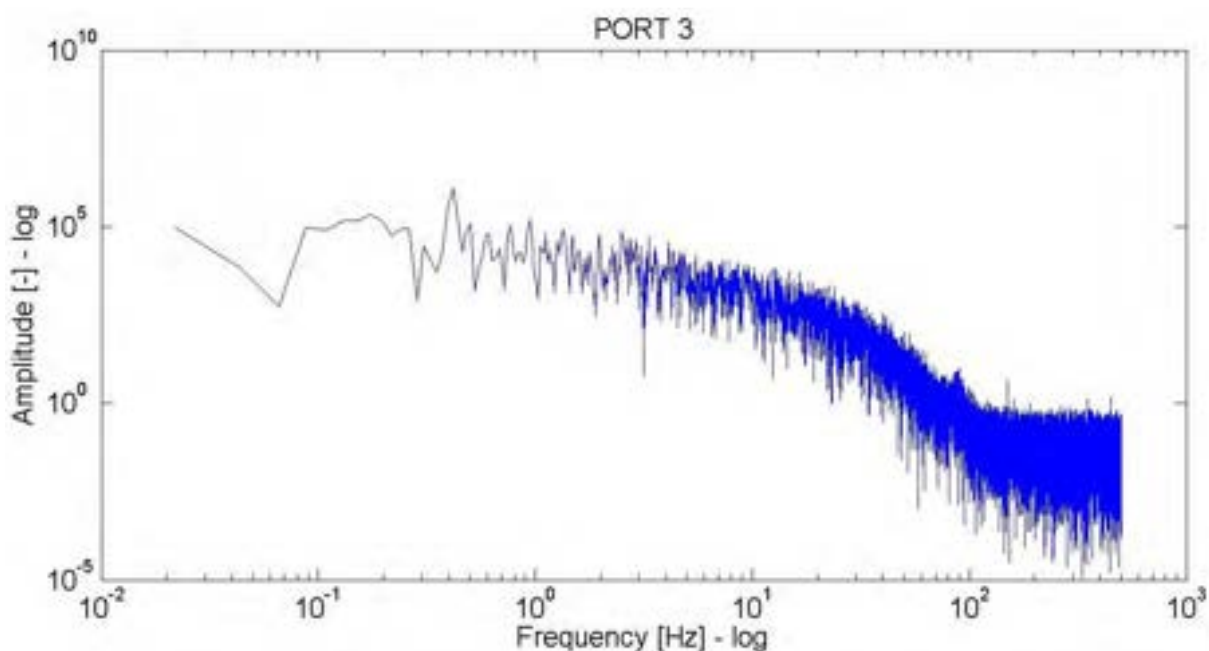


Figura 0.19. Spettro di potenza per la sonda Ch.1 in portina 3

Secondo intervallo di dati

Il grafico di figura 3.13 mostra 3 misurazioni effettuate in un range temporale di circa 7 minuti tra le 18:42:29 e le 18:49:41 riportate in tabella 3.3:

	INTERVALLO 2
Misurazione D	18:42:29 – 18:44:29
Misurazione E	18:45:20 – 18:47:20
Misurazione F	18:47:40 – 18:49:41

Tabella 0.3. Misurazioni riferite al secondo intervallo

Poiché l'ossigeno è nullo se ne deduce che in questo caso l'andamento della linea viola nel grafico rappresenta effettivamente l'aria totale. Il segnale della sonda Ch.1 (portina 3) è stato attenuato dall'utente in sede di prova.

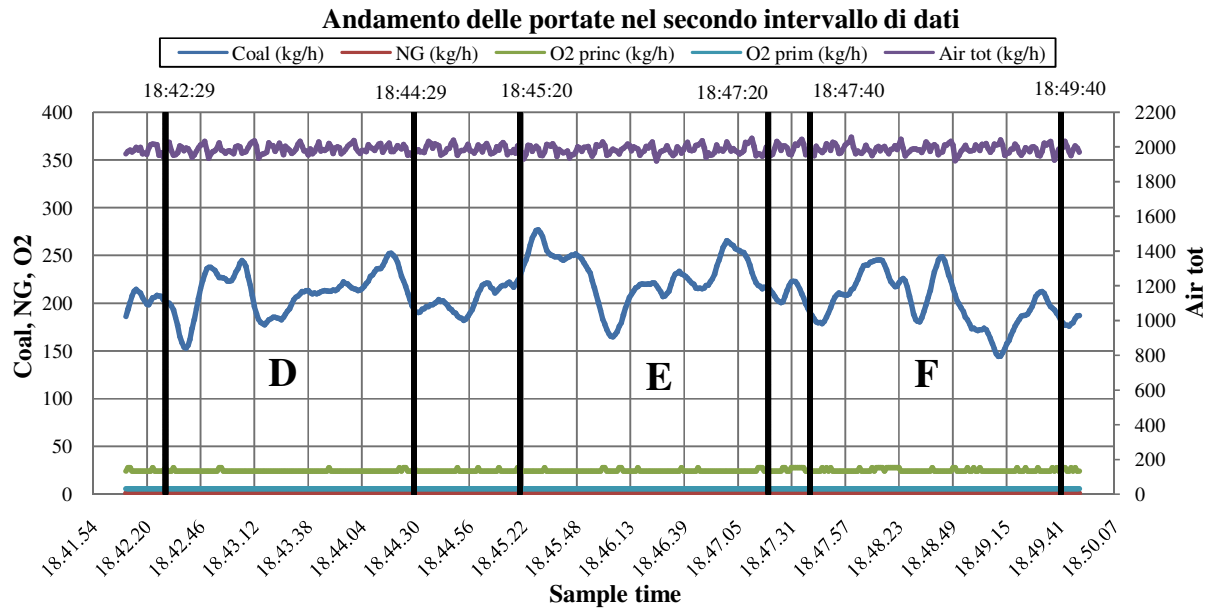


Figura 0.20. Andamento dei parametri di processo nel secondo intervallo di misurazione in ossicombustione

Descrizione dei tre casi studiati

Di seguito vengono riportate le descrizioni dei tre casi studiati nel primo intervallo di misurazione con relative interpretazioni. Anche in questo caso, per ogni intervallo sono stati estrapolati due spettri di potenza media, uno per ogni portina e relativi andamenti degli istogrammi per valutare la bontà della misurazione. Sono state utilizzate sonde di lunghezza 200 mm.

Prima misurazione: Misura D

Si hanno le seguenti condizioni di impianto:

- Combustione convenzionale cabone-aria
- sonda Ch.0 su portina 1, sonda Ch.1 su portina 3
- lunghezza sonde 200 mm

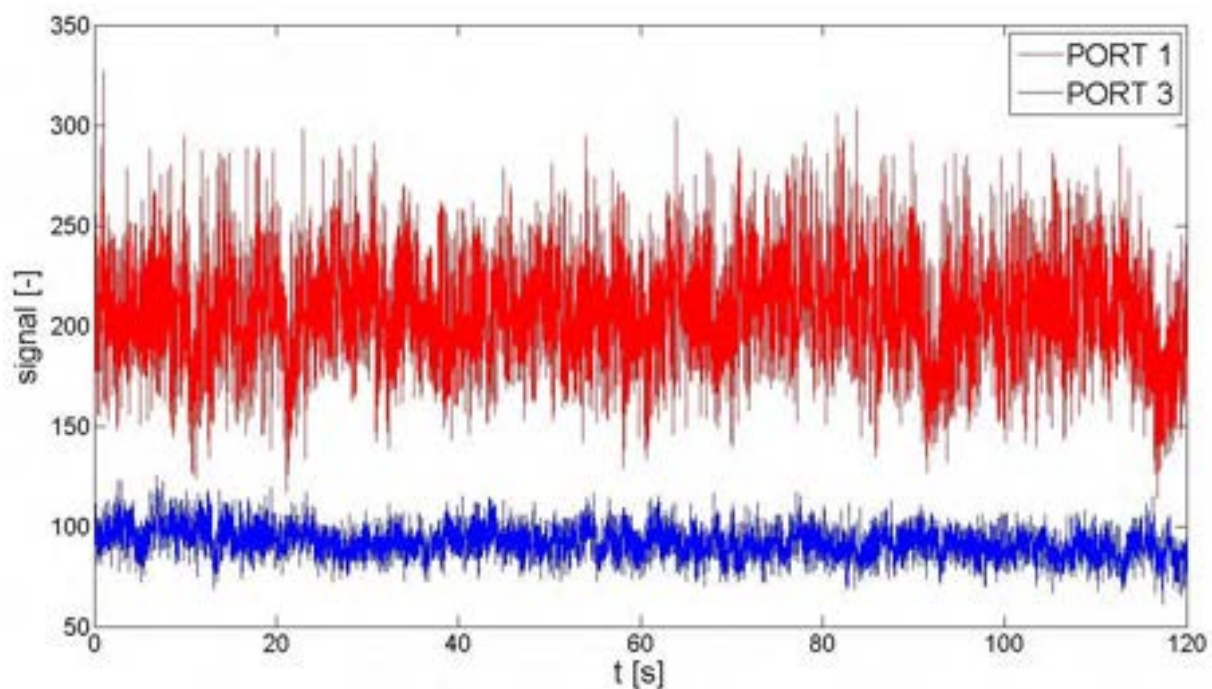


Figura 0.21. Segnali delle due sonde riferiti all'intervallo di misurazione D

Number of samples	Range		Frequency Max	
	$T1$	$T2$	$Ch.0$	$Ch.1$
119999	10	109	0,02	0,45

Ch.0 - PORT 1				Ch.1 - PORT 3			
mean	rms	skewness	kurtosis	mean	rms	skewness	kurtosis
206,6	25,7	0,10	3,0	91,77	7,17	0,15	3,01

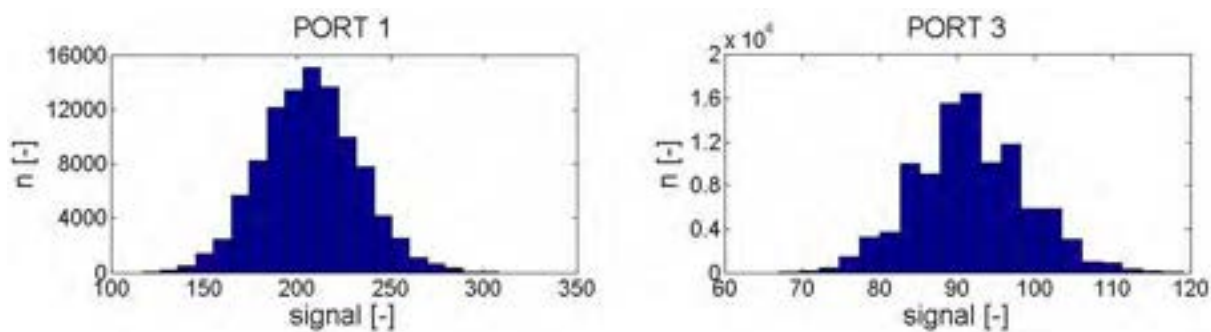


Figura 0.22. Istogrammi relativi alla distribuzione di popolazione

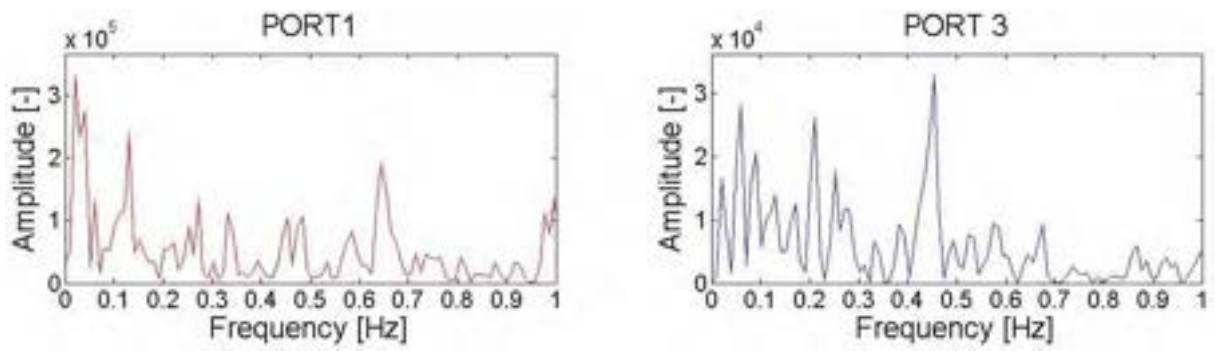


Figura 0.23. Spettri di potenza per le due sonde (scala lineare)

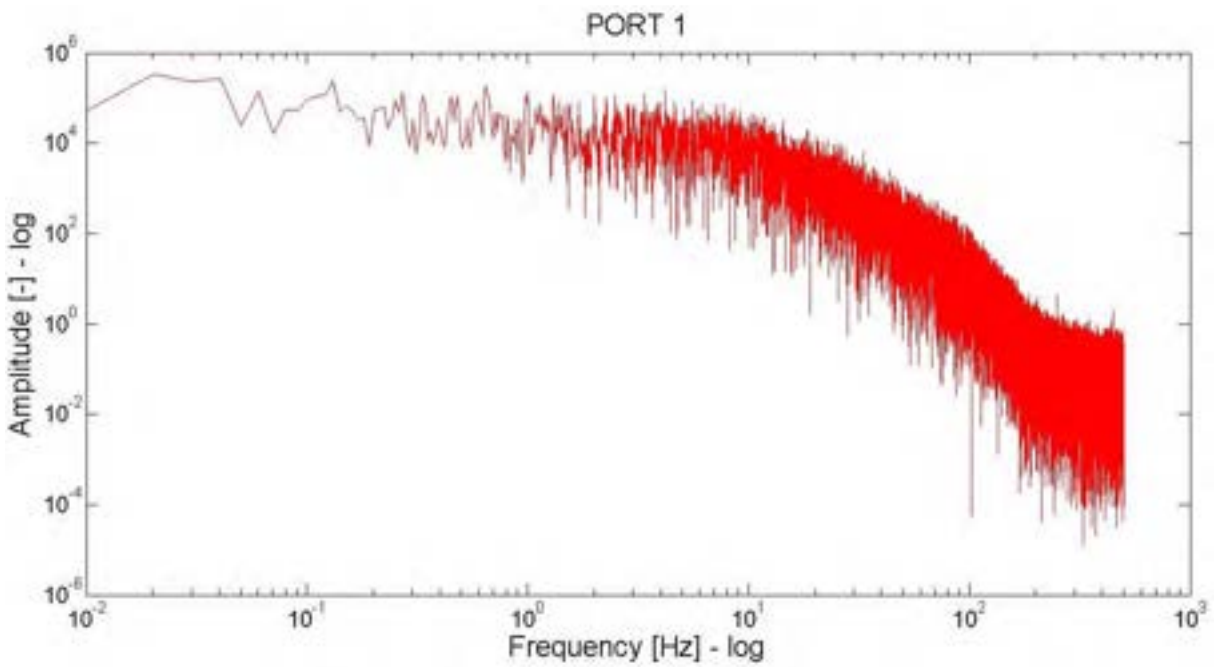


Figura 0.24. Spettro di potenza per la sonda Ch.0 in portina 1

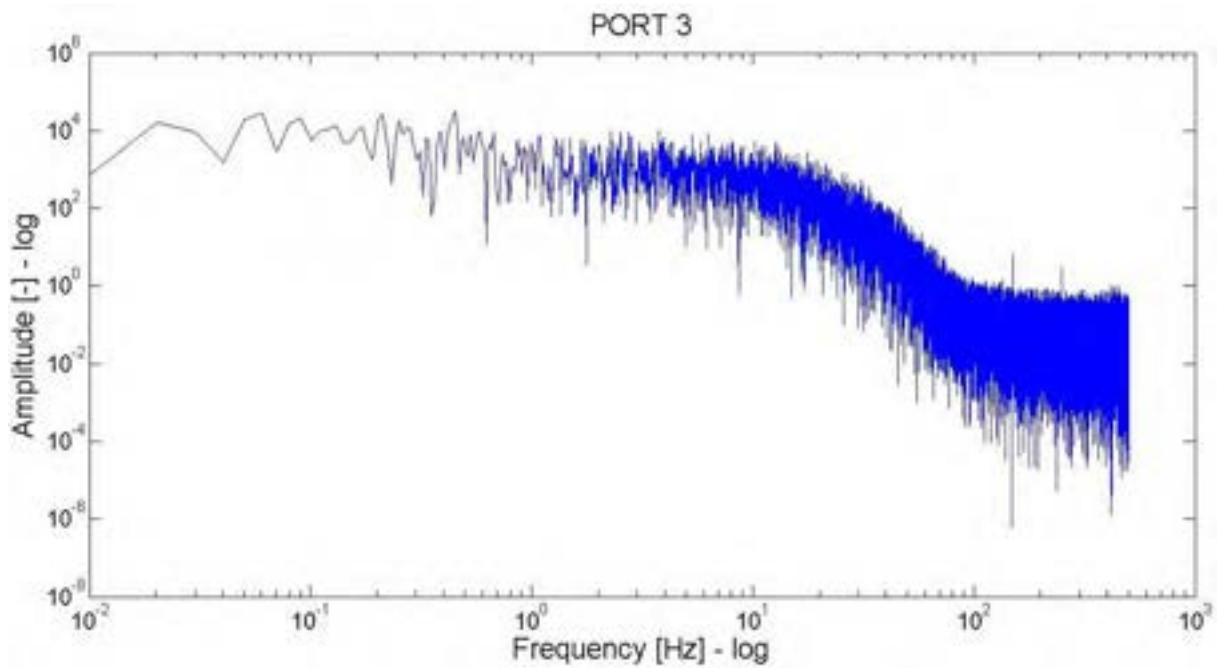


Figura 0.25. *Spettro di potenza per la sonda Ch.1 in portina 3*

Seconda misurazione: Misura E

Si hanno le seguenti condizioni di impianto:

- Combustione convenzionale carbone-aria
- sonda Ch.0 su portina 1, sonda Ch.1 su portina 3
- lunghezza sonde 200 mm

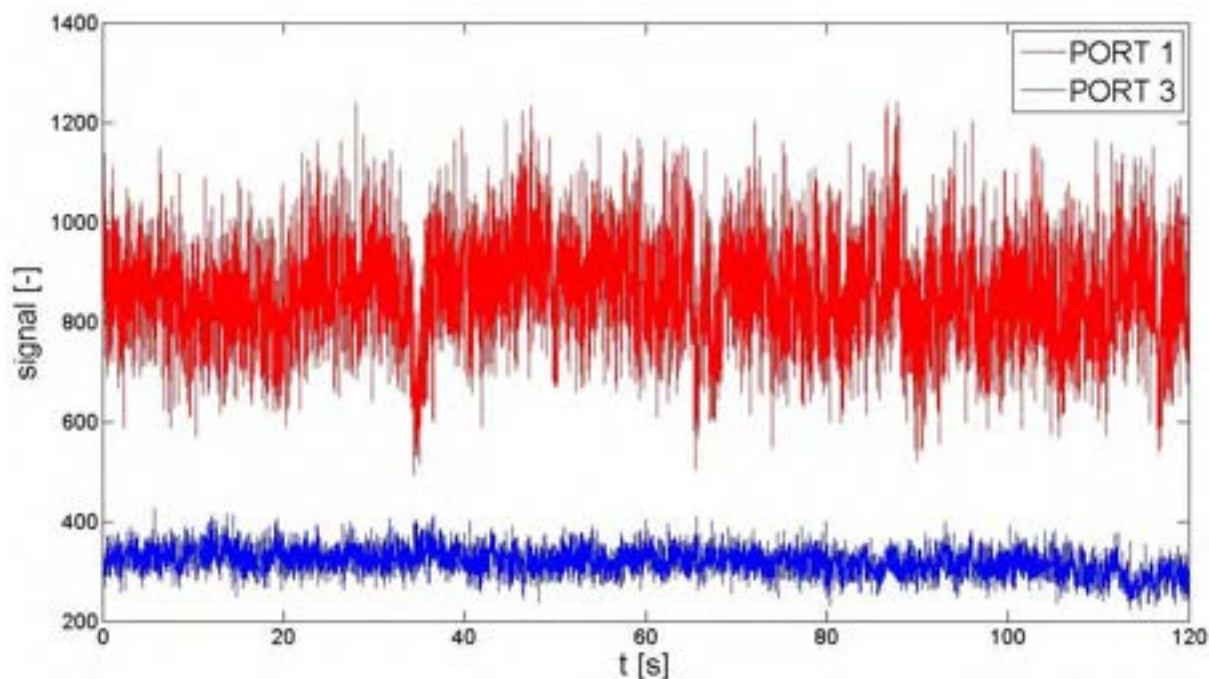


Figura 0.26. Segnali delle due sonde riferiti all'intervallo di misurazione E

Number of samples	Range		Frequency Max	
	T1	T2	Ch.0	Ch.1
119999	11	109	0,12	0,03

Ch.0 - PORT 1				Ch.1 - PORT 3			
mean	rms	skewness	kurtosis	mean	rms	skewness	kurtosis
856,3	100,8	0,04	3,06	321,5	24,1	0,12	3,13

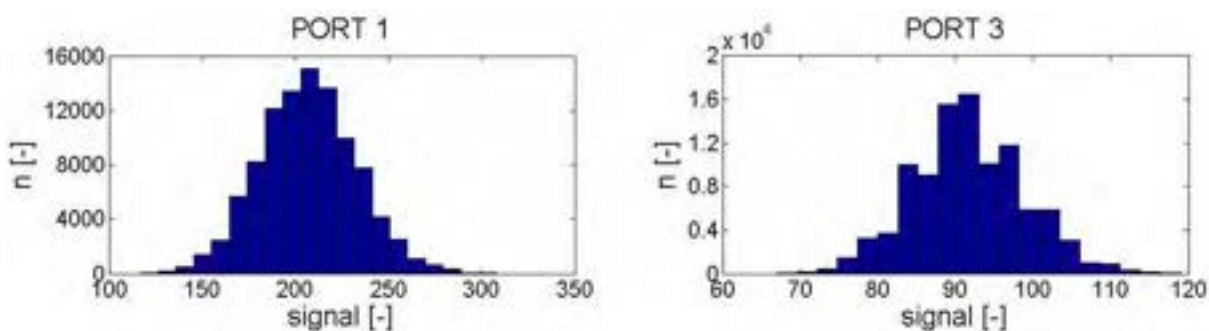


Figura 0.27. Istogrammi relativi alla distribuzione di popolazione

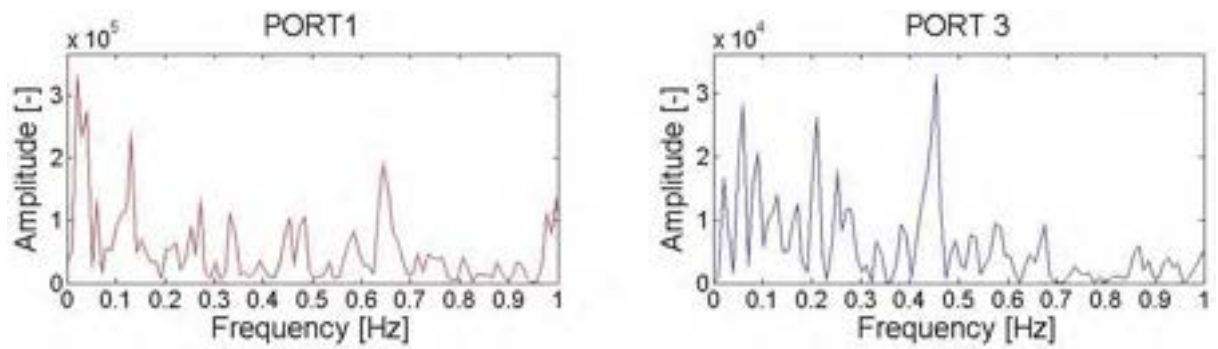


Figura 0.28. Spettri di potenza per le due sonde (scala lineare)

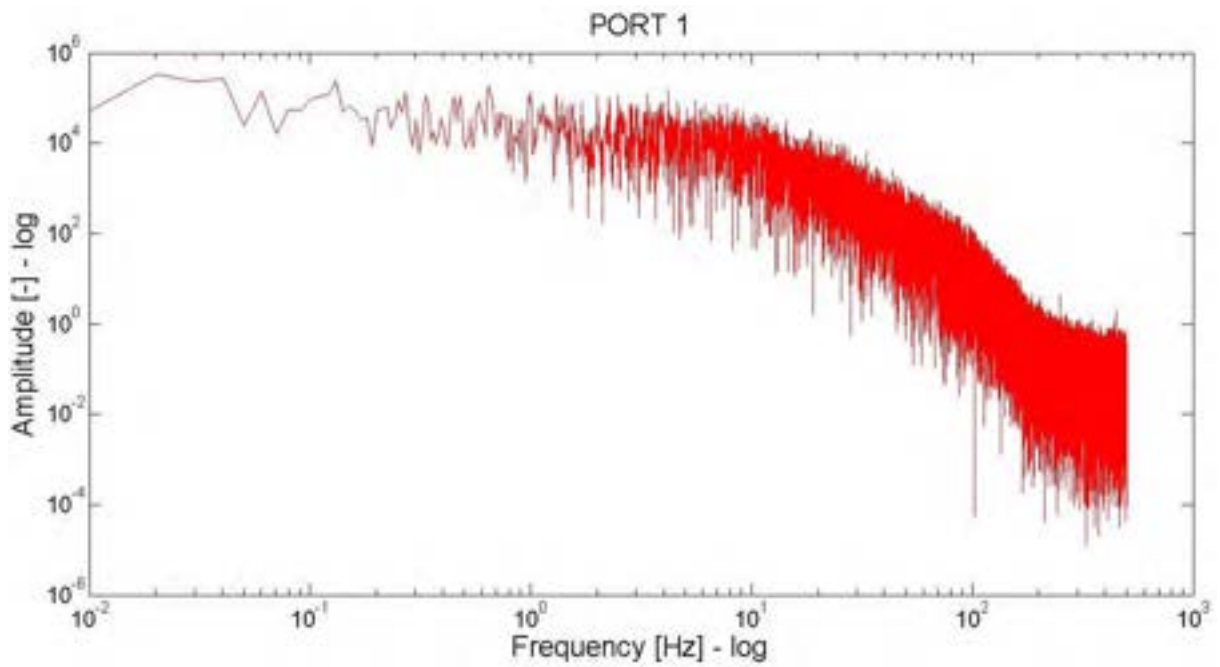


Figura 0.29. Spettro di potenza per la sonda Ch.0 in portina 1

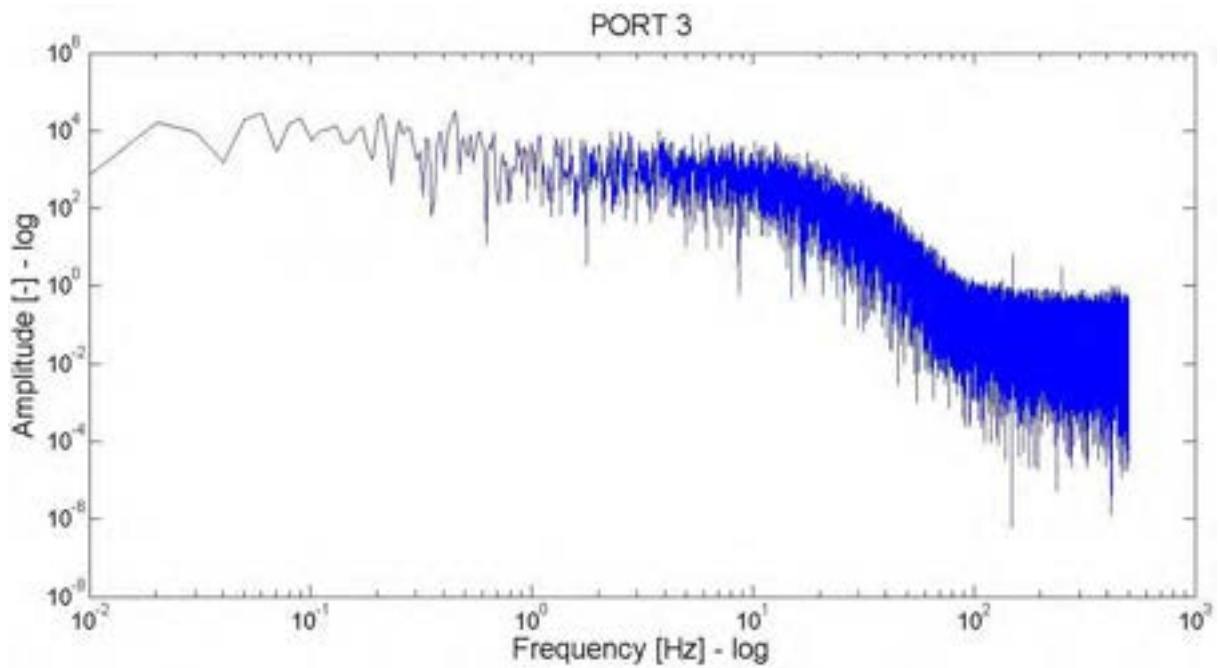


Figura 0.30. Spettro di potenza per la sonda Ch.1 in portina 3

Terza misurazione: Misura F

Si hanno le seguenti condizioni di impianto:

- Combustione convenzionale carbone-aria
- sonda Ch.0 su portina 1, sonda Ch.1 su portina 3
- lunghezza sonde 200 mm

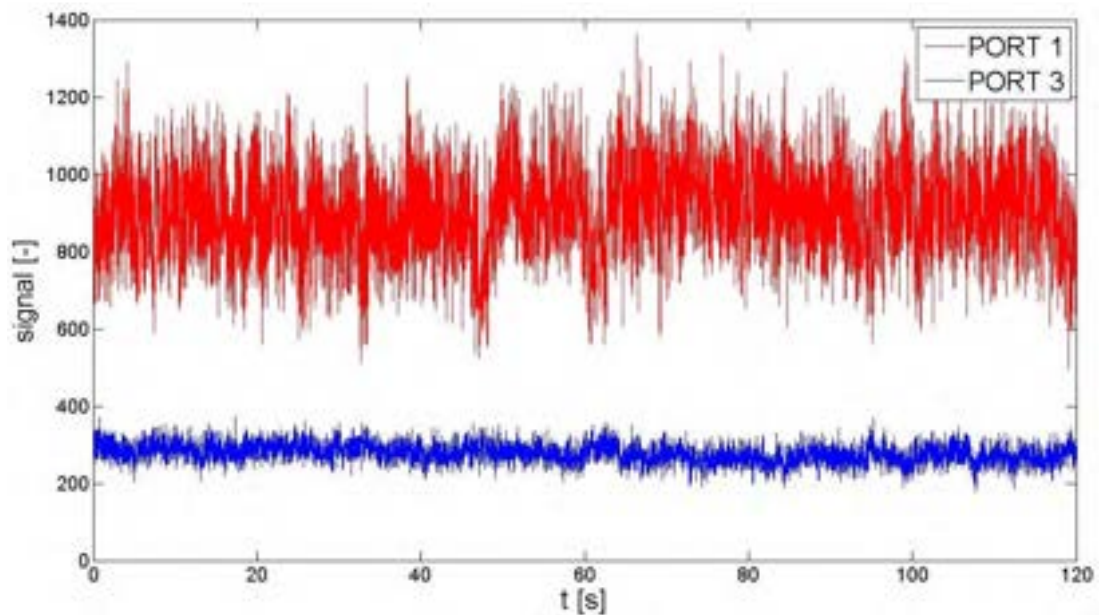


Figura 0.31. Segnali delle due sonde riferiti all'intervallo di misurazione F

Number of samples		Range		Frequency Max	
		$T1$	$T2$	$Ch.0$	$Ch.1$
119999		8	109	0,15	0,13

Ch.0 - PORT 1				Ch.1 - PORT 3			
mean	rms	skewness	kurtosis	mean	rms	skewness	kurtosis
902,6	111,2	0,017	3,04	277,4	24,4	-0,012	3,02

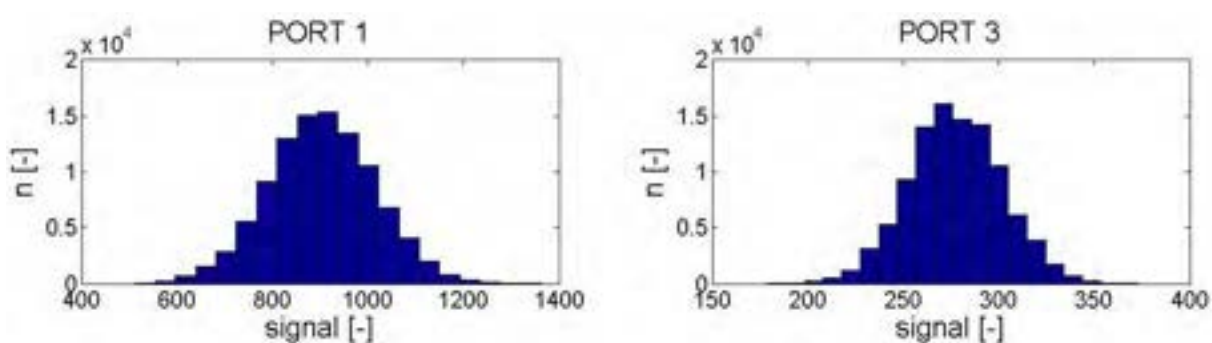


Figura 0.32. Istogrammi relativi alla distribuzione di popolazione

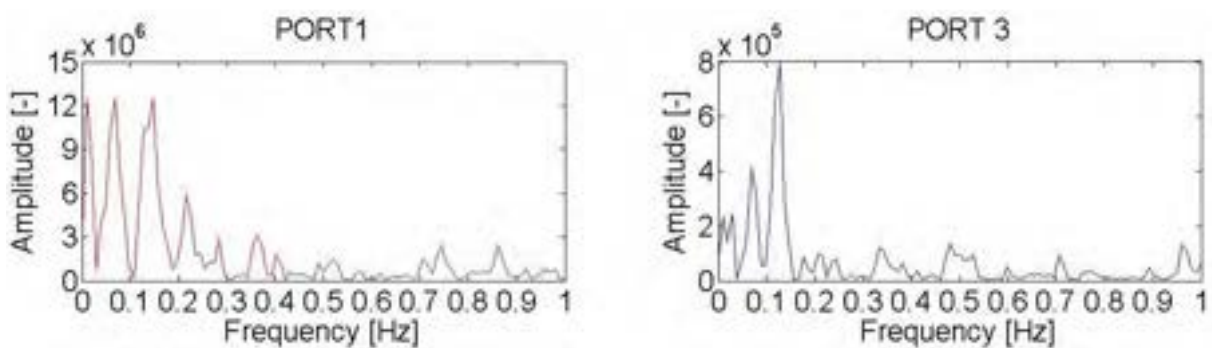


Figura 0.33. Spettri di potenza per le due sonde (scala lineare)

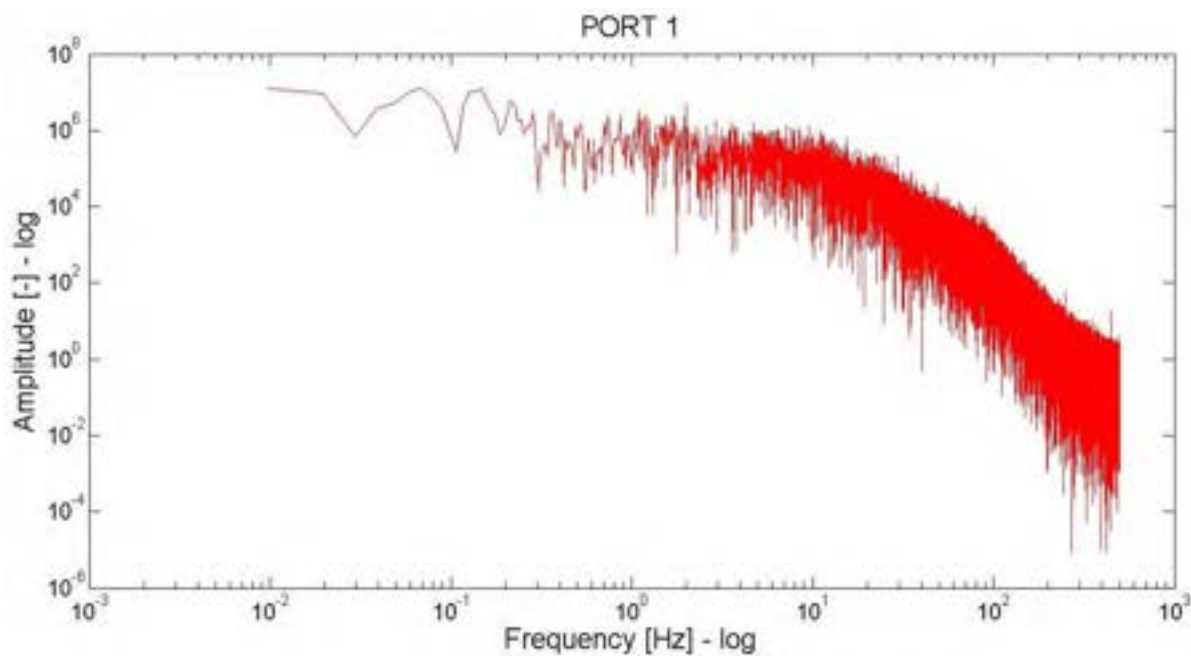


Figura 0.34. Spettro di potenza per la sonda Ch.0 in portina 1

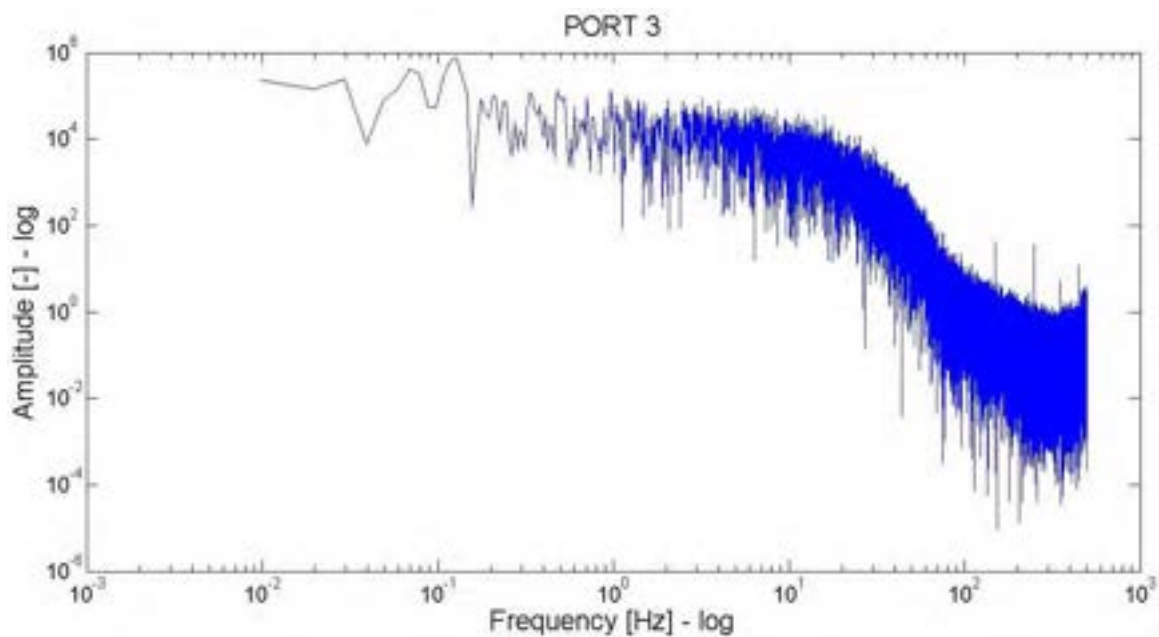


Figura 0.35. Spettro di potenza per la sonda Ch.1 in portina 3

Confronto tra spettri

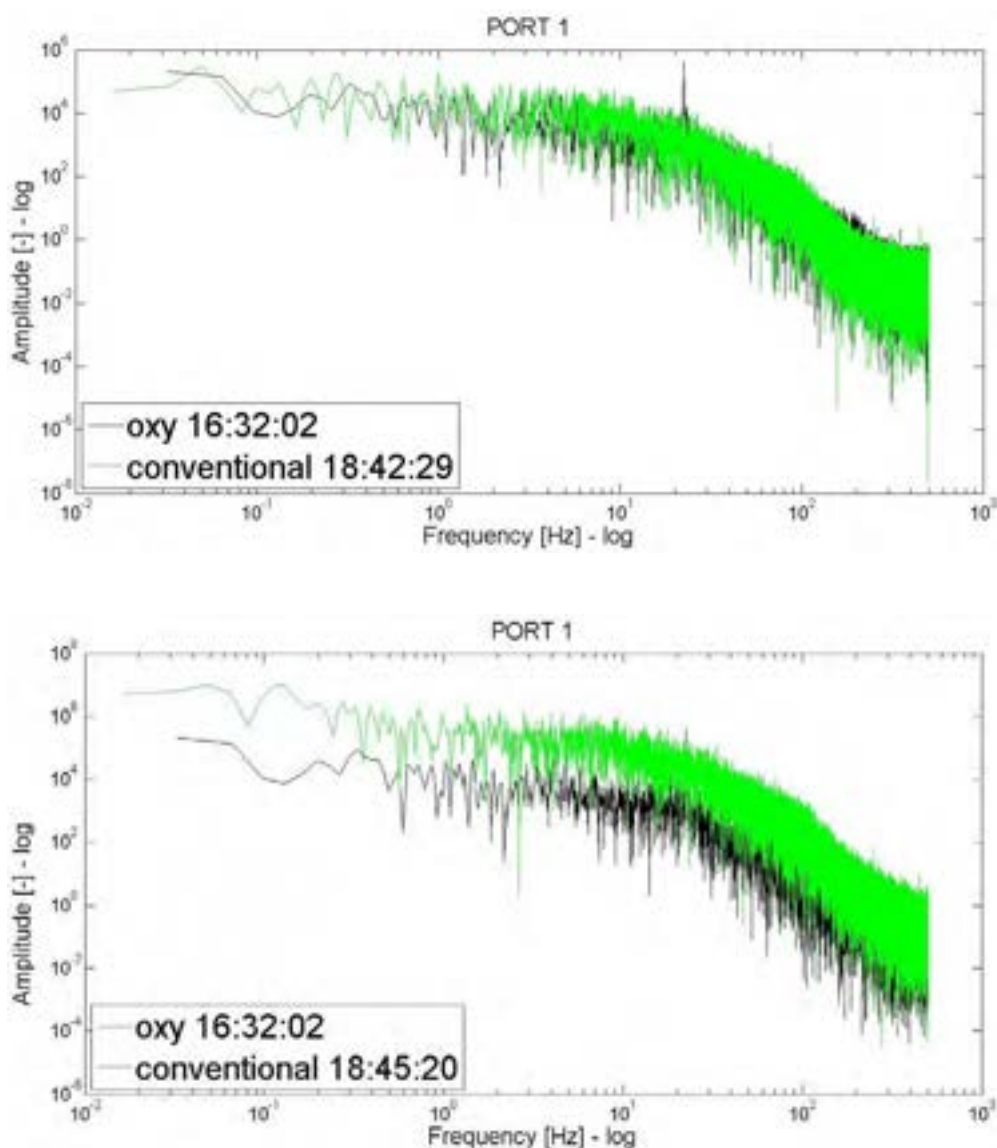
Sono stati messi a confronto gli spettri ottenuti nelle misurazioni prese nei due intervalli per ogni portina, secondo la logica esposta in tabella 3.5:

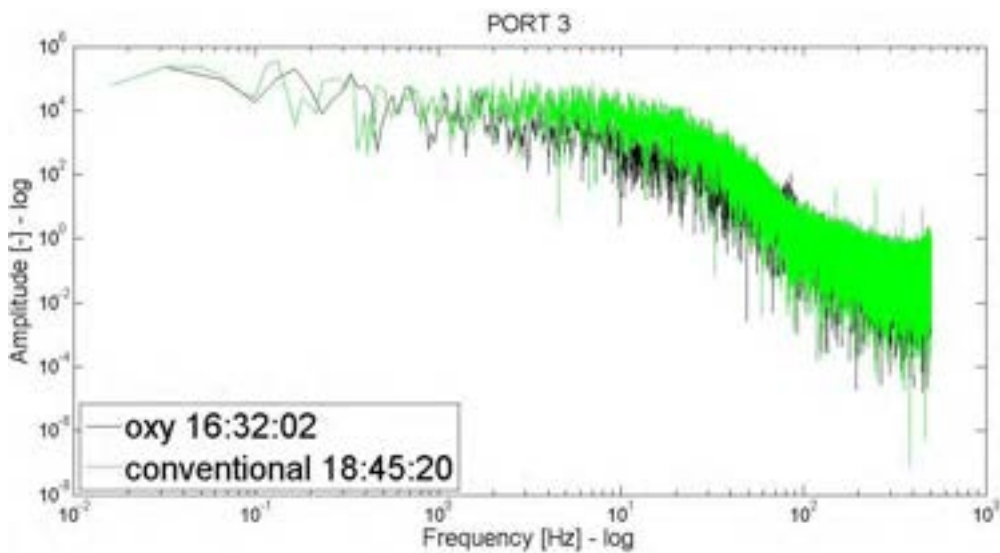
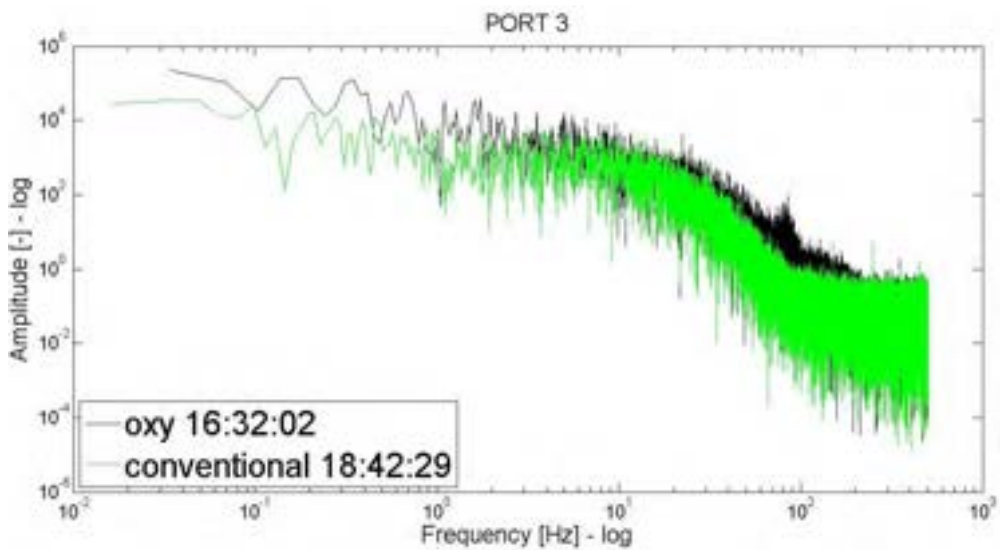
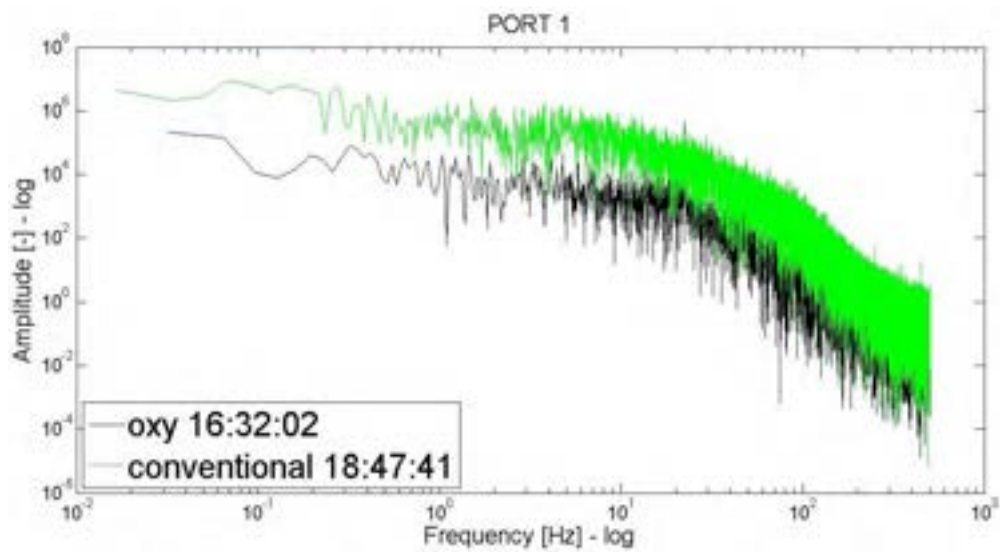
INTERVALLO 1 (Oxy-combustion)	INTERVALLO 2 (conventional combustion)
<i>Misurazione A</i>	Misurazione D
	Misurazione E
	Misurazione F
<i>Misurazione C</i>	Misurazione D
	Misurazione E
	Misurazione F

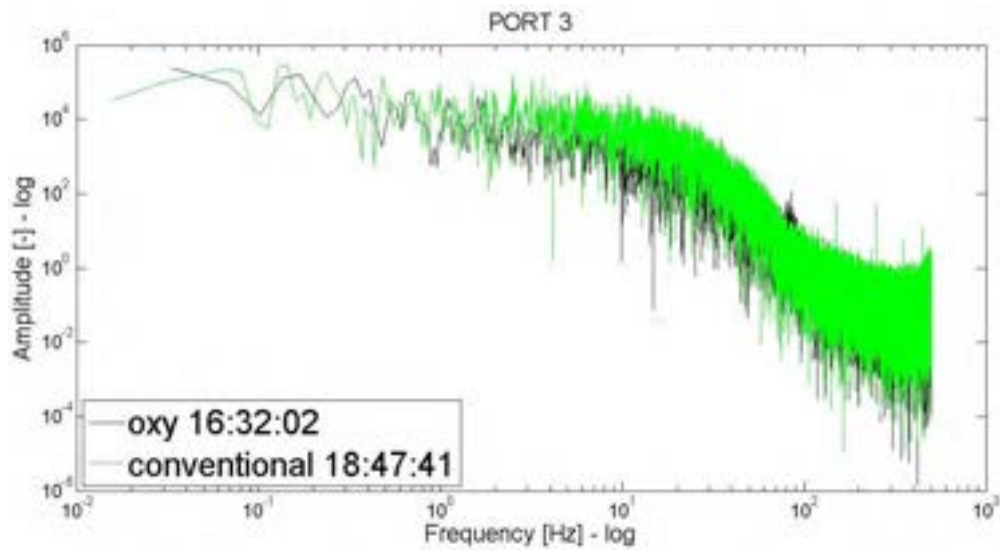
Tabella 0.4. Confronto tra spettri

Lo scopo è osservare l'andamento dello spettro in intervalli temporali simili ma in condizioni diverse, ma stazionarie. Sono stati messi a confronto spettri ottenuti da ossicombustione con quelli ottenuto da combustione convenzionale.

Confronto tra lo spettro di Misurazione A e spettri di combustione convenzionale

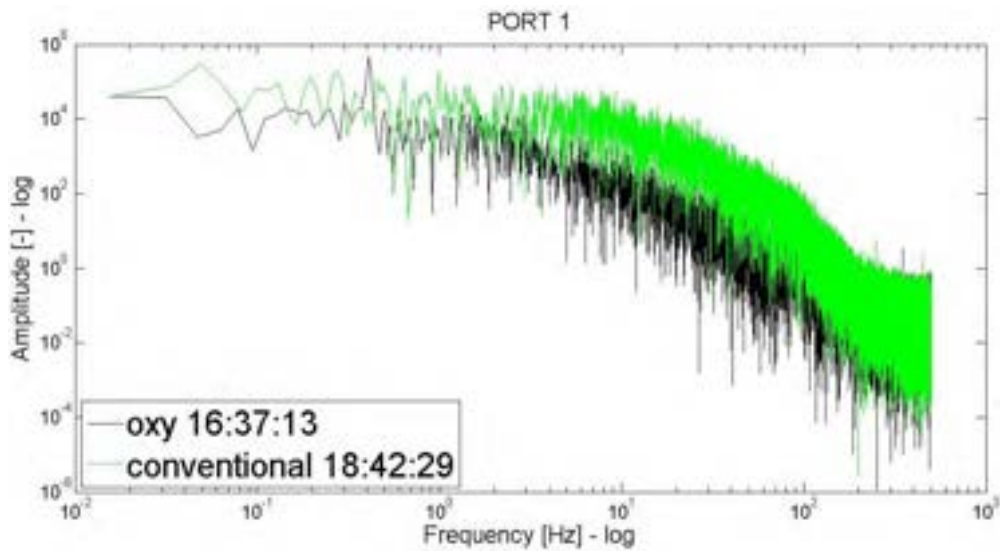


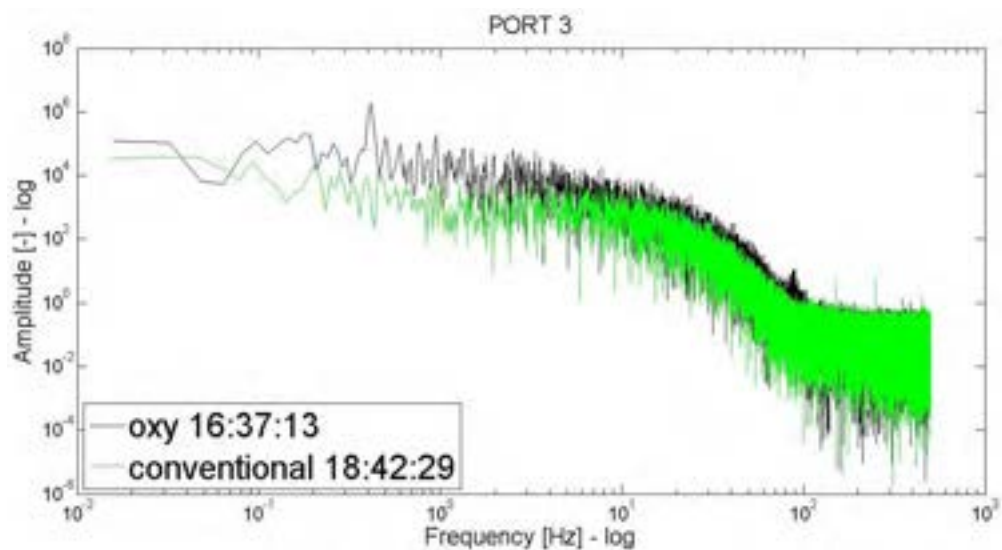
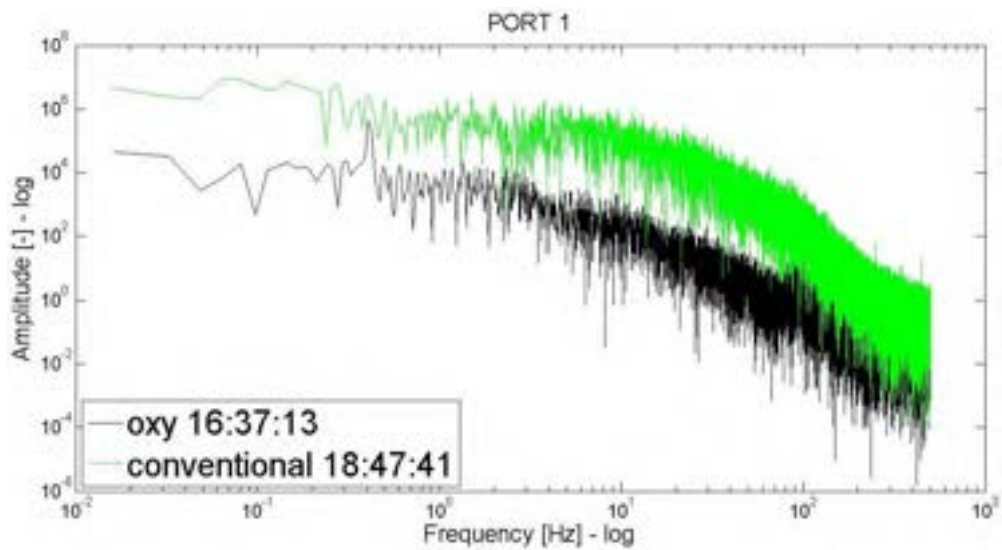
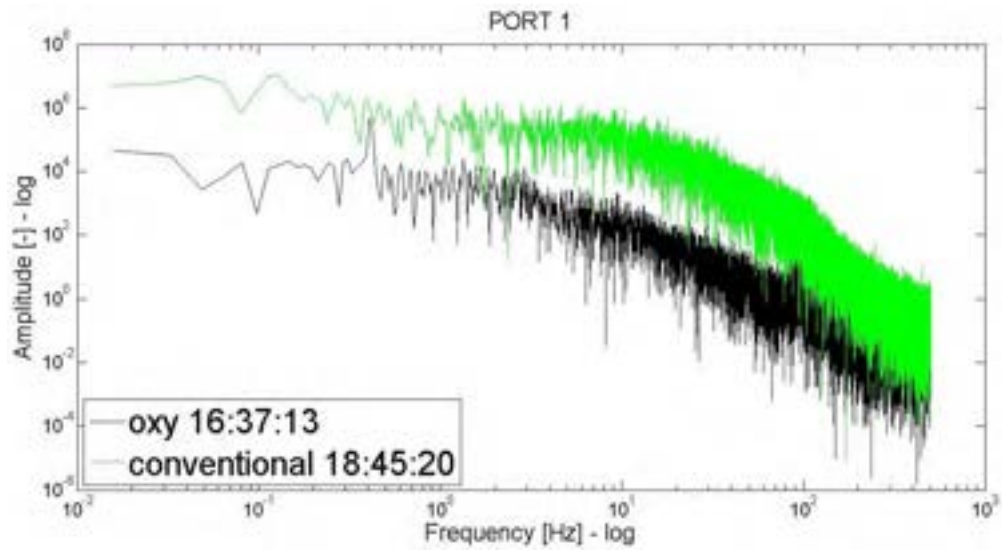


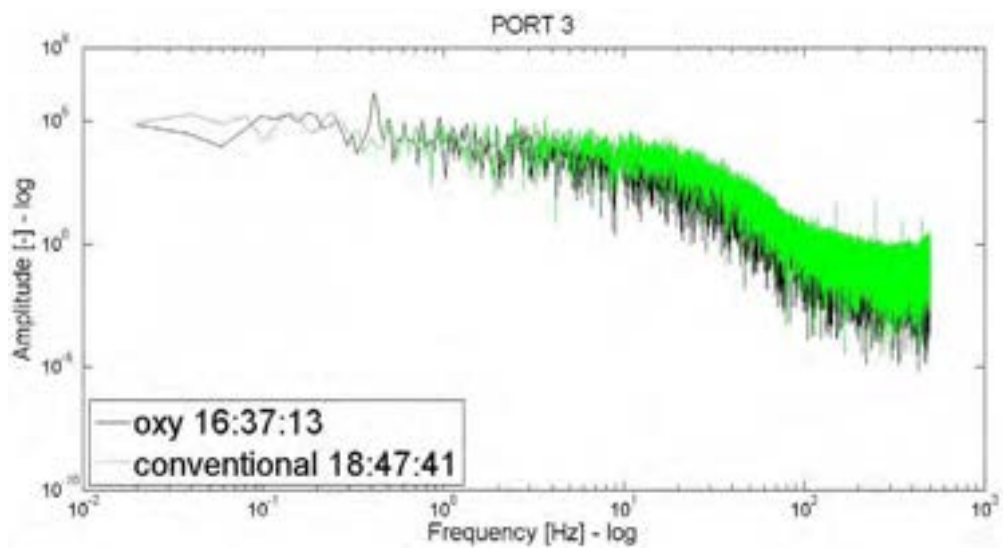
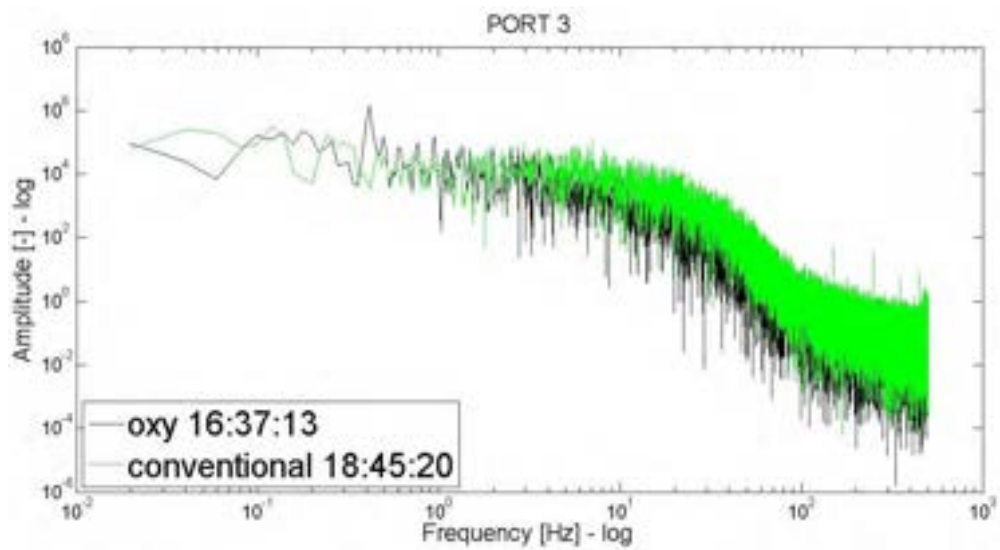


Confronto tra lo spettro di Misurazione C e spettri di combustione convenzionale

Anche in questo caso gli spettri ottenuti sulla portina 1 sono distanti tra loro. Il processo di combustione convenzionale ha maggiore ampiezza,







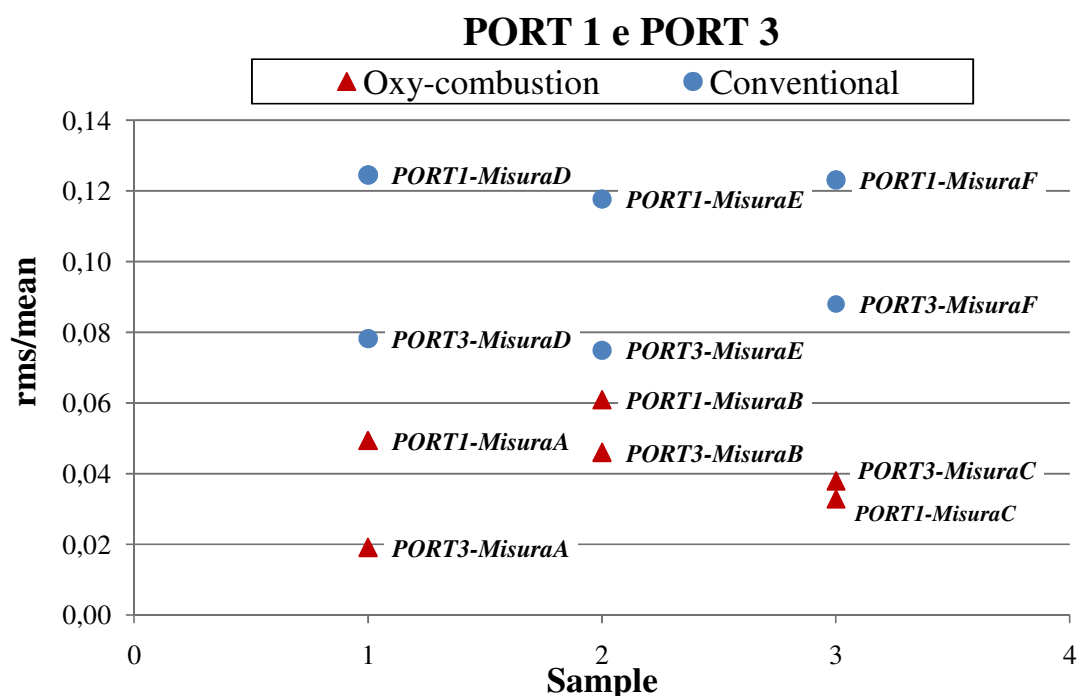


Figura 0.36. Confronto rms/mean per le due rilevazioni su portina 1 e portina 3
Nelle tabelle di seguito si riportano i valori delle frequenze massime in casi di ossi-combustione della fornace.

		Frequency Max							
		Measurement A		Measurement B				Measurement C	
PORT1	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 1	Interval 2	
	0,0358	0,0364	0,1425	0	0,0628	0	0,4139	0,4239	
PORT3	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 1	Interval 2	
	0,0358	0	0,1425	0,0734	0,0628	0,2624	0,4139	0,106	

		Amplitude							
		Measurement A		Measurement B				Measurement C	
PORT1	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 1	Interval 2	
	350000	352000	620000	0	350000	0	600000	200000	
PORT3	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 1	Interval 2	
	690000	0	490000	700000	3000000	180000	2530000	1390000	

Le tabelle seguenti riportano i valori dei picchi di frequenza in combustione convenzionale.

		Frequency Max					
		Measurement A		Measurement B		Measurement C	
ch.0-P1	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	
	0,1922	0,044	0,0524	0,1223	0,2628	0,1378	
ch.1-P3	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	

	0,0214	0,066	0,1223	0,0349	0,0239	0,1148
--	--------	-------	--------	--------	--------	--------

	Amplitude					
	Measurement A		Measurement B		Measurement C	
ch.0-P1	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2
	390000	800000	13000000	9900000	9000000	0
ch.1-P3	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2	Interval 1	Interval 2
	55000	25000	360000	390000	0	620000



DATA REPORT

Livorno, September 2011
IFRF Doc. No E110/y/02

ODC tests on the furnace nr.1, Fosper

Development of instrumentation and methods for the
diagnostic of oxy-combustion systems

ENEA, Pisa University, IFRF

Prepared by
G. Coraggio, L. Biasci

Approved by
L. Tognotti

<http://www.research.ifrf.net>

INTERNATIONAL FLAME RESEARCH FOUNDATION

REGISTERED OFFICE
c/o Presidenza Facoltà di
Ingegneria, Via Diotisalvi 2,
56126, Pisa, Italy
CF: 93059950506

OPERATIONS CENTRE
Via Salvatore Orlando 5,
57123 Livorno, Italy

CONTACT NUMBERS
Tel: +39 0586 891678
Fax: +39 0586 200045
e-mail info@ifrf.net
<http://www.ifrf.net>

BANK
IBAN: IT 06 M 06200 14011 000000586187
Cassa di Risparmio Lucca Pisa Livorno
Swift: BPALIT3LXXX
VAT no.: 01807000508

Acknowledgements

IFRF staff: L. Tognotti
G. Coraggio
L. Biasci
M. Faleni

ENEL staff: D. Cecchini
A. Birindelli
M. Monticelli
L. Carrai
F. Costanzi
R. Miliani

Executive summary

Within the ENEA and IFRF joint project “Development of instrumentation and methods for the diagnostic of oxy-combustion systems”, IFRF Carried out a one-day experimental trial on the FOSPER furnace in September 2011. The main objective of the campaign was to test the ENEA ODC probe in a semi-industrial plant in order to explore the diagnostic possibilities of this optical system.

This document is a preliminary collection of the experimental data.

Abbreviations

NDIR	nondispersive infrared sensor
RFG	recycled flue gas
NG	natural gas

Index

Acknowledgements	2
Executive summary	3
Abbreviations	4
Index	5
Table of figures	7
1 Introduction	8
2 The Fo.Sper system for oxy-combustion	8
2.1 The plant.....	8
2.2 Recycle ratio.....	12
2.3 The furnace.....	12
2.4 The burner	13
3 Measurement probes	16
3.1 Gas sampling	16
3.2 Heat flux meter	17
3.3 Ellipsoidal radiometer	19
3.4 System of optical analysis of flame fluctuations	19
4 Fuel	21
5 Measurement campaign	22
5.1 Programme	22
5.2 Input output conditions	23
5.3 NO _x emission performance.....	24
5.4 Flue gas analysis	25
5.5 Flue gas particulate analysis.....	27
5.5.1 Conventional NG combustion with O ₂ =0.1%.....	28

5.5.2	NG-Oxy combustion with O ₂ =0.3	29
5.5.3	NG-Oxy combustion with O ₂ =2.3	30
5.5.4	NG-Oxy combustion with O ₂ =6.2	31
5.6	Total heat flux measurements.....	32
6	Conclusions	34
7	Bibliography.....	35
	Appendix A. Heat flux data and charts.....	36
	Appendix B. Furnace wall temperatures	37

Table of figures

Figure 1 Convective heat-exchanger.....	8
Figure 2 FOSPER plant scheme	10
Figure 3 Flow sheet of the recycled flue gas condensation system	11
Figure 4 Condenser and neutralization system.....	11
Figure 5 Refill of the oxygen storage tank	11
Figure 6 FOSPER furnace scheme	13
Figure 7: TEA-C burner.	14
Figure 8: Swirler position diagram.	14
Figure 9: TEA-C in air combustion.	15
Figure 10: TEA-C in oxy combustion.....	15
Figure 11 Quartz tip probe	16
Figure 12 Relative error of the total heat flux	18
Figure 13 Total heat flux meter	18
Figure 14 Ellispoidal radiometer tip	19
Figure 15 Scheme of the ellipsoidal radiometer	19
Figure 16 ODC System	20
Figure 17 Points of view of the ODC probes	20
Figure 18 NO _x emissions at different O ₂ level in the flue gases.....	25
Figure 19 NO _x emissions comparison with previous measurements	25
Figure 20: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 1.....	26
Figure 21: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 2.....	26
Figure 22: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 3.....	27
Figure 23: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 4.....	27
Figure 24: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 5.....	27
Figure 20 Heat flux comparison	32
Figure 21: Total heat flux measurements in oxy combustion comparison.	32
Figure 22: Total heat flux measurements in air combustion comparison.	33
Figure 23 Furnace walls temperature.....	33
Figure 24 Heat flux profiles in oxy-combustion best setting	36
Figure 25 Heat flux profiles in oxy-combustion with diluted NG best setting	37

Introduction

Within the ENEA and IFRF joint project “Development of instrumentation and methods for the diagnostic of oxy-combustion systems”, IFRF Carried out an experimental trial on the FOSPER furnace in September 2011. The main objective of the campaign was to test the ENEA ODC probe in a semi-industrial plant in order to explore the diagnostic possibilities of this optical system.

This document will describe the experimental setup of the campaign and will contain a preliminary collection of the experimental data. The results coming from ENEA about the ODC probe are not yet available and will be presented in a following report.

The Fo.Sper system for oxy-combustion

The plant

The plant used for the oxy-combustion is shown in the Figure 2. The flue gas recycled line and the condenser are indicated with a pink line and the O₂ pipeline and storage tank are indicated with the blue line.

This plant is the retrofit of the old Fo.Sper. plant used for conventional combustion.

The combustion facility is designed to recycle a controlled mass fraction of the post-combustion gas back into the furnace by first mixing the RFG with O₂ before combustion with the fuel.

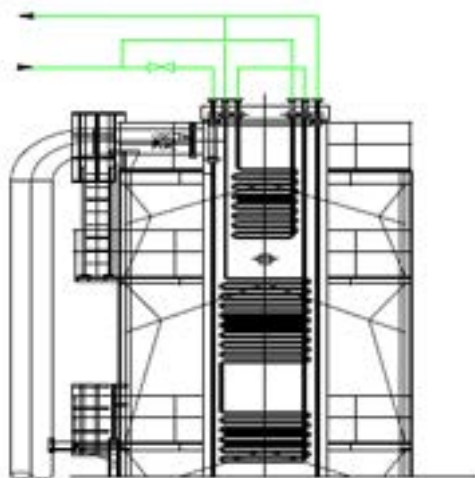


Figure 1 Convective heat-exchanger

The flue gas coming out the combustion chamber is sucked by a fan for smoke extraction set upstream the bag filters. This fan is used also to adjust the pressure inside the combustion chamber. The gases go in the first convective section (Figure 1) where they are cooled down to about 400°C. This convective section is a flue gas/water heat exchanger that uses closed-circuit water. It has a rectangular shape with membrane wall tubes in each of the four sides. Inside the boiler there are two tube bundles, one of this can be switched off. After the convective section the gas stream crosses the Ljungström exchanger that further reduces its temperature down to about 150°C, and increases

the temperature of the comburent stream.

The cooled flue gas then crosses through two bag filters, which removes the solid particulate, and afterwards it is divided in two streams, one is sent to the chimney the other is condensed and recycled (the flue gas recycled line and the condenser are indicated with a pink line in Figure 2).

Another fan is set upstream the furnace and the Ljungström exchanger; it provides the secondary and tertiary RFG streams.

RFG pass through two electrical pre-heaters, one for each stream (the secondary/tertiary RFG crosses first the Ljungström and then the electrical pre-heaters reaching a temperature about 300°C).

All the pipelines are equipped with the instrumentation for measuring flowrates, temperature and pressure.

In order to have a large number of experimental configurations, the plant is designed to be as much flexible as possible. In fact, the following parameters during oxy-experimental tests can be changed:

1. Wet/Dry recycle – a condenser is installed in the flue gas recycle line, in order to enable both dry recycle and wet recycle. The recycled flue gas is used as secondary/tertiary comburent and also as primary transport gas for coal.
2. Ljungström mode – the Ljungström can be by-passed, both in comburent and in the flue gas sides, in order to study the influence of this equipment in the air-in leakage into the system. Hence it can be set in three modes:
 - a. completely by – passed;
 - b. completely in service, with flue gas in both the hot and the cold side;
 - c. partially by-passed with air in the cold side and the flue gases in the hot side .
3. Oxygen injection – there is the option of having oxygen in the primary gas, injecting it in primary duct of the burner (the O₂ pipeline and storage tank are indicated with the blue line in Figure 2; see also chapter 0). Changing the injection point of the oxygen is useful to study the influence of this parameter on flame stability and NO_x emissions, which is one of the major issues about the design of oxy-burners.

Downstream the plant, a condensing heat exchanger is installed (Figure 3 and Figure 4). Its purpose is to capture the water vapour produced in the combustion before the flue gases are sent back into the furnace. In this unit there is a system to neutralize the pH of the condensate, which is expected to be very low due to the solubilisation of the SO₂ present in the recycled flue gas that in water transforms in H₂SO₄. The neutralisation system uses a solution of NaOH and it is regulated by measuring the pH of the condensate. The flue gas circulates inside the pipes of the heat exchanger and the condensate is collected at the opposite side.

A cryogenic tank of 30 m³ is used to fulfil the need of a continuous feeding of pure oxygen. The tank and the evaporator, for the gasification of the liquid oxygen, were designed to allow a mass flow rate of, at least, 1000 kg/hr of O₂.

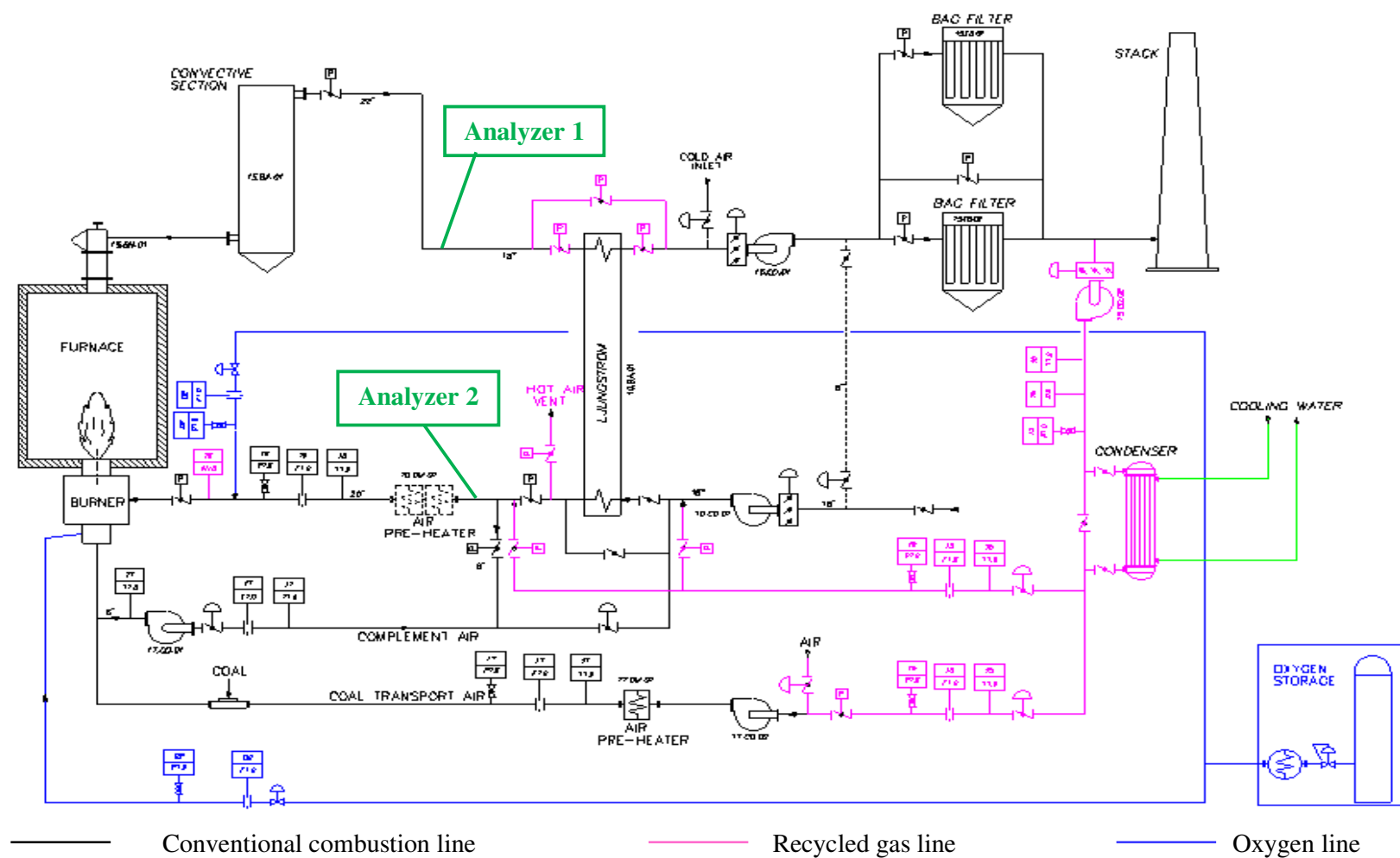


Figure 2 FOSPER plant scheme

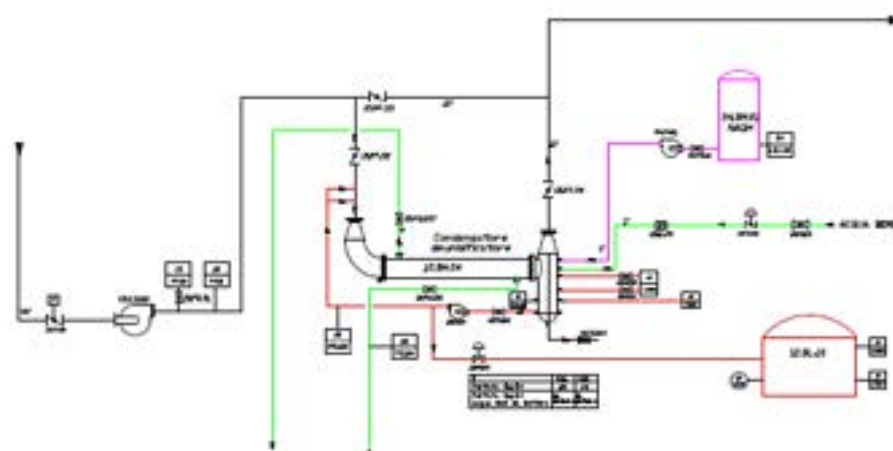


Figure 3 Flow sheet of the recycled flue gas condensation system



Figure 4 Condenser and neutralization system



Figure 5 Refill of the oxygen storage tank

During the experimental campaign, the dry composition of the gas at the entrance and at the exit of the furnace was continuously monitored with two gas analyzers. The characteristics of these instruments are listed in Table 3.

In absence of air in-leakage into the system it is expected that the two instrumentations give the same results. Any difference in the O_2 or CO_2 concentration is therefore indicative of some infiltration of air in any point of the plant between the positions of the two analyzers shown in Figure 2.

Gas analyzed	Analyzer 1			Analyzer 2		
	Analysers model	Measurement unit	Analysis technique	Analysers model	Measurement unit	Analysis technique
O₂	Siemens Oxymat	% vol. dry	Paramagnetic	Siemens Oxymat	% vol. dry	Paramagnetic
CO₂	Siemens Ultramat 6E	% vol. dry	NDIR	Siemens Ultramat 5E	% vol. dry	NDIR
NO_x	Siemens Ultramat 6E	ppm dry	NDIR	Siemens Ultramat 5E	ppm dry	NDIR
CO	Siemens Ultramat 6E	ppm dry	NDIR	Siemens Ultramat 5E	ppm dry	NDIR

Table 1 Characteristics of the gas analyzers in the plant

Recycle ratio

The mass fraction of recycled flue gas is referred to as the recycle ratio and is written as

$$R = \frac{F_{RFG}}{F_{RFG} + F_{chim}}$$

where the total combustion chamber mass throughput is the sum of the recycled flue gas (F_{RFG}) and the product flue gas (F_{chim}) that goes to the chimney.

Since in the FOSPER plant there is no measurement of the flowrate of the gas that goes to the chimney, during the trials it was used an *operative recycle ratio*, defined as:

$$R_{op} = \frac{F_{RFG}}{F_{RFG} + F_{in}}$$

where F_{in} is defined by $F_{in} = F_{oxy} + F_{fuel}$, F_{oxy} = input oxygen flow rate, F_{fuel} = input NG flow rate.

Since the total mass entering and exiting from the system must be constant then:

$$F_{chim} = F_{in} + F_{leak} - F_{cond}$$

where F_{leak} = air in-leakage flow rate , F_{cond} = Water condensed in the condenser.

Hence the two values of the recycle ratio diverge in the presence of a high air in-leakage flow rate.

The furnace

The trials have been carried out in the furnace called FOSPER (Figure 6) that is a replica of the former IFRF Furnace #1. This furnace has an internal square cross-section of 2 x 2 m and

is approximately 6.25 m long. The furnace is constructed of 11 independently water-cooled refractory-lined sections.

Inside the combustion chamber there are 8 cooling loops with double spire and 5 cooling pipes. A further cooling of the furnace is provided by a water jacket at the outer side of the refractory layer. A scheme of the distribution of the cooling loops is showed in Figure 6.

During the oxy-combustion in-flame measurements the furnace is kept in over pressure in order to avoid air in-leakage in the combustion chamber. In such condition the probability of having flames coming out of the ports is very high. To prevent risks for the operators at the moment of the insertion of the probe, the measurements ports have been equipped with a special sealing air system.

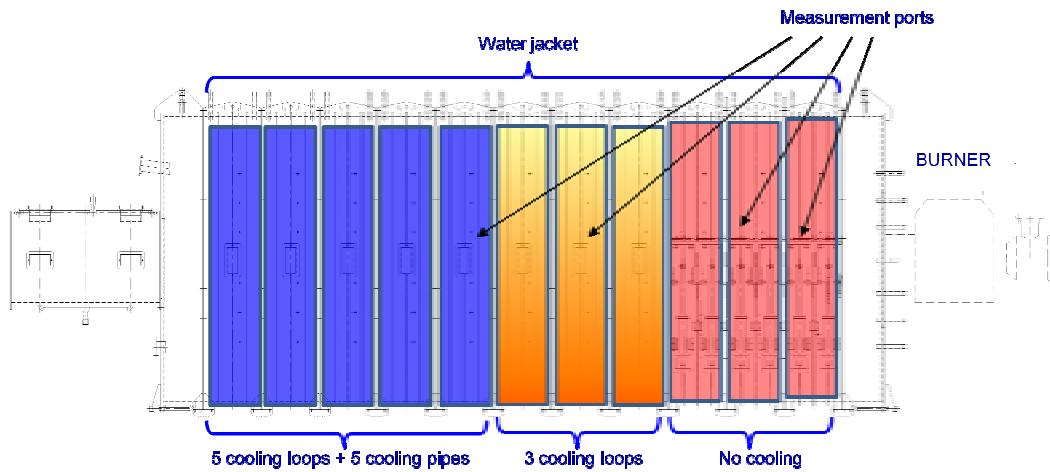


Figure 6 FOSPER furnace scheme

Port	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Distance from the burner (mm)	170	460	750	1040	1330	1620	2070	2660	3250	3840	4430	5020	5610	6200

Table 2 Port distance from the burner

The cooling water flowrate and temperature for each section and loop is continuously monitored in order to determine the total heat extraction from the furnace. The probes can be inserted inside the furnace through the 14 ports on its side. The axial position of each window is shown in Table 2.

The burner

The burner, used in this experimental campaign, is the ENEL TEA-C burner, shown in Figure 14. This is a low-NOX burner that can fire gas, oil or coal. In the TEA-C Burner prototype air feeding is done by a wind-box with a vertical entrance, the air goes through two separate ducts called secondary and tertiary both having an axial movable swirler and a damper that

controls the flow rate distribution. In the centre of the burner there is a primary duct, with an internal axial swirler, through which flows the air/coal two-phase mixture. This air flow rate is maintained active even if the burner is using natural gas as fuel. Located at combustion chamber side of the primary duct, a nozzle makes the separation between coal rich and lean jets in order to enhance the De-NO_x effect of the burner. For natural gas combustion, 8 lances inject the fuel in correspondence with the entrance of the combustion chamber. The nozzle of each lance has two holes with an axis which forms a 45 degrees angle with the burner axis. The secondary and tertiary air ducts have an independent swirler. A scheme of the swirler is shown in Figure 15. Two different sets of inclined palettes produce the swirling of the air with two different angles: the secondary air palettes are inclined at 45° and the tertiary air palettes are inclined at 30°. These sets of palettes are independently movable along the axis of the burner and their position determines the intensity of the swirling: the swirl is higher when the palettes are closer to the exit of the burner.



Figure 7: TEA-C burner.

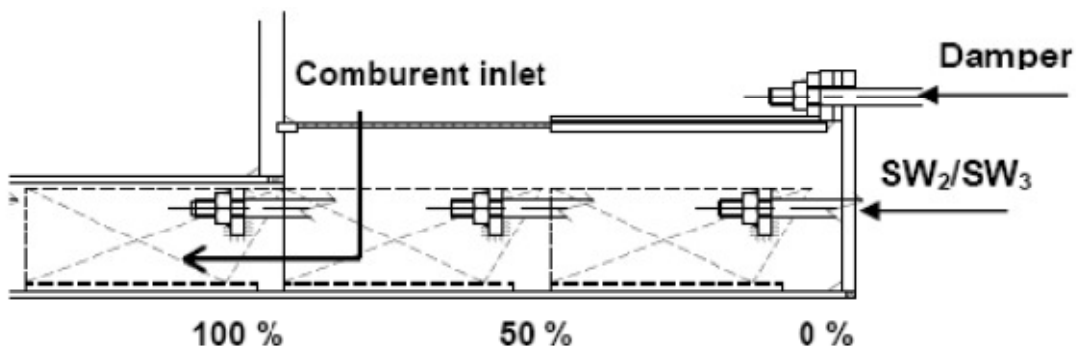


Figure 8: Swirler position diagram.

In oxy combustion the RFG enters in the primary and secondary/tertiary ducts. The pure oxygen can enter in the secondary and tertiary ducts or through a central lance. (During the

trials of this campaign the oxygen has been injected only in the secondary/tertiary stream). The scheme of the burner configuration in conventional and oxy with RFG combustion is shown in Figure 16

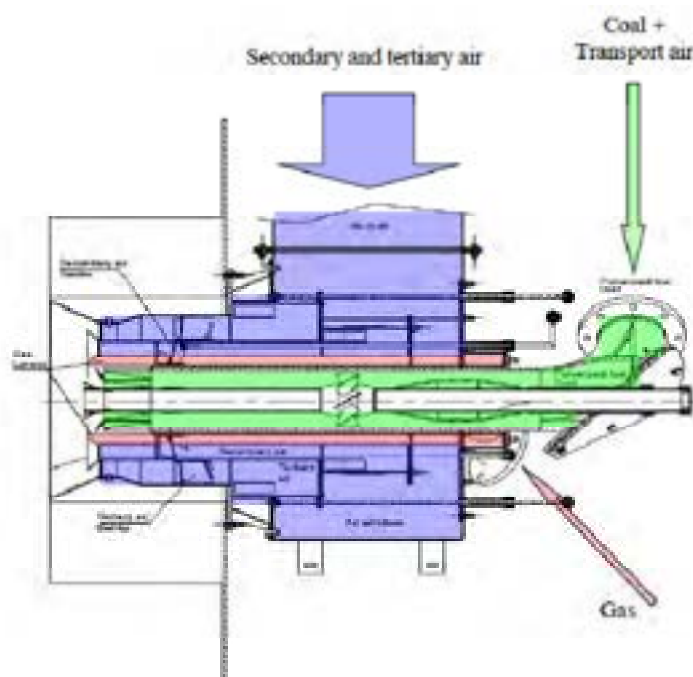


Figure 9: TEA-C in air combustion.

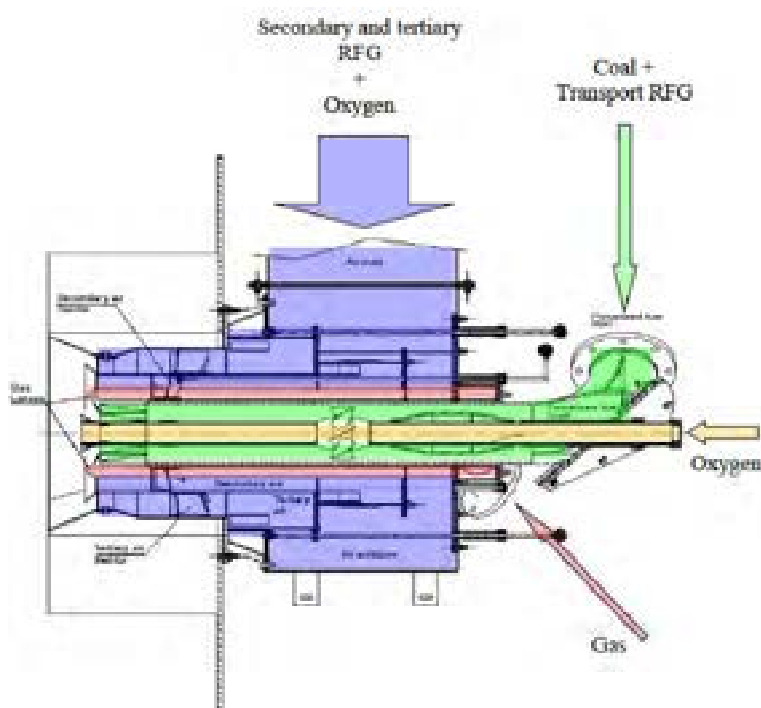


Figure 10: TEA-C in oxy combustion.

Measurement probes

The probes used in this campaign were:

- the IFRF total heat flux meter
- the IFRF ellipsoidal radiometer
- the IFRF quartz tip sampling probe.

These instruments were inserted into the measurements windows at different depths in order to draw a profile of the behaviour of the different physical quantities inside the furnace.

Gas sampling

In the gas combustion trials, the chemical composition inside the furnace was measured sampling the gases from the combustion chamber with a water cooled probe and then flowing the gases to the analysers.

A scheme of the IFRF quartz tip sampling probe is shown in Figure 11. This probe is composed by four concentric tube. The two external tubes form the water jacket needed for the cooling. The third tube contains the electrical heater for the thermal regulation. The innermost tube is where the sampled gases go through, the first 50cm of the tube is made in quartz. The quartz is necessary to avoid the reaction between the chemical species into the gases and the stainless tube as long as the gases are still hot (see [2]). For a representative sampling the gas temperature must decrease under 300°C within 3 ms to stop the chemical reactions (see [1]). After this quenching the gas temperature is kept over 180°C to avoid condensation. Several thermocouples are used to monitor the gas temperature inside the probe.

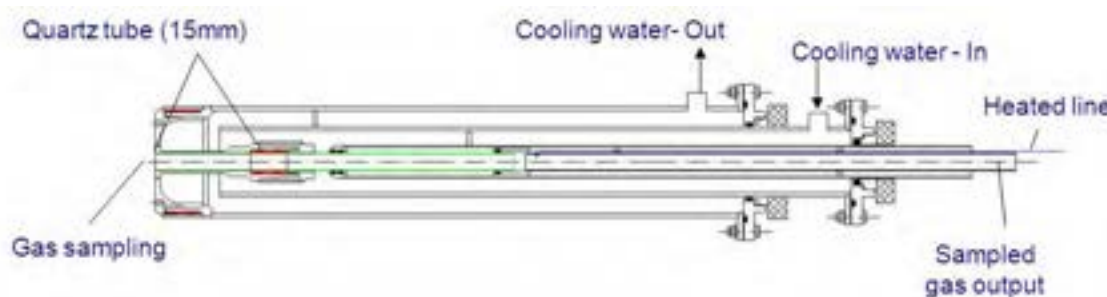


Figure 11 Quartz tip probe

The gases sampled in the flame are drawn into a hot filter and then, through a heated line, to the analyzing system. Two kind of analyzing system were used during the campaign. The flue gas stream was divided in two part, the first went to ENEL analyzer and the second went to IFRF FTIR analyzer. With the ENEL analyzer the concentrations of the CO, CO₂, NO, are

measured with infrared analysis and the O₂ concentration with paramagnetic analyser. The analysers used are listed in Table 3.

Gas analyzed	Analysers model	Measurement unit	Analysis technique
O ₂	ABB EL 3020	% vol. dry	Paramagnetic
CO ₂	Siemens Ultramat 5E	% vol. dry	NDIR
NO _x	ABB EL 3020	mg/Nm ³ dry	NDIR
CO	ABB EL 3020	ppm dry	NDIR

Table 3 Characteristics of the analyzer used for in-flame measurements

The accuracy of the analyzers is normally below 1ppm but the total error of the data is conditioned also by the method of sampling. IFRF error studies carried out with this probe show that there are three main family of source of error:

- Error due the sampling;
- Error due the analyzer;
- Statistical error.

The uncertainties due the analyzer are very low so they can be neglected. Statistical error is calculated with the analysis of the trend of the concentration during the measures. The average relative error is lower than 1% with some peaks at 4%. A study about experimental errors introduced with different sampling techniques is currently ongoing at the IFRF.

Heat flux meter

The IFRF heat flux meter is designed to measure the total heat transfer (conduction + convection + radiation) from the combusting flow to its front surface. The principle of the total heat flux probe is based on the measurement of the temperature gradient through a steel plug of know thermal conductivity mounted at the tip of the probe. The total heat flux meter consist of a central stainless steel plug surrounded by two guard rings of the same material, cooled at the inside the plug and separated by a know distance are used to measure the axial temperature gradient within the plug. The conductive flux through the plug is proportional to the time needed to reach steady state condition. The proportionally constant can be determined by calibration of the total heat flux meter in a blackbody furnace.

Figure 12 shows the relative error in the heat flux measurements evaluated during the calibration of the probe.

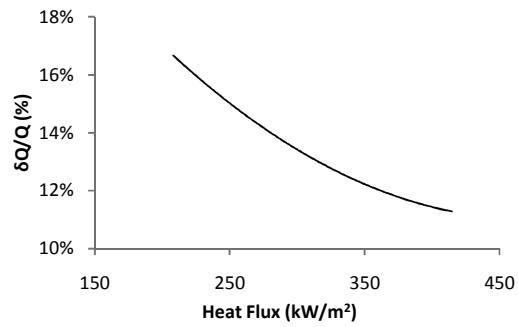


Figure 12 Relative error of the total heat flux

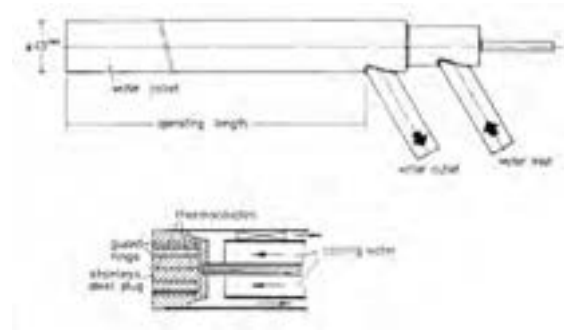


Figure 13 Total heat flux meter

Ellipsoidal radiometer

The ellipsoidal radiometer is used to measure the total radiative flux incoming from the medium facing the tip of the radiometer.

The instrument consists of a water cooled ellipsoidal cavity having an aperture at one focus and a thermopile at the other.

The ellipsoidal cavity has the optical property of focusing all the radiation entering the orifice onto the surface of the thermopile. In order to minimize the radiation loss by absorption at the surface of the ellipsoidal, the latter is plated with a gold layer.

The thermopile is a heat flow plug of stainless steel with two thermocouple junctions at each end (constantan wire) which produces an e.m.f. proportional to the energy absorbed at the pellet.

A protective ZnSe window is mounted in the ellipsoidal cavity to avoid damage to the thermopile and convection errors.

A purge flow of dry nitrogen (circa 60 l/h) is injected on the orifice side of the window in order to protect the mirror from combustion gases.

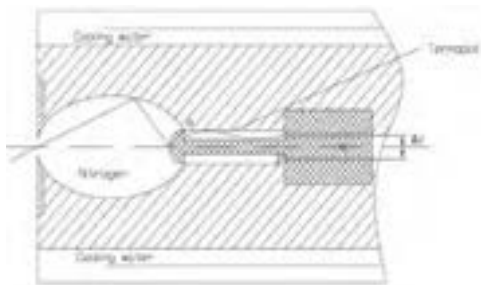


Figure 14 Ellipsoidal radiometer tip

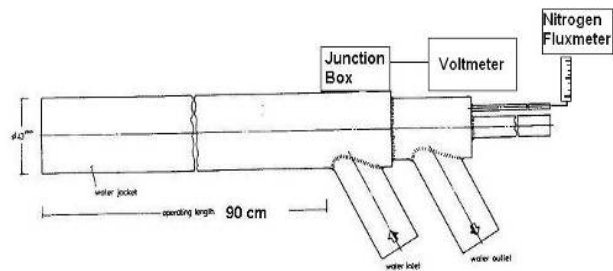


Figure 15 Scheme of the ellipsoidal radiometer

System of optical analysis of flame fluctuations

IFRF is actually setting up a research programme with ENEA to test and develop the application of the ENEA ODC (Optical Diagnostic of Combustion) system [8] to semi-industrial scale flames. The ODC is based on photodiodes, resolving up to 10 MHz and over. The whole emission spectrum is sampled (within the sensor spectral response) and no filter is posed in front of the photodiode. This technique is on-line, very economic and absolutely not intrusive because it needs only a hole to introduce an optic fibre. The ODC system consists of a photodiode, a computer that performs data analysis, a DAQ and a charge amplifier. The photodiode samples the radiant energy or chemiluminescence emitted by the flame.

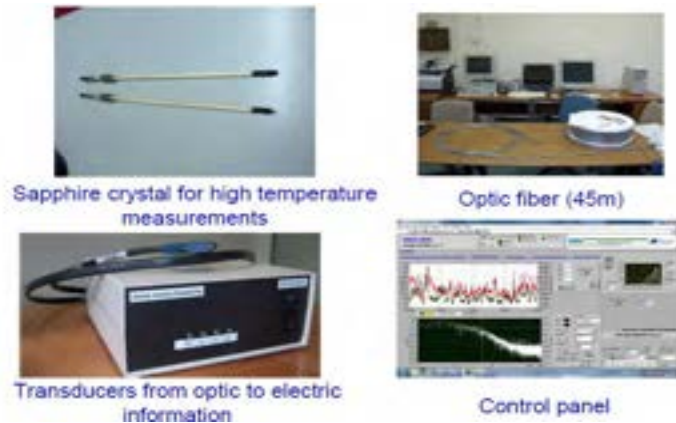


Figure 16 ODC System

The programme, started in June 2010, a water cooled jacket was designed and manufactured to protect the optic fibre from the heat of the combustion environment. At the tip of the fibre a sapphire crystal is placed to capture the light radiation with low absorption in the visible, UV and Infrared ranges. In addition the crystal can stand very high temperatures. The probes was already tested both in a small furnace (Isothermal Plug Flow Reactor) both in air and oxy-fuel conditions, and in the 3 MW furnace (Fo.Sper.- Furnace #1) on oxy-gas and oxy-coal conditions.

During this campaign four probes were used and their signals were collected contemporaneously by the transducer. The position of the probes in the furnace walls is shown in Figure 17. Three probes had a perpendicular view of the flame respect the axis of the furnace and the fourth had a view from the rear pointed in the direction of the burner.

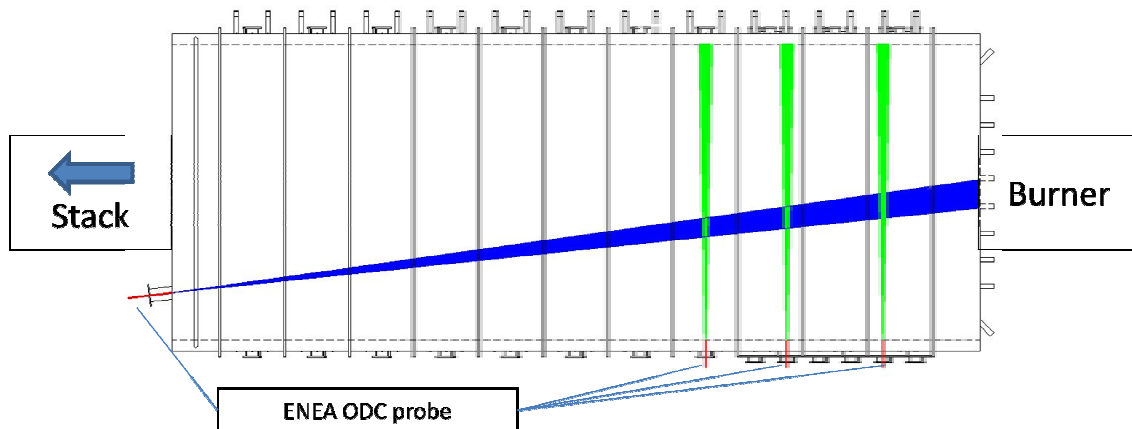


Figure 17 Points of view of the ODC probes

Fuel

These trials were carried out with NG. The composition of the natural gas was not measured; as a reference in Table 4 are listed previous measurements of the NG composition carried out few months earlier.

	Analysis	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	Average
CH ₄	%vol	93.45	87.98	87.36	85.84	86.64	87.81	89.09	88.31
C ₂ H ₆	%vol	4.26	8.16	8.53	8.41	7.91	8.06	7.29	7.52
C ₃ H ₈	%vol	0.97	1.77	2.22	2.22	2.16	1.54	1.59	1.78
C ₄ H ₁₀	%vol	0.26	0.40	0.17	0.83	0.74	0.20	0.41	0.43
C ₅ H ₁₂	%vol	0.17	0.22	0.00	0.80	0.76	0.16	0.41	0.36
C ₆ H ₁₄ +	%vol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H ₂	%vol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H ₂ O	%vol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
N ₂	%vol	0.35	0.46	0.61	0.73	0.69	0.51	0.75	0.59
CO ₂	%vol	0.55	1.01	1.10	1.17	1.10	1.72	0.47	1.02
CO	%vol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Density	kg/Nm ³	0.774	0.819	0.820	0.853	0.845	0.820	0.811	0.820

Table 4 Natural gas composition

Assuming the composition of the gas the average values, the LHV of the gas is 47.8 MJ/kg.

Measurement campaign

Programme

The programme of this one-day trial was the following:

1) Conventional combustion NG-air

a) Flame settings investigation

The stoichiometric condition of the flame was changed in order to investigate the NO_x emission in each setting. For each flue gas oxygen level chosen the following measurements were carried out:

- i) ODC measurements
- ii) Flue gas composition measurement at the end of the convective section
- iii) Flue gas composition measurement at the exit of the furnace with IFRF analysers
- iv) Flue gas composition measurement at the exit of the furnace with ENEL analysers

b) Heat fluxes measurements.

In the baseline settings the following measurement of the heat fluxes hitting the wall of the furnace were undertaken:

- i) Total heat Flux measurements
- ii) Radiative heat flux measurements

2) NG combustion with pure oxygen and recycled flue gas

a) Flame settings investigation

The stoichiometric condition of the flame was changed in order to investigate the NO_x emission in each setting. For each flue gas oxygen level chosen the following measurements were carried out:

- i) ODC measurements
- ii) Flue gas composition measurement at the end of the convective section
- iii) Flue gas composition measurement at the exit of the furnace with IFRF analysers
- iv) Flue gas composition measurement at the exit of the furnace with ENEL analysers
- v) Particulate analysis of the gas sampled at the exit of the furnace with ENEA analysers

b) Heat fluxes measurements. In the baseline settings the following measurement of the heat fluxes hitting the wall of the furnace were undertaken:

- i) Total heat Flux measurements
- ii) Radiative heat flux measurements

Input output conditions

In Table 5 and Table 6 are listed the input-output condition of the burner and the furnace in each setting tested.

Unfortunately the pure oxygen flowrate in the oxy-combustion tests was not measured because the flowmeter had a malfunction that wasn't possible to fix during the tests.

<i>NATURAL GAS-AIR</i>				
<i>INPUT CONDITIONS</i>				
	M. U.	Base	NO/O ₂ tests settings	
Natural gas flowrate	Nm ³ /h	268	261	267
NG temperature	°C	21	30	27
Coal flowrate				
Primary air	kg/h	530	504	523
Primary air temperature	°C	92	98	97
Sec/tert air	kg/h	2900	2843	3300
Sec/tert air temperature	°C	197	209	203
Measured internal camera cooling air	Nm ³ /h	133	135	137
Swirler setting		0-100	0-100	0-100
Dumper setting		100-100	100-100	100-100
Fuel thermal input	MWt	2.7	2.7	2.7
<i>OUTPUT CONDITIONS</i>				
Flue gas temperature	°C	890	905	904
O ₂	%	1.8	0.1	3.1
CO	ppm	0	84	10
CO ₂	%	10.3	11.1	9.5
NO _x	ppm	59	50	72

Table 5 Input-Output conditions of the NG-Air trials

<i>NATURAL GAS-OXY</i>					
<i>INPUT CONDITIONS</i>					
	M. U.	NO/O ₂ tests settings			Base
Natural gas flowrate	Nm ³ /h	250	245	244	256
NG temperature	°C	29	29	27	25
Coal flowrate		-	-	-	-
Primary air		-	-	-	-
Primary air temperature		-	-	-	-
Sec/tert air		-	-	-	-
Sec/tert air temperature		-	-	-	-
Measured internal camera cooling air	Nm ³ /h	120	119	119	125
Oxygen	kg/h	-	-	-	-
Oxygen temperature	°C	25	25	25	25
Primary RFG	kg/h	618	602	607	653
Primary RFG temperature	°C	95	96	92	65
Sec/tert RFG	kg/h	1401	1380	1377	1523
Sec/tert RFG temperature	°C	244	244	241	171
Swirler setting		0-100	0-100	0-100	0-100
Dumper setting		100-100	100-100	100-100	100-100
Recycle ratio					
Fuel thermal input	MWt	2.4	2.4	2.4	
<i>OUTPUT CONDITIONS</i>					
Flue gas temperature	°C	848	848	844	835
O ₂	%	0.3	2.3	6.2	5.1
CO	ppm	7	8	27	0
CO ₂	%	60.5	59.1	57	55
NO _x	ppm	127	158	275	238

Table 6 Input-Output conditions of the NG-Oxy trials

NO_x emission performance

In the Figure 18 are shown the NO_x emissions in each stoichiometric setting of the burner. Unfortunately it is not possible to perform a normalization in mg/MJ of the NO_x concentration because the total volume of the input gas and hence of the output one is unknown.

In Figure 19 a comparison with the same data measured in the friendly coal campaign is shown. The data are quite similar and this indicates a good reproducibility of the results.

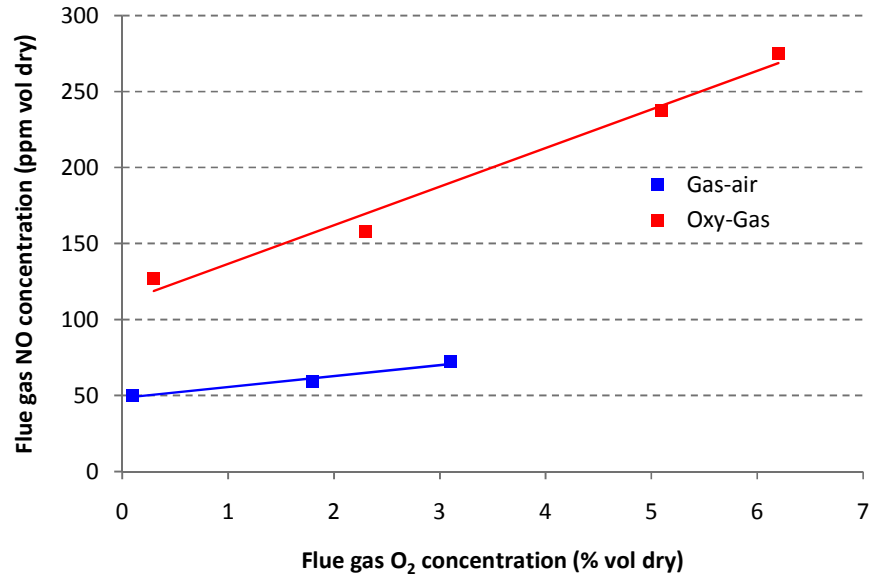


Figure 18 NO_x emissions at different O₂ level in the flue gases

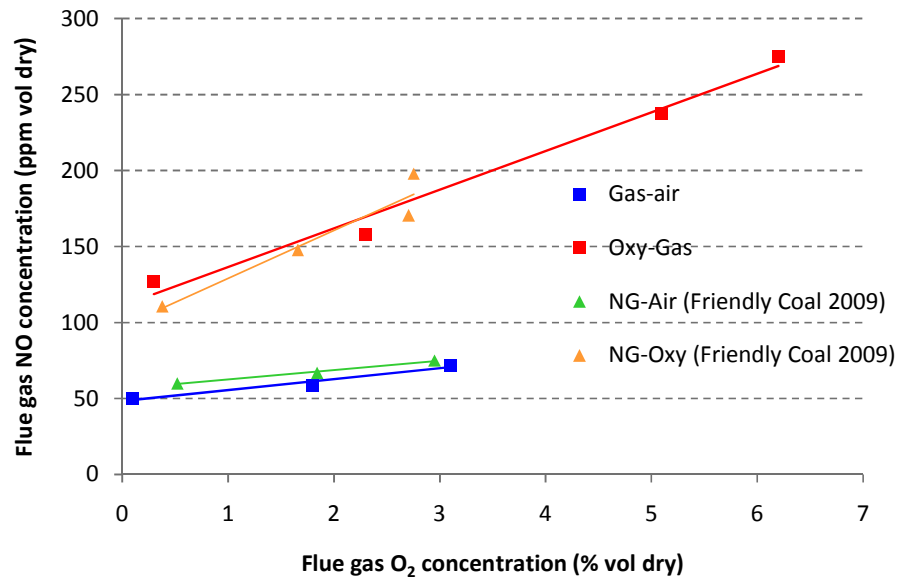


Figure 19 NO_x emissions comparison with previous measurements

Flue gas analysis

The gas at the exit of the furnace was sampled with the IFRF quartz tip probe. The gas sampled was sent to the FTIR analyser and subsequently to the ENEA particulate analyser. In this chapter the results of FTIR analysis of the gas will be shown. The sampling point was in the 14th port (~6.2 meters from the burner throat) at the centre of the furnace, on the axis.

Flame condition (flu gas O ₂)	NG-Air O ₂ =3.4%		NG-Air O ₂ =0.2%		NG-Oxy O ₂ =2.3%		NG-Oxy O ₂ =0.2%		NG-Oxy O ₂ =6.2%	
Test Nr.	1		2		3		4		5	
	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry
H ₂ O (% vol)	14.08	-	12.28	-	28.97	-	27.69	-	29.11	-
CO ₂ (% vol)	5.08	5.91	5.28	6.02	44.75	63.00	44.51	61.55	43.96	62.01
CO (% vol)	0.00	0.00	0.11	0.13	0.01	0.01	2.00	2.77	0.01	0.01
N ₂ O (ppm)	0.27	0.31	0.49	0.56	0.00	0.00	3.01	4.16	0.00	0.00
NO (ppm)	34.75	40.44	19.64	22.39	128.68	181.16	70.69	97.76	283.83	400.38
NO ₂ (ppm)	2.02	2.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO ₂ (ppm)	8.60	10.01	16.66	18.99	14.63	20.60	54.62	75.54	14.72	20.76
NH ₃ (ppm)	0.88	1.02	0.55	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCN (ppm)	0.03	0.03	6.12	6.98	0.00	0.00	3.72	5.14	0.00	0.00
Acetone (ppm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Formaldehyde (ppm)	0.00	0.00	0.00	0.00	4.51	6.35	0.00	0.00	6.83	9.63
Ethane (ppm)	1.24	1.44	2.85	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Propane (ppm)	2.81	3.27	0.72	0.82	2.33	3.28	7.29	10.08	2.94	4.15

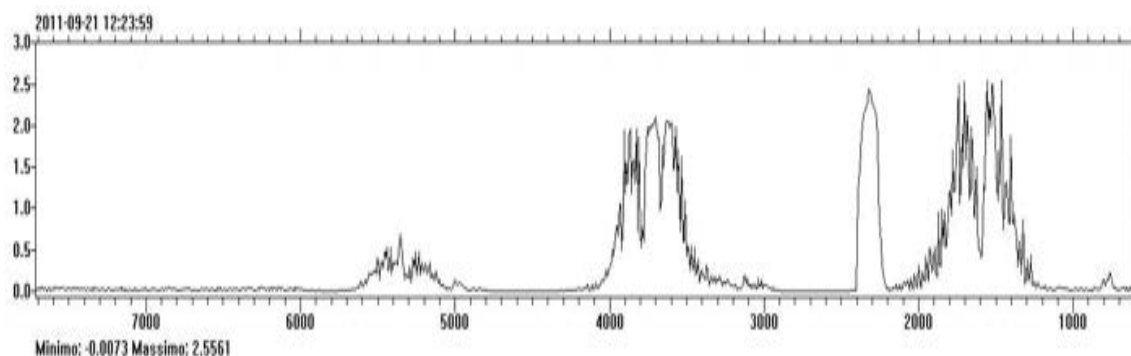


Figure 20: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 1

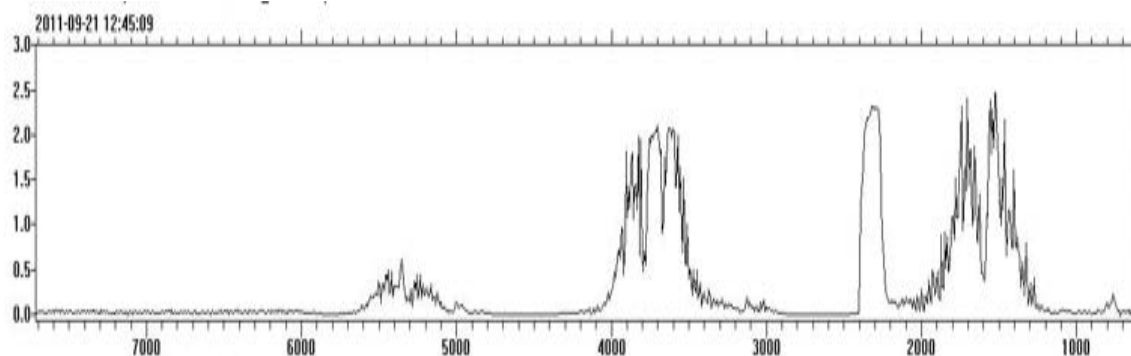


Figure 21: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 2

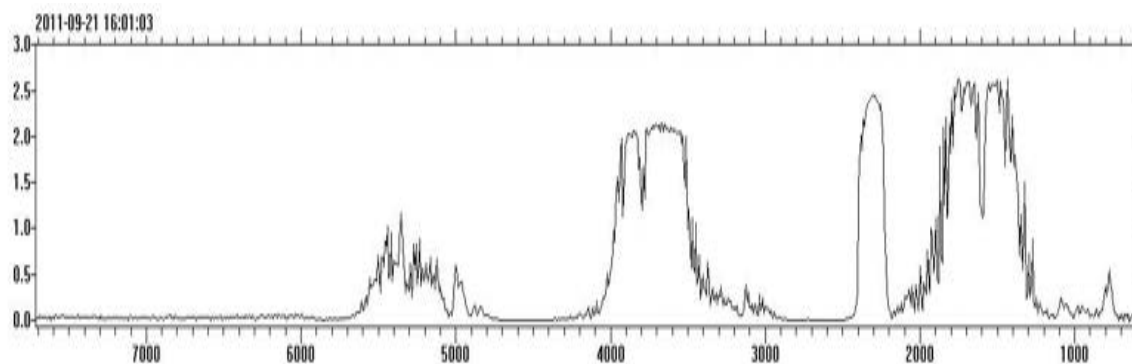


Figure 22: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 3

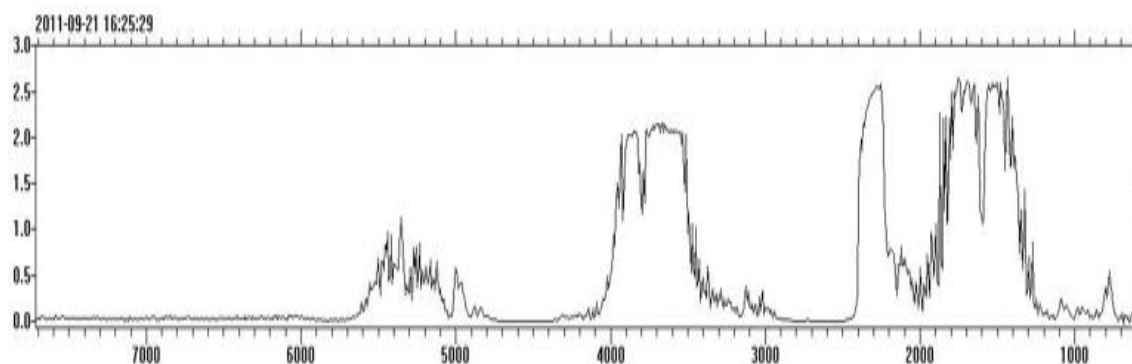


Figure 23: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 4

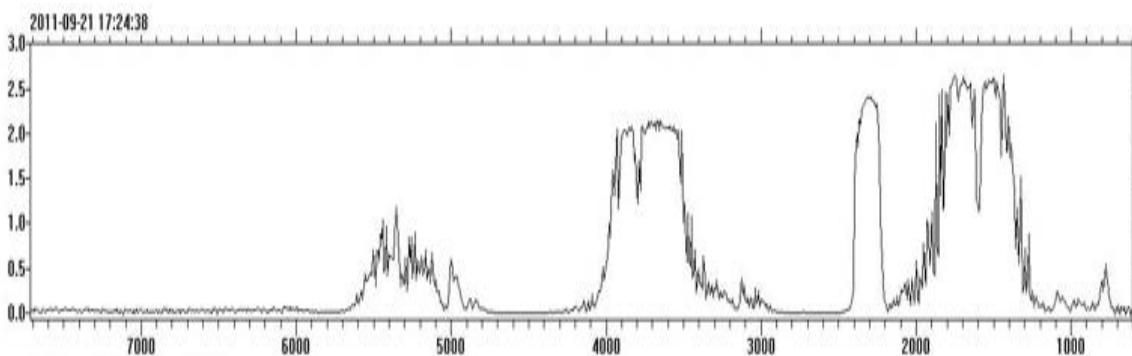
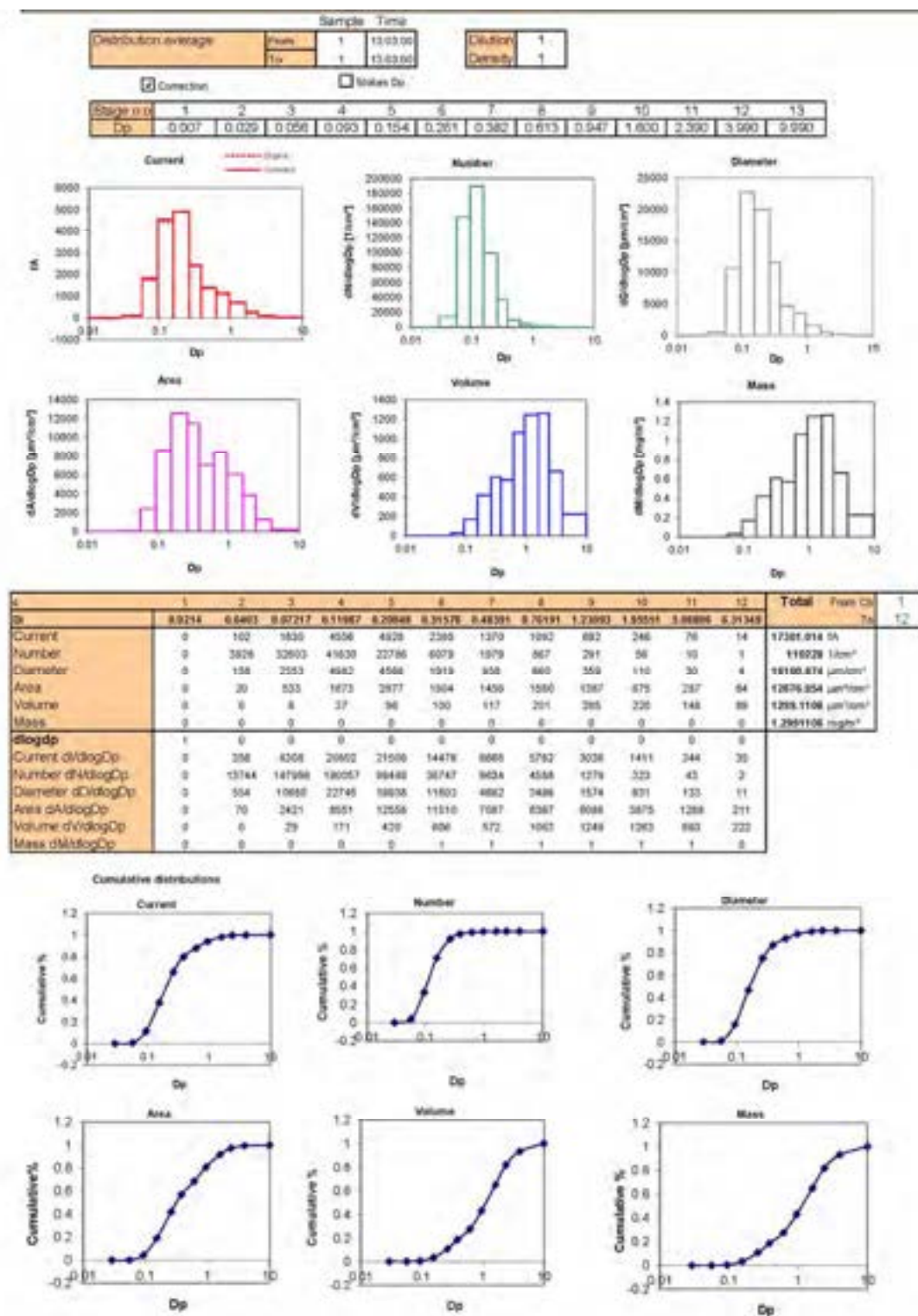


Figure 24: FTIR spectrum of the gas sampled at the exit of the furnace – Test nr. 5

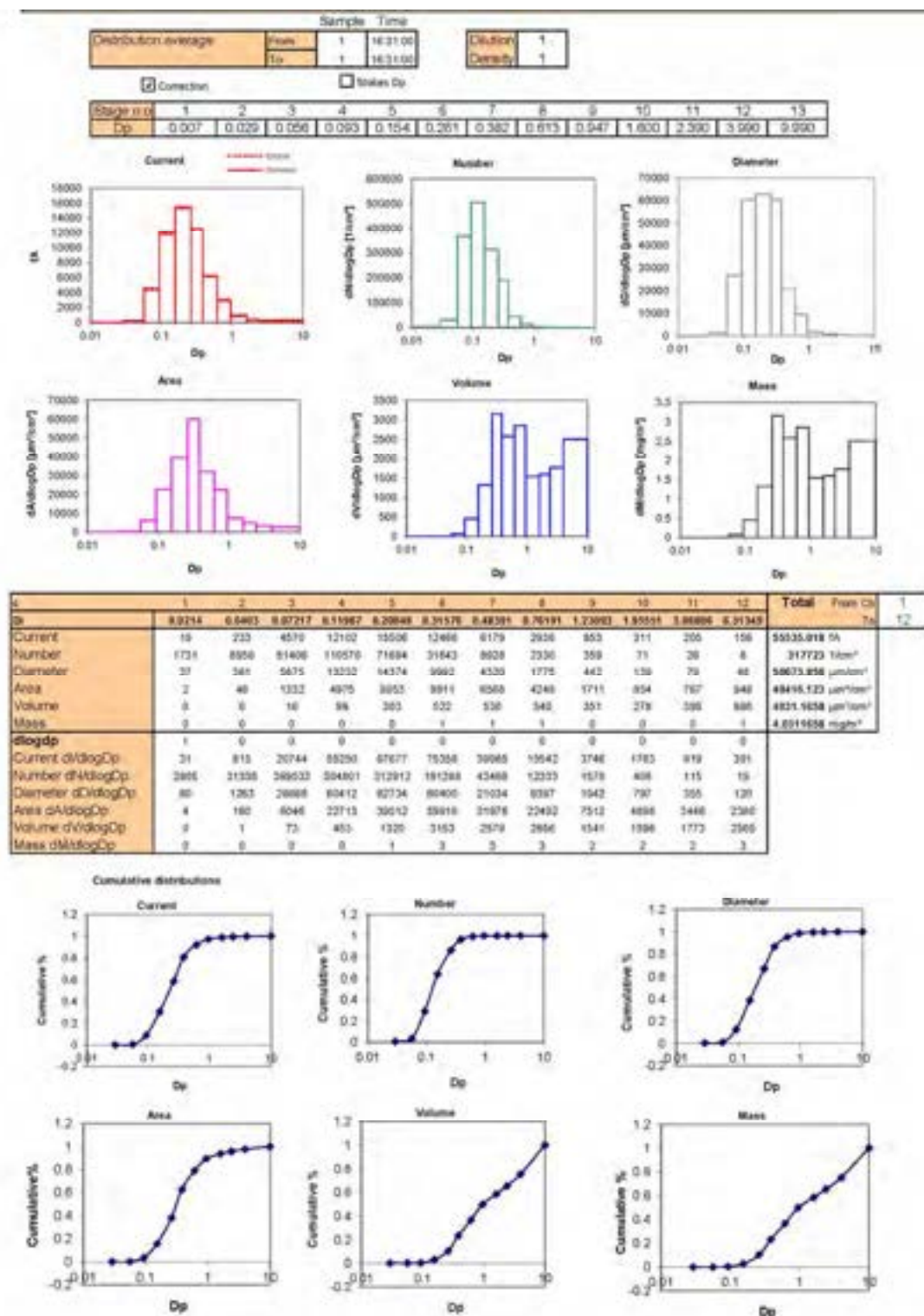
Flue gas particulate analysis

In this chapter the results of the particulate analysis carried out by ENEA will be shown. The gas was sampled from the inside of the furnace with the IFRF quartz tip probe and sent through a heated line to the ENEA ELPI analyser. The sampling point was in the 14th port (~6.2 meters from the burner throat) at the centre of the furnace, on the axis.

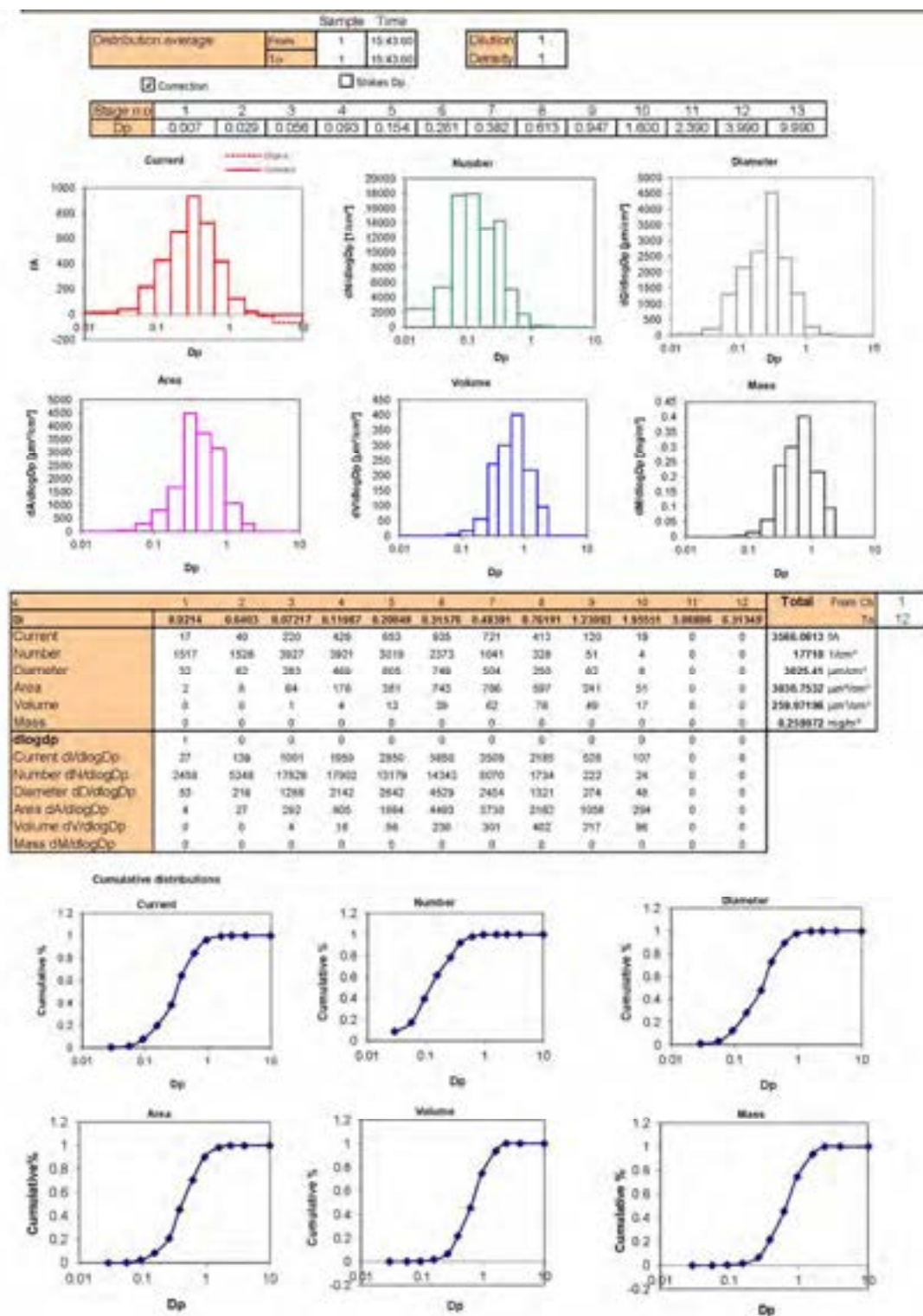
Conventional NG combustion with O2=0.1%



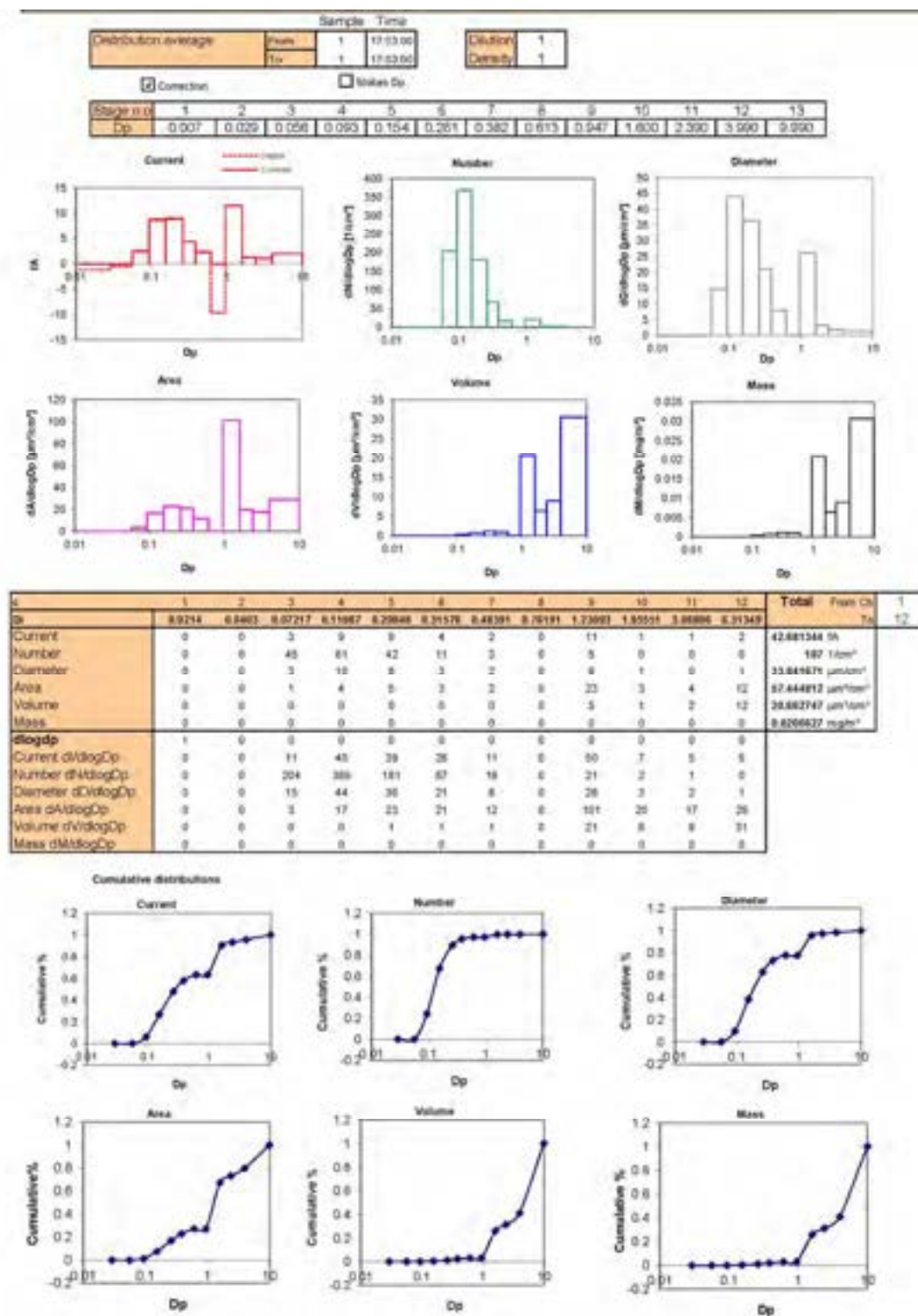
NG-Oxy combustion with O2=0.3



NG-Oxy combustion with O2=2.3



NG-Oxy combustion with O2=6.2



Total heat flux measurements

The heat flux was measured with the total heat flux meter and the ellipsoidal radiometer. Both this instrument were aligned with the internal walls of the furnace so that they measured the total heat flux hitting the walls and the radiative heat flux. The conductive heat flux can be simply calculated by subtracting the two previous quantity.

The comparison between the measurements in oxy combustion and air combustion is shown in the Figure 25.

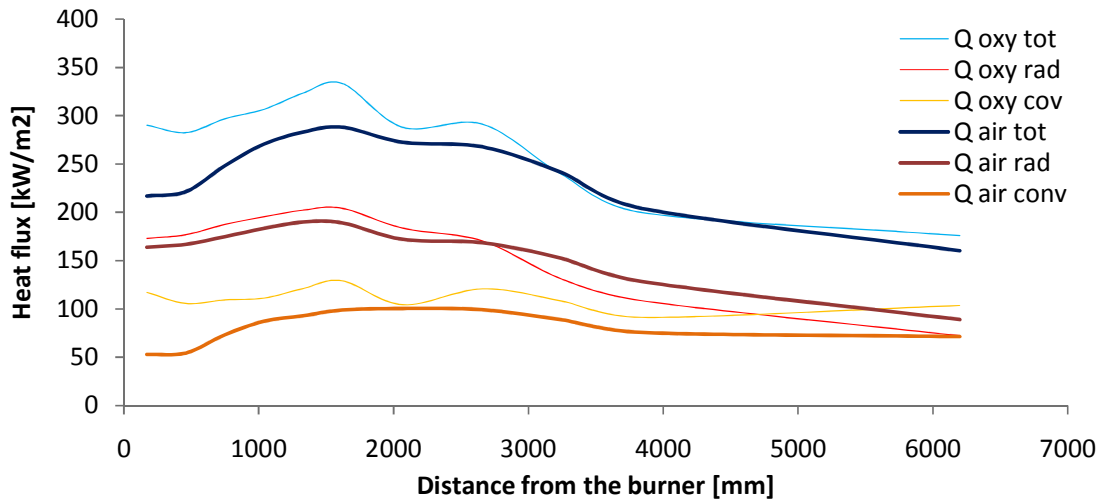


Figure 25 Heat flux comparison

It can be observed that in oxy-combustion conditions the heat fluxes hitting the walls are generally higher than in air combustion.

In the Figure 26 and Figure 27 a comparison between total heat flux measurements made during the Friendly Coal campaign and ODC Test campaign in the same furnace condition.

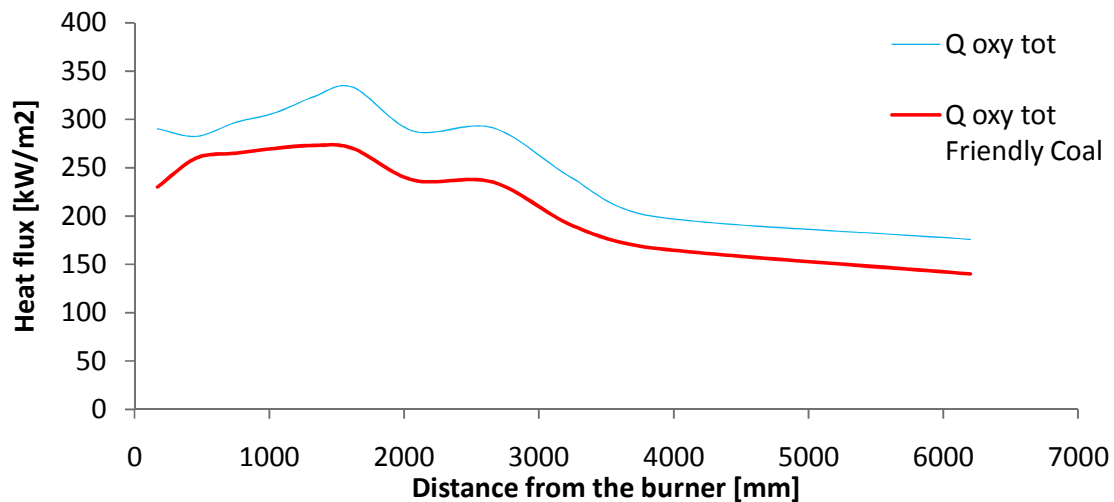


Figure 26: Total heat flux measurements in oxy combustion comparison.

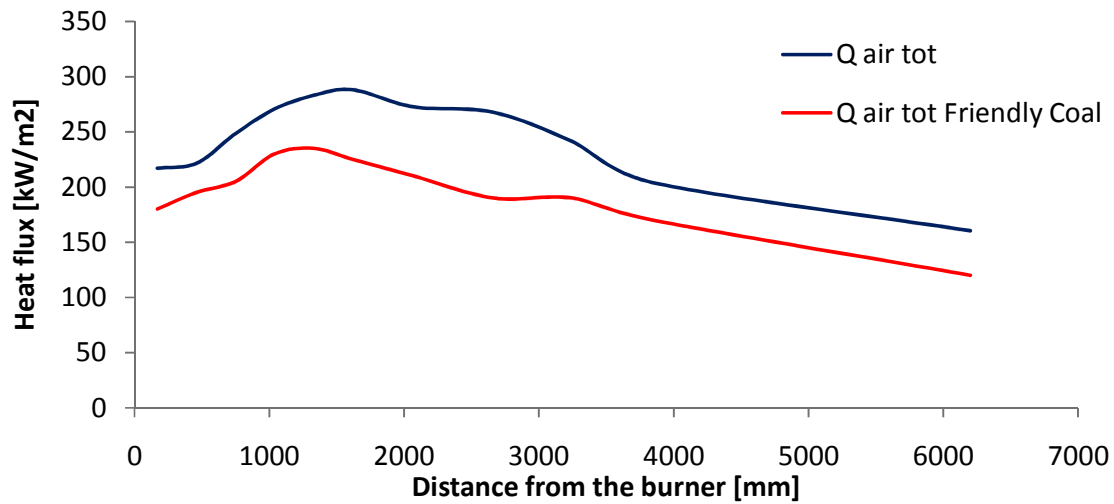


Figure 27: Total heat flux measurements in air combustion comparison.

Inside the walls of the furnace there are two series of thermocouples placed at two different depths inside the refractory layer: 1 cm and 10 cm from the combustion chamber. For comparison purposes in Figure 28 is shown the wall temperature during the two tests in oxy combustion.

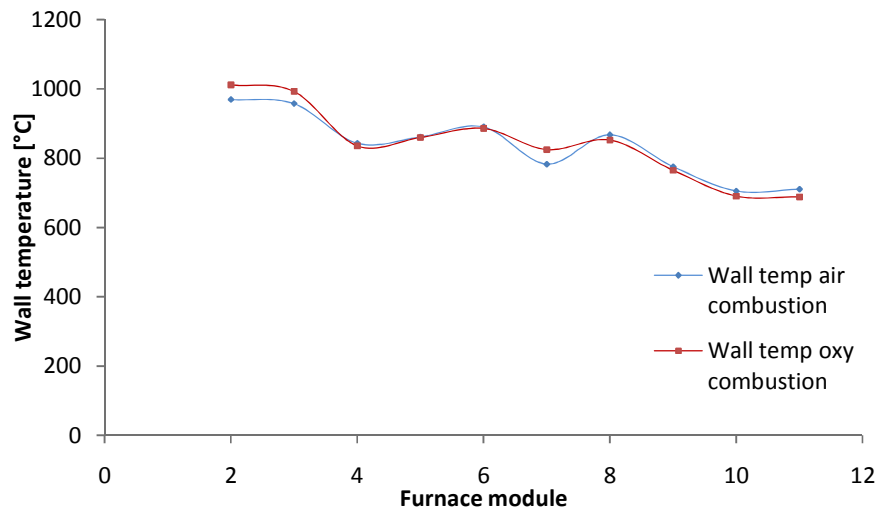


Figure 28 Furnace walls temperature

Conclusions

The measurements taken during the tests show a good reproducibility of the values of the NO_x emission for each oxygen level of the burner compared with the same quantities measured in the trials of the “friendly coal” project.[4].

The flue gases were analyzed with great detail and also the particulate in the flue gases was studied.

The heat flux profiles were fully characterized both in conventional and oxy-gas combustion, the heat fluxes hitting the walls resulted generally higher than the ones in the previous campaign in the same conditions.

Bibliography

1. J.CHEDAILLE, Y. BRAUD, *Measurements in flames, Vol. I*, IFRF, Edward Arnold, 1972.
2. M.P.HEAP, R. WALMSLEY, A. M. HOLYHUYSEN, *The measurement of pollutants in flames and furnaces*, IFRF Doc. No. G 19/a/2, IJmuiden, 1972.
3. N. ROSSI, E. TOSI, D. CUMBO, *Evaluation of the experiments with new 3 MW oxy-coal burner*, D22 Friendly coal project, ENEL, Pisa 2009.
4. G. CORAGGIO, M. LAIOLA, *Combustion of NG and pulverized coal in a mixture of oxygen and RFG*, IFRF Doc. No. F110/y /1, Livorno, 2009.
5. R.H. PERRY, D.W. GREEN, *Perry's Chemical Engineers' Handbook (7th Edition)*, McGraw-Hill, 1997.
6. M. RIVAS, E. CODA ZABETTA, *How do I calculate thermal NO_x formation due to Zeldovich?*, IFRF Combustion Handbook File no.40, www.handbook.ifrf.net, 2003.
7. G. CORAGGIO, L. TOGNOTTI, D. CUMBO, N. ROSSI AND J. BRUNETTI, *Retrofitting oxy-fuel technology in a semi-industrial plant: Flame characteristics and NO_x production from a low NO_x burner fed with natural gas*, Proceedings of the Combustion Institute, 2010.
8. R. BRUSCHI, E. GIACOMAZZI, S. GIAMMARTINI, E. GIULIETTI, F. MANFREDI, C. STRINGOLA, S. DANIELE, *Optical Unsteady Characterization of Turbulent Combustion: Application in an Active Control System*, 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, Arizona, July 2005.

Appendix A. Heat flux data and charts

Air combustion measures.

Port	Distance from the burner (mm)	Q tot (kW/m ²)	Q rad (kW/m ²)	Qconv (kW/m ²)
1	170	216.9	163.9	52.9
2	460	221.3	166.9	54.4
3	750	248.3	174.9	73.3
4	1040	270.6	183.3	87.3
5	1330	282.9	190	92.9
6	1620	287.9	189	98.9
7	2070	272.5	172	100.5
8	2660	267.6	168.4	99.2
9	3250	240.9	152.1	88.8
10	3840	204	128.3	75.7
14	6200	160.2	88.8	71.4

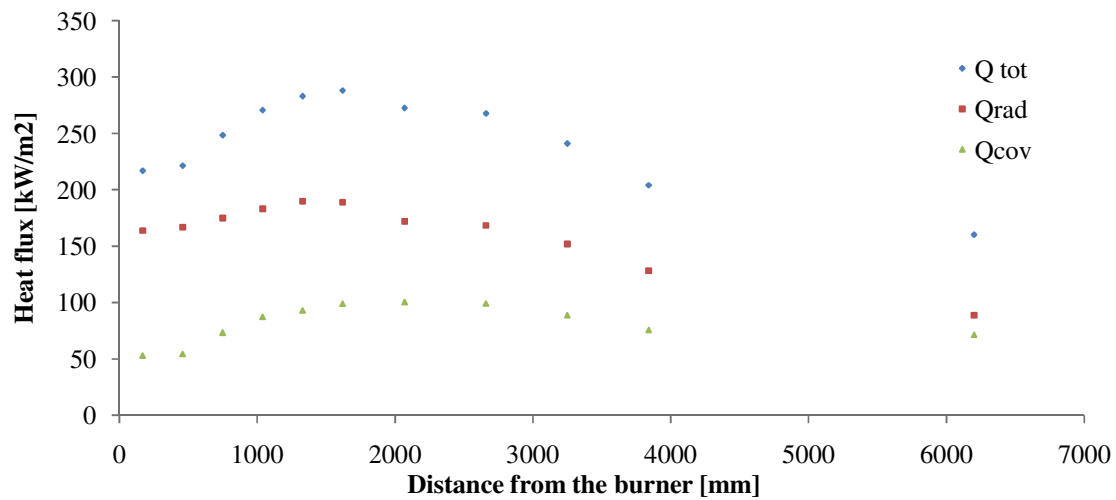


Figure 29 Heat flux profiles in oxy-combustion best setting

Oxy combustion with measurements.

Port	Distance from the burner (mm)	Q tot (kW/m ²)	Q rad (kW/m ²)	Qconv (kW/m ²)
1	170	290.2	173.0	117.2
2	460	282.5	176.8	105.6
3	750	296.9	187.5	109.4
4	1040	306.6	195.4	111.2

5	1330	323.5	202.3	121.2
6	1620	333.3	204.1	129.2
7	2070	287.8	183.5	104.3
8	2660	291.2	170.3	120.8
9	3250	238.9	130.8	108.1
10	3840	199.8	108.5	91.3
14	6200	175.7	72.1	103.6

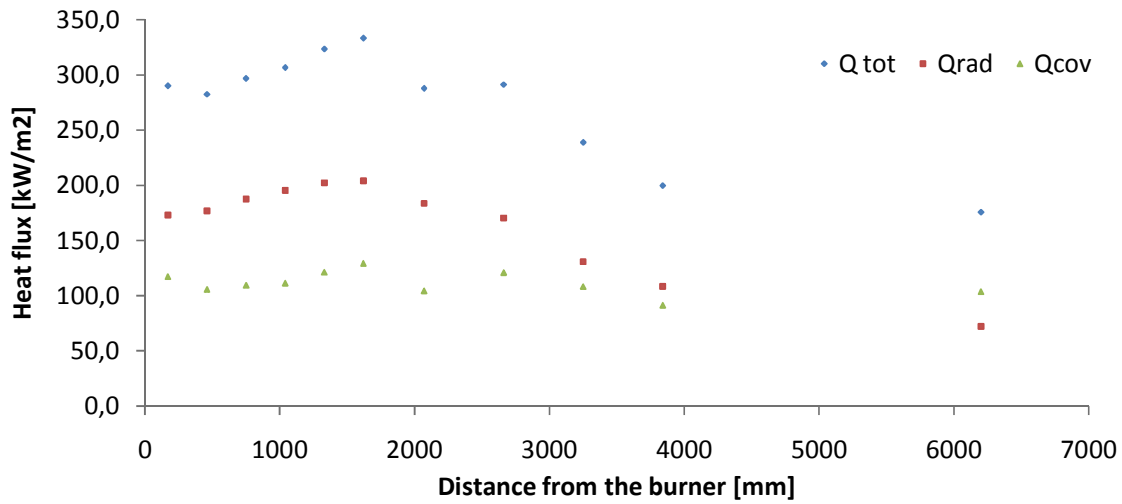


Figure 30 Heat flux profiles in oxy-combustion with diluted NG best setting

Appendix B. Furnace wall temperatures

Furnace module	NG air Baseline	NG-Oxy Baseline
1	-	-
2	969	1012
3	958	993
4	843	835
5	861	859
6	890	886
7	783	825
8	868	852
9	776	765
10	705	690
11	710	688