



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



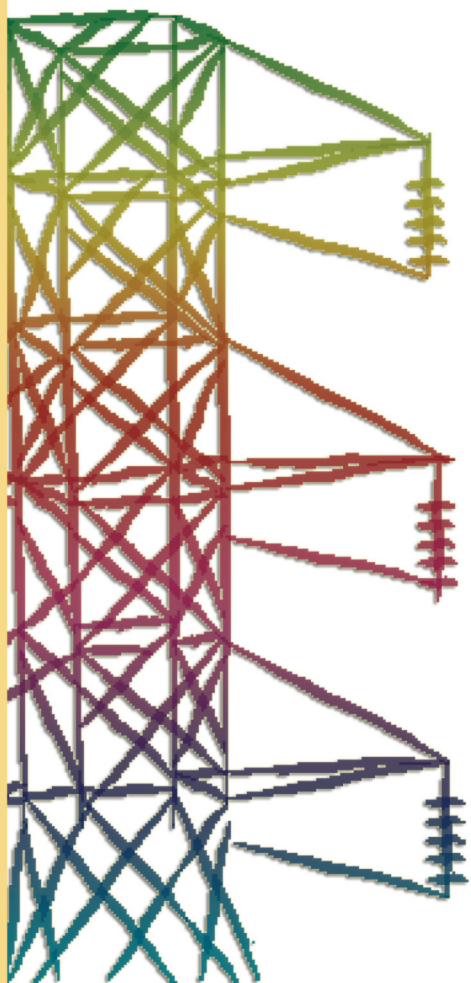
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

**Sviluppo di metodi per il controllo del processo di oxy-combustione di uno slurry di carbone mediante tecnologia ODC**

**R. Bruschi, C. Stringola, S. Giammartini**





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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di metodi per il controllo del processo di oxy-combustione  
di uno slurry di carbone mediante tecnologia ODC

*R. Bruschi, C. Stringola, S. Giammartini*

SVILUPPO DI METODI PER IL CONTROLLO DEL PROCESSO DI OXY-COMBUSTIONE DI UNO  
SLURRY DI CARBONE MEDIANTE TECNOLOGIA ODC

R. Bruschi, C. Stringola, S. Giammartini (ENEA)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

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

Responsabile Tema: Stefano Giammartini, ENEA

## 1. Il Processo ISOTHERM

Il processo di oxy-combustione di uno slurry di carbone, con completa fusione delle ceneri, impone il raggiungimento di un range determinato di temperatura (1600-1700°C) a pressioni di 5 bar e il suo mantenimento costante nel tempo. Il processo quindi, mira a garantire queste condizioni stabilmente nel tempo.

Per conseguire l'omogeneità del profilo termico nel reattore è stato realizzato un processo che approssimi una combustione operante in condizioni MILD.

In questo senso sono state adottate soluzioni che assicurino le condizioni chimico fisiche per la realizzazione di una combustione di volume. Tra queste il preriscaldamento del combustibile e del comburente al di sopra della temperatura di autoignizione è stato realizzato direttamente nel reattore tramite miscelazione con gas caldi in modo da ottenere direttamente in camera di combustione le condizioni di temperatura, pressione, rapporto stechiometrico, necessari all'innesco della reazione.

Modellizzando il processo si hanno tre sottoprocessi fondamentali:

- il preriscaldamento del combustibile e comburente per ottenere le condizioni utili all'innesco della reazione di combustione;
- il processo di combustione;
- il processo di liquefazione delle ceneri e scorificazione.

Il processo di preriscaldamento è cruciale per ottenere la combustione ad elevata temperatura.

Le misure che favoriscono la realizzazione di condizioni MILD di combustione :

- L'utilizzo di ossigeno tecnico
- La Presenza di gas combustibili premiscelati all'ossigeno.
- Il raggiungimento delle condizioni isoterme sulla superficie del reattore.
- L'ottimizzazione della miscelazione tra combustibile e comburente.

L'applicazione di queste misure, e in parte l'osservazione sull'impianto fanno ipotizzare l'esistenza nella prima parte del reattore di una combustione di tipo diffusivo che evolve poi in una combustione ad elevata temperatura. Questa zona, che non si estende oltre il primo terzo del reattore, sarà chiamata nel corso della trattazione *zona di testa*. Nella zona diffusiva sono infatti riscontrabili le criticità addebitabili a questo tipo di processo, come l'elevata turbolenza, apparente casualità del moto, diffusione di tutte le variabili fisiche scalari. La zona in cui è realizzata la combustione ad elevata temperatura, ossia la restante parte del reattore che nel seguito individueremo come *zona di coda*, è caratterizzata da alcuni fattori tipici di questa combustione: profilo termico omogeneo, basse emissioni d'inquinanti, assenza di fluttuazione evidenti di luminosità di fiamma come sarà evidenziato nel seguito in forte opposizione con le caratteristiche distintive della prima zona del reattore.

## 2. La problematica della diagnostica e del controllo

La zona di testa del reattore, come già detto è caratterizzata da una combustione diffusiva per una certa estensione assiale del reattore e al fine di ottenere un processo il più stabile possibile deve essere costantemente monitorata. Di conseguenza risulta critico il suo monitoraggio e il suo controllo al fine di individuare situazioni incipienti di variazioni della condizioni di lavoro che possono compromettere la stabilità dell'intero processo di combustione. Con questo scopo è stato sviluppato un sistema di diagnostica integrativo di quello d'impianto, basato sull'utilizzo del sistema ODC per ottenere la caratterizzazione della zona in questione attraverso degli indicatori sintetici di tutte le variabili che influiscono sul processo.

L'osservazione della combustione con il monitoraggio integrativo ODC fornisce una variabile intrinseca al processo di combustione: l'emissione luminosa. L'emissione luminosa, più precisamente chemiluminescenza, è una fenomenologia strettamente correlata con i processi chimici di ossidazione, pertanto la sua analisi consente di correlare l'evoluzione del processo di combustione sia in funzione delle variabili chimiche, che dello stato fisico dell'ambiente di processo (temperatura, pressione). Il posizionamento con visuale assiale del sensore ha consentito la caratterizzazione del processo di combustione nella *zona di testa* del reattore, dove, come visto precedentemente, la combustione ha caratteristiche per lo più diffuse, e in quanto tale:

- condiziona pesantemente l'evoluzione del processo,
- è la zona dove è possibile evidenziare dinamiche veloci e quindi difficilmente controllabili.

La necessità di una implementazione della diagnostica del processo ha portato all'utilizzo del segnale dell'ODC per analizzare la dinamica del processo. Il segnale dell'ODC è una funzione complessa e dipendente contemporaneamente da più fattori e può essere analizzato in due ottiche differenti come:

- analisi delle dinamiche lente contenenti informazioni sugli andamenti del processo in funzione delle variabili di ingresso di processo.
- analisi delle dinamiche veloci contenenti informazioni sullo stato istantaneo del processo. Le informazioni estraibili dagli eventi locali sono fortemente correlate alle variabili chimiche e fisiche della combustione diffusiva (concentrazione dei reagenti, temperatura, pressione). Questo tipo di approccio permette di utilizzare eventi individuati singolarmente come vere e proprie sonde dello stato dinamico del processo consentendo di evidenziare fenomeni precursori estremamente utili alla diagnostica.

In questa sede si svilupperà il secondo approccio al fine di realizzare una diagnostica basata sui

singoli eventi appartenenti alle dinamiche veloci, per anticipare l'individuazione di uno stato incipiente di anomalia funzionale consentendo il recupero della situazione direttamente dalla gestione dell'impianto. Il metodo sviluppato è stato attualmente realizzato con analisi off-line ma è mira a realizzare un'applicazione di questo metodo on-line per integrarlo quindi nel sistema di controllo utilizzato sull'impianto.

### 3. Il metodo utilizzato

Il metodo sviluppato per l'analisi diagnostica, basato sull'analisi delle dinamiche veloci, consiste in due step:

1. individuazione degli eventi impulsivi:

- analisi della quantità di impulsi nel tempo,
- analisi della deformazione nel tempo degli impulsi, inteso come variazione della derivata del fronte di salita e di discesa in quanto associabili a fenomenologie che si realizzano durante il processo di combustione.

2. Estrazione di alcune caratteristiche chiamate nel corso dell'analisi "indicatori" rappresentativi di alcuni aspetti qualitativi del processo che in quanto tali possono essere utilizzati per il controllo dello stato del processo di combustione.

Per estrarre questi indicatori è stato realizzato un algoritmo capace di isolare singoli impulsi.

L'algoritmo (Fig. 3.2) utilizza più condizioni filtranti:

1) Per determinare l'ampiezza minima dell'impulso estraibile si considerano approssimabili le condizioni stazionarie dove la distribuzione dei valori è di tipo gaussiano.

Definita  $f(x)$  distribuzione gaussiana come:

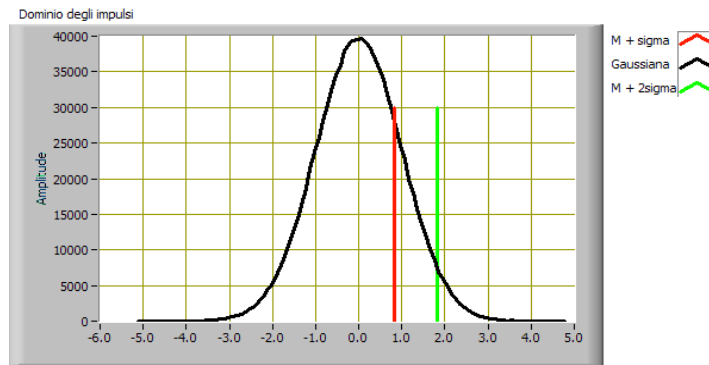
$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

dove  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (x_i - \mu)^2}$  deviazione standard

$\mu$  = valor medio

$x$  = valore di ampiezza del segnale

La consistenza è assicurata verificando che  $\sigma < (x-\mu) < 2\sigma$ .



**Figura 3.1: Zona di interesse sulla gaussiana**

Questo consente di definire una soglia variabile in funzione dello stato energetico dell'impulso, la probabilità di accadimento degli eventi all'interno della soglia definita, è del 13,6%.

Se  $(x-\mu) < \sigma$  è elevata la probabilità di accadimento degli impulsi e quindi questi saranno spesso sovrapposti e non discriminabili.

Se  $(x-\mu) > 2\sigma$  è bassa la probabilità di accadimento degli impulsi, questi saranno eventi rari non rappresentativi dello stato attuale del processo.

Nell'intervallo scelto si trovano tutti quegli impulsi che hanno un valore energetico tale da essere discriminato, e che appartengono alla classe di eventi caratteristica del processo.

- 2) l'impulso sia contenuto interamente nella finestra di analisi.
- 3) rispetto al punto di massimo deve avere contemporaneamente andamenti monotoni crescenti a sinistra e decrescenti a destra. Le condizioni di monotonia sono state individuate verificando la coincidenza (condizione di **and**) dei segni delle differenze finite effettuate sul set di dati.

L'ampiezza della "finestra di test" è un multiplo della durata dell'impulso medio, in modo da contenerne almeno uno. All'interno di questa è ricercata la presenza di un massimo. Nell'intorno di questo, con estensione definita da "LungAnalisi", è effettuato il controllo energetico e viene operato l'algoritmo di validazione che verifica la presenza della condizione di monotonia.

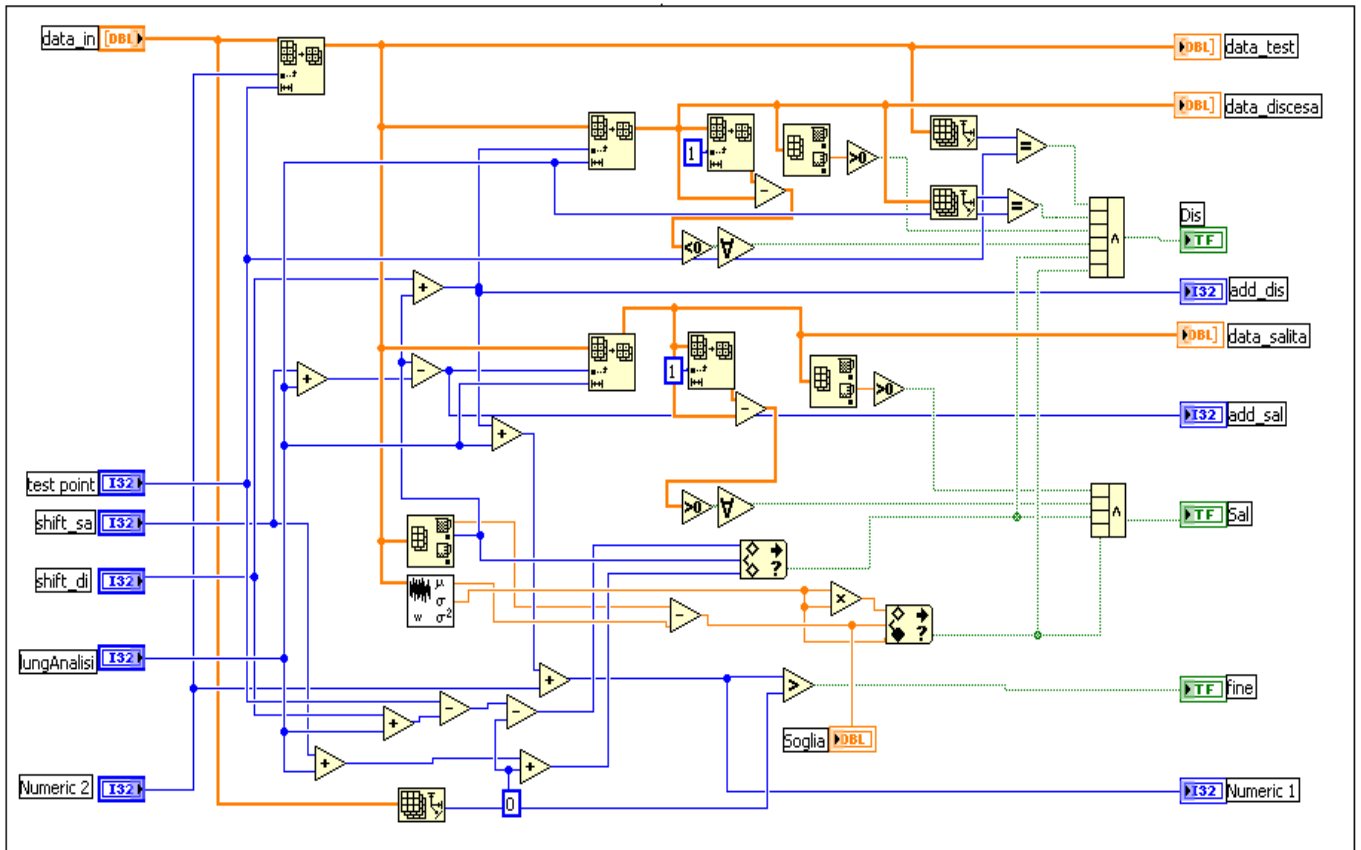


Figura 3.2: Algoritmo per l'estrazione degli impulsi.

Come accennato le caratteristiche più interessanti dell'impulso sono le velocità di accrescimento, quella di decadimento e il numero medio di impulsi in un record. Gli andamenti dei fronti di salita e di discesa sono approssimati con andamenti lineari di cui è calcolato il coefficiente angolare (best linear fitting), la cui dinamica è analizzata nel tempo. Queste caratteristiche, che saranno chiamate nel corso della trattazione *Slope\_s*, *Slope\_d*, *numero/impulsi* sono calcolate ovviamente a una certa distanza dal punto di massimo in modo da evitare la non linearità del picco.

### 3.1 Lo strumento software.

L'algoritmo di estrazione degli impulsi è contenuto nello strumento software descritto di seguito. Questo effettua un'analisi statistica sulle distribuzioni dei valori degli indicatori *Slope\_s*, *Slope\_d* fornendo lo skewness e il flateness. Questi indicatori definiti rispettivamente come:

$sk = \frac{M^3}{\sigma^3}$  o momento terzo è una misura della *asimmetria* della distribuzione;

$k = \frac{M^4}{\sigma^4} - 3$  o momento quarto è una misura della *piattezza* della distribuzione;



$$M^{(n)} = \frac{1}{N} \sum_i^N (x - \mu_x)^n \text{ momento centrato di ordine } n.$$

Poiché lo skewness e il flateness per una distribuzione gaussiana sono nulli, per valori calcolati molto prossimi a 0 si ha che la distribuzione ottenuta è simile a quella gaussiana.

Lo strumento software di analisi realizzato (Fig. 6.1) mostra i seguenti display:

- Il display “**Andamento nel tempo**” (Fig. 6.1A) mostra l’andamento del segnale grezzo acquisito dall’ODC in funzione del tempo. La traccia rossa è l’ingrandimento del tratto individuato dal cursore blu.
- Il display “**Impulso istantaneo**” (Fig. 6.1B) rappresenta nel tempo (secondi) l’impulso estratto (verde) e i tratti analizzati (rosso). Questa è una rappresentazione istantanea.
- Il display “**Impulso medio**” (Fig. 6.1C) rappresenta nel tempo (secondi) l’impulso medio valutato.
- Il display “**Distribuzioni delle pendenze**” (Fig. 6.1D) mostra le distribuzioni di *Slope\_s*, *Slope\_d* attuali e quelle di riferimento acquisite in condizioni stazionarie.
- Il display “**Rappresentazione bivariata**” (Fig. 6.1E) è la rappresentazione grafica delle *Slope\_s* e *Slope\_d* nello spazio degli eventi.
- Il display “**Segnali in uscita**” (Fig. 6.1F) è una vista d’insieme dei segnali ODC, laser diodo, *Slope\_s*, *Slope\_d*, *numero/impulsi* nel tempo ricostruiti con una frequenza di campionamento impostata. I dati provenienti dai sistemi di analisi sono campionati a 12.5 kHz, poiché devono essere integrati con i dati dell’archivio di processo, sono elaborati per ottenere una base dei tempi più vicina possibile a quella dei dati di processo. A questi sono stati aggiunti quelli prodotti dall’algoritmo di analisi (*Slope\_s*, *Slope\_d*, *numero-impulsi*) i quali vengono archiviati con una frequenza di campionamento equivalente a 2 Hz. Poiché le registrazioni sono state effettuate a record (blocchi di dati) e immagazzinate ogni mezzo secondo si è usato come variabile il valor medio di ogni record, producendo valori a 2 Hz. Questi dati sono quindi i valori medi dell’intervallo di misura.
- I controlli consentono di gestire i parametri per l’estrazione dell’impulso. I controlli sono gestiti a punti dove 1 punto = 80 μs:
  - “*test point*”: finestra all’interno della quale è ricercata la presenza di un massimo. La finestra è indicata in numero di punti.
  - “*lungAnalisi*”: finestra a su cui è applicato algoritmo per l’estrazione dell’impulso,
  - “*shift\_sa*, *shift\_d*”: distanza in punti della “*lungAnalisi*” rispetto al massimo dell’impulso,

“*media*”: finestra all’interno della “*lungAnalisi*”, sulla quale è calcolato il valore medio delle pendenze di salita e discesa.

- L’indicatore “*Imp/rec*” mostra il numero di impulsi per record.

- I controlli:

“*stepdisfasam*” consente di gestire lo sfasamento tra i valori rappresentati nello spazio degli eventi.

“*StopDim*”: consente gestire il numero di punti da rappresentare nello spazio degli eventi

L’indicatore “*size*” mostra il numero di punti rappresentati nello spazio degli eventi.

- Gli indicatori “*skewnwss\_s*”, “*flateness\_s*”, “*skewnwss\_d*”, “*flateness\_d*”, forniscono i valori di asimmetria e appiattimento della distribuzione ottenuta, rispetto una distribuzione gaussiana.

#### 4. La campagna di acquisizione

Per realizzare la campagna di acquisizione è stato realizzato un sistema di acquisizione dati (Fig. 4.1) dedicato capace sia di acquisire i segnali dal campo che di interfacciarsi al DCS (EMERSON) di impianto, il sistema collegato via modem permette una gestione anche in modalità remota (tramite la risorsa software Anywhere).

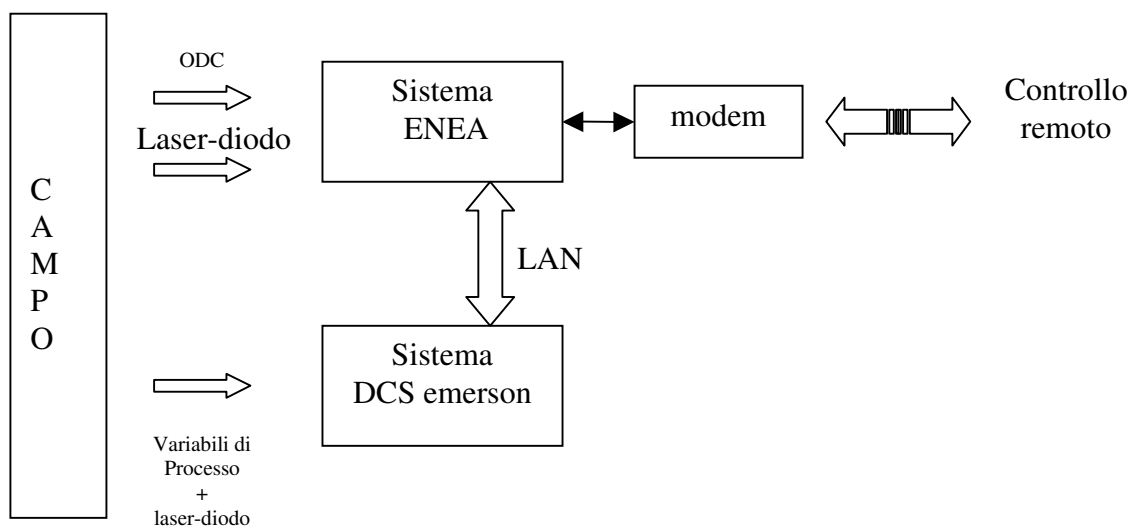


Fig. 4.1 . architettura sistema di acquisizione

Il dataserwer è stato attivato installando sul sistema ENEA (OPC Client) il modulo OPC Emerson in modo da superare il problema dei diritti di accesso, la soluzione ha permesso di accedere a tutti i dati acquisiti dal DSC-ISOTHERM (Emerson).

## 5. Il sensore ODC

Come visto nei paragrafi precedenti la sensoristica attualmente installata sull'impianto è essenzialmente dedicata alla gestione e al controllo del processo. Allo scopo di implementare strumentazione con capacità diagnostica, vista la complessità del processo, si è deciso di utilizzare una sensoristica integrativa: **ODC (Optical Diagnostics of Combustion) - Brevetto ENEA.**

Il sistema ODC si basa sull'elaborazione del segnale luminoso emesso dalla fiamma e rilevato da un sensore ottico. Questo osserva, con alta frequenza di scansione, l'emissione dell'energia radiante del processo, in modo da indagare la dinamica di fenomenologie intrinseche al processo di combustione e legate alla fluidodinamica. Attualmente è utilizzata una testa ottica con sensore che ha una risposta spettrale che va dai 300 ai 1100 nm e è legato essenzialmente all'osservazione dei fenomeni di chemiluminescenza. La luminescenza consiste fondamentalmente nell'emissione di radiazioni luminose nel visibile o nel vicino visibile (lunghezza d'onda compresa nell'intervallo 300-800 nm) dopo che elettroni eccitati mediante una qualche fonte di energia, ritornano dallo stato eccitato a quello fondamentale. Si ha *chemiluminescenza*, quando lo stato elettronicamente eccitato è generato da una reazione chimica esoenergetica (Pazzagli,1996), in questo caso, la combustione del combustibile.

### 5.1 Descrizione trasduttore

Il segnale catturato dalla sonda ottica è elaborato tramite la scheda di acquisizione dati N.I. 6071, collegata ad un P.C. Pentium 4, 2.2 GHz, e gestita da uno strumento virtuale sviluppato in ambiente Labview.

La sonda ottica è predisposta per utilizzare due diversi sensori:

- 1) **IPL 10530D**, larghezza di banda 12kHz, munito di lenti di collimazione.
- 2) **OSI1-300k/10M**, larghezza di banda 10MHz.

Il sensore usato in queste campagne di misura fa parte della famiglia IPL 10530 Integrated Photodiode Amplifiers, ed è costituito da un fotodiodo in silicio integrato ad un amplificatore.

L'elettronica del componente è alloggiata su un substrato ceramico e chiusa ermeticamente all'interno di un involucro metallico. Grazie a questi accorgimenti il dispositivo possiede eccezionali doti di repulsione di rumore elettrico ed elettromagnetico e capacità di lavorare in condizioni difficili.



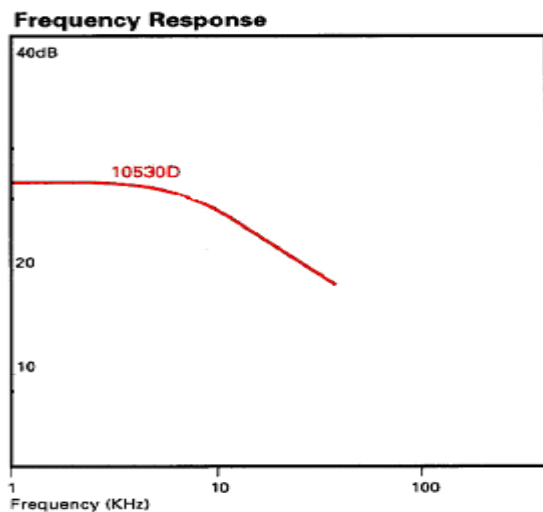
(a)

(b)

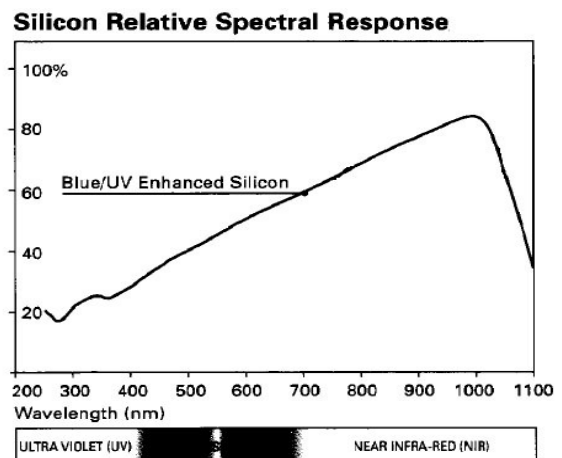
Figura 5.1: Foto della sonda ottica, con e senza fibra ottica utilizzato e del suo supporto metallico (b) e disegno di un fotodiodo con involucro metallico e lente (a).

Il dispositivo fornisce una tensione in uscita, proporzionale alla potenza raggianti incidente, nel range 0-2 Volt. Come si può vedere (Fig. 5.2.b) la risposta spettrale è ampia, ma vengono attenuate in maniera crescente le emissioni a lunghezze d'onda prossime all'UV.

La risposta in frequenza del dispositivo utilizzato è mostrata in Fig.5.2a da cui evince che la banda passante (a -3dB) dello strumento è di 12 KHz. La curva di risposta in frequenza è stata verificata sullo strumento impiegato utilizzando per la caratterizzazione un diodo emettitore con risposta in frequenza di 1MHz, i risultati hanno confermato la caratteristica fornita dal costruttore.



(a)



(b)

Figura 5.2: Risposta in frequenza (a) e risposta spettrale (b) del sensore utilizzato (10530D).

Altra caratteristica importante è costituita dalla bassa deriva termica (Fig.5.3).

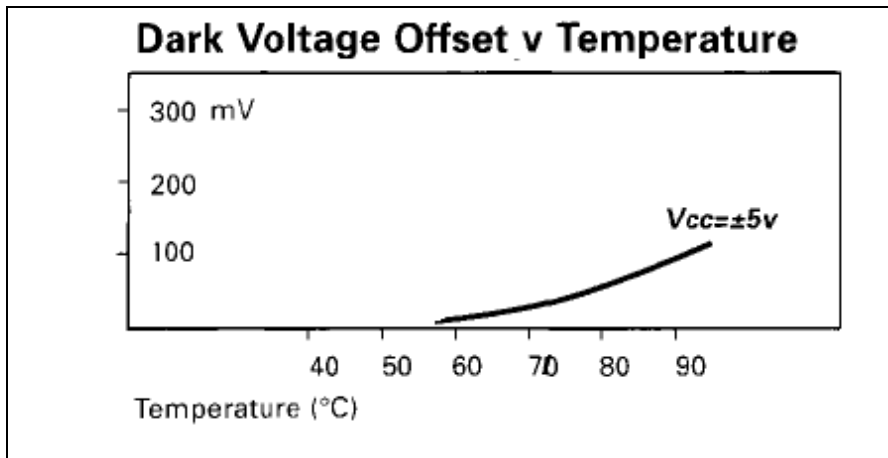


Figura 5.3: Deriva termica del sensore utilizzato.

La presenza della lente consente di avere un elevato coefficiente di accoppiamento, come mostrato dalla Fig.5.4, per l'interfacciamento alla fibra ottica.

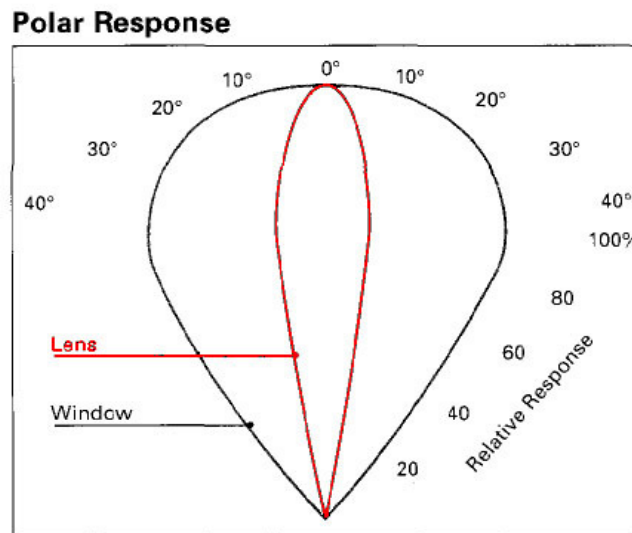


Figura 5.4: Risposta polare del sensore utilizzato (in rosso).

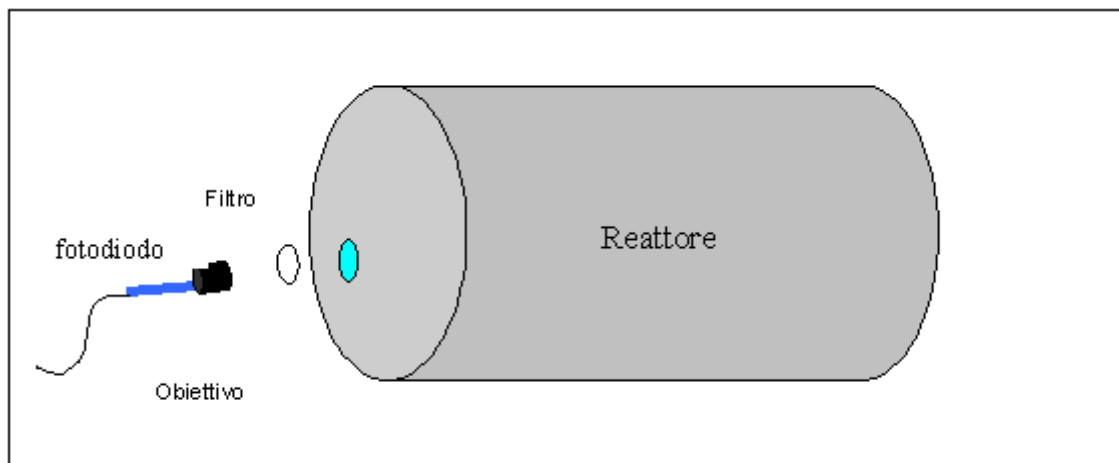
I test point sono stati selezionati secondo le seguenti configurazioni di misura, il sensore usato è stato l' IPL 10530D:

## 5.2 Il Set-up

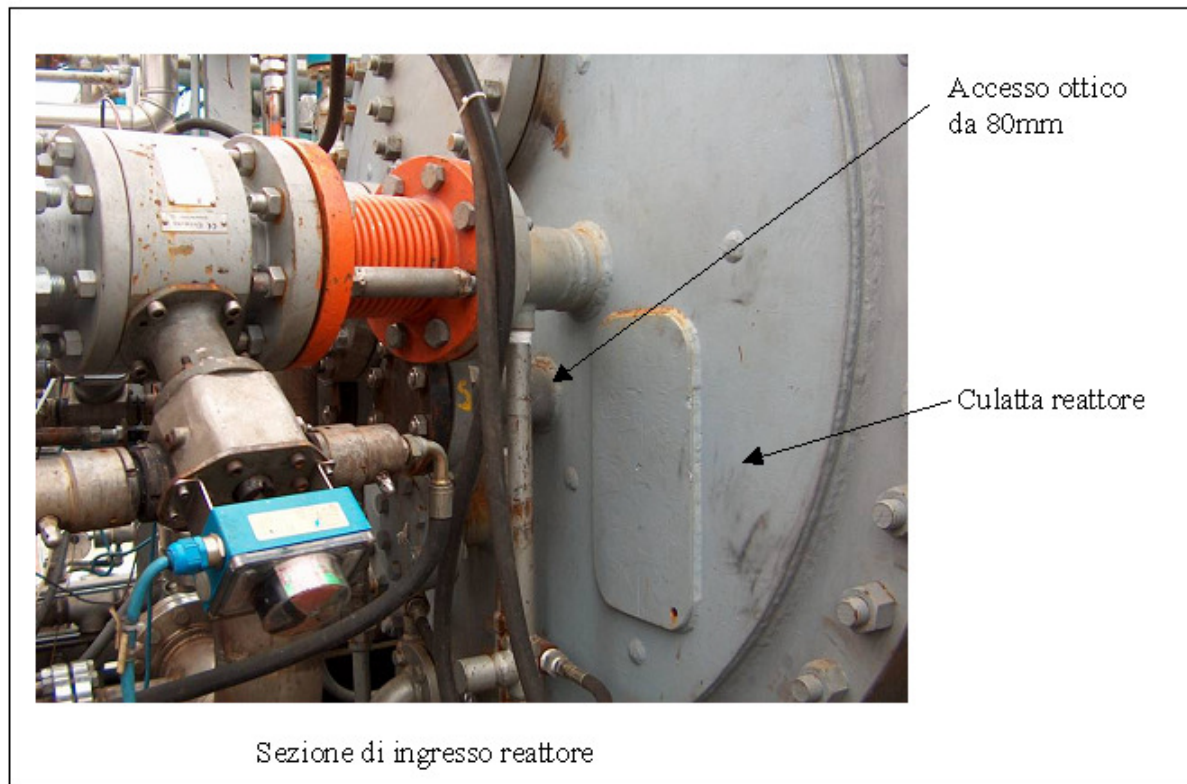
Di seguito sono riportate le configurazioni strumentali con cui si è proceduto alla acquisizione dal campo.

### SETUP A

Il sensore è stato posizionato ad una distanza di 10 cm dalla finestra ottica (la finestra ottica è un foro di 80 mm) ed è montato su un obiettivo da 16 mm con aperture di diaframma di 8 unità per evitare la saturazione del sensore. Il segnale luminoso inoltre per lo stesso motivo è stato attenuato con un filtro a infrarosso. Lo schema di tale set-up è presentato in Fig.5.5 mentre la sua applicazione è mostrata in Fig.5.6.



**Figura 5.5:** Setup A di acquisizione che prevede l'utilizzo del sensore IPL modello 10530D con filtro.



**Figura 5.6: Immagine dell'impianto con la locazione del set-up A.**

### SETUP B

Nel set-up B il segnale luminoso è invece catturato per mezzo di una fibra ottica di quarzo e poi collimato sul sensore ottico. La realizzazione di questo set up è stata necessaria per l'utilizzo di accessi ottici già esistenti, e in particolare è stato utilizzato l'accesso di un pirometro posizionato sul fianco destro del reattore in prossimità dell'uscita dei gas (Fig.5.7).

Per l'adattamento dell'accesso ottico è stato realizzato un supporto smontabile utilizzato anche come collimatore della fibra ottica. Acquisire in questo modo ha reso possibile l'investigazione della fiamma ad una distanza di 30 cm da essa (spessore del reattore) comportando i vantaggi di un'informazione più puntuale e gli svantaggi legati alla perdita di un'informazione globale della fenomenologia.



Figura 5.7: Immagine dell'impianto con il set up B con sensore OSI1-300k/10M.

### 5.3 La scelta del set up ottimale

Per lo svolgimento della campagna di misure si ritiene più significativo il set up A in quanto permette una visuale completa sulla combustione nella prima parte del processo, nella zona in cui combustibile e comburenti iniettati separatamente si miscelano producendo zone altamente reattive. Come già detto (par.1) in questa zona si realizza una combustione di tipo diffusivo caratterizzata quindi da una elevata instabilità, le cui conseguenze possono incidere su tutto il volume reattivo. Questa zona inoltre è caratterizzata da dinamiche veloci che sono difficilmente osservabili: questo giustifica la nostra scelta di utilizzare l'ODC.

### 5.4 Acquisizione del segnale

Il segnale dell'ODC è stata acquisito con uno strumento virtuale sviluppato in Labview.

Il campionamento è stato effettuato su una finestra di 0.5 secondi, con una frequenza di campionamento di 250 KHz integrata su un numero di 20 passi in modo da ottenere una frequenza di campionamento equivalente di 12.5 kHz, in questo modo si ottiene una larghezza di banda di 6.25 KHz ed una risoluzione di 2 Hz.

Il segnale dell'ODC è caratterizzato da una alta frequenza di campionamento. Lo strumento infatti è



stato usato con lo scopo di realizzare una diagnostica del processo di combustione, senza filtraggi per avere un'osservazione integrale estesa a tutte le dinamiche di questo. Le campagne di acquisizioni sono state fatte su periodi limitati nel tempo, 20 minuti, a causa della elevata mole di dati acquisiti.

## 5.5 Scelta dei parametri ottimali

Dalla rappresentazione nel tempo dei segnali si determina in base all'ampiezza dell'impulso e alla frequenza di campionamento, l'estensione tipica di questa in punti, dove 1 punto è un valore acquisito. Questa rappresenterà l'ampiezza massima della finestra di analisi e aumentata del 50% la finestra di test. Dalla rappresentazione dell'impulso medio si determina l'ampiezza della zona non lineare e questo costituisce i punti di shift. L'ampiezza ottimale della finestra di analisi si ottiene riducendo quella prima stimata e limitandola alla zona meno disturbata dell'impulso. Con questa procedura è stato ottenuto il seguente set di parametri:

- *“test point”* = 100 punti;
- *“lungAnalisi”* = 20 punti;
- *“shift\_sa”* = 20 punti;
- *shift\_d* = 7 punti;
- *“media”* = 20 punti;
- *“stepdisfasam”* = 1 punto.

Dal conteggio degli impulsi per record (1 record=0.5 secondi) si valuta l'effetto di smoothing della media e si fissano a 20 impulsi in modo da avere una media su 3 secondi, tempo medio sufficiente a seguire le dinamiche del processo.

## 6. Analisi dei dati e risultati ottenuti

L'utilizzo di un diverso sistema di acquisizione ha generato la problematica dello sfasamento dei tempi assoluti: i due sistemi, ENEA e DCS-ISOTHERM, hanno orologi di riferimento diversi. Il problema è stato risolto con due azioni diverse: il sistema ENEA utilizza il sistema DCS-ISOTHERM come time server della rete LAN (questo ha permesso una sincronizzazione degli orologi), il sistema ENEA acquisiva direttamente dal campo uno stesso segnale elettrico acquisito dal sistema DCS (quello prodotto dal sensore laser-diodo dedicato, strumento dedicato alla stima della temperatura dei gas combusti). La disponibilità di acquisizione contemporanea di uno stesso segnale, permette, in fase di analisi, con una semplice cross-correlazione, di compensare qualsiasi ulteriore sfasamento.

Una prima fase riguarda il processamento del segnale ODC per l'estrazione di indicatori sintetici, e la loro l'archiviazione come una variabili di processo calcolate. Nella seconda fase si confrontano i loro andamenti con le variabili di processo disponibili da DCS, al fine ottenere una stima del loro contenuto informativo rispetto allo stato del processo di combustione.

I test sono stati effettuati sia in condizioni stazionarie (Fig. 6.1) che in condizioni transitorie delle variabili di input al processo (Fig. 6.2, 3 e 4).

L'andamento del tempo del segnale dell'ODC (Fig. 6.1A) mostra un comportamento impulsivo. Il sistema di analisi rileva impulsi caratterizzabili da una velocità di accrescimento, fronte di salita, e una di decadimento, fronte di discesa (Fig. 6.1B-C). La distribuzione dei parametri estratti (pendenze dei fronti) (Fig. 6.1D) risulta essere molto prossima a una di tipo gaussiana evidenziando una condizione di stazionarietà in cui si trova effettivamente il processo. Questo è riscontrato dai valori di skewness e flatness calcolati per le due distribuzioni (Fig.6.1M): lo skewnwss è basso per entrambe, mentre la distribuzione Slope\_d risulta avere una dispersione maggiore rispetto al valore medio ( $k=1.27$ ). Le distribuzioni dei due indicatori presentano valori di moda diversi a testimonianza delle diverse velocità. La rappresentazione bivariata (Fig. 6.1E) mostra la correlazione esistente tra i valori delle due pendenze.

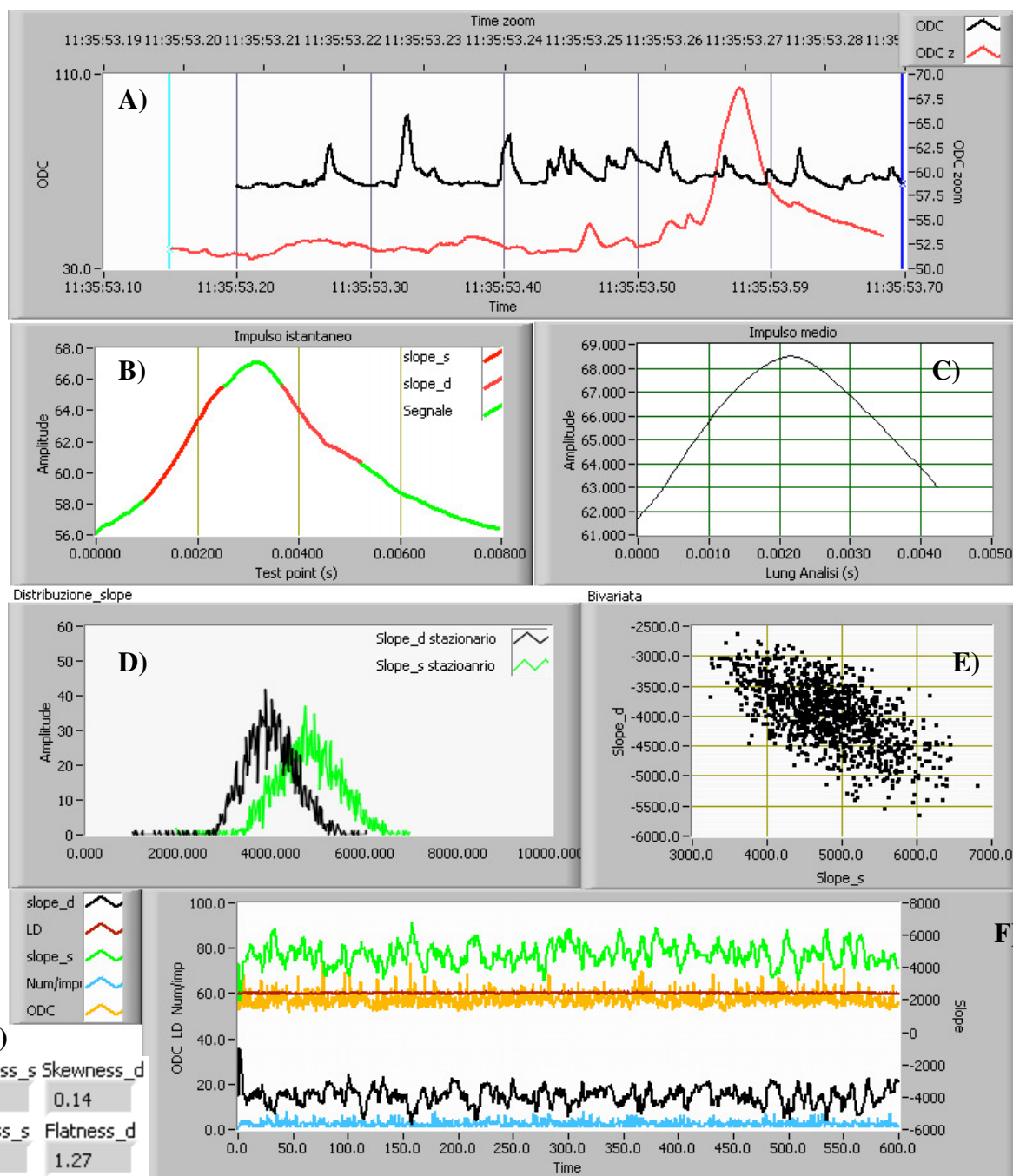


Figura 6.1: Test sul segnale ODC in condizioni stazionarie

Di seguito sono evidenziati i comportamenti degli indicatori individuati rispetto alla variazione delle variabili di input del processo. L'effetto principale della **variazione (riduzione) della portata di ricircolo lungo** (Fig. 6.2) è un aumento della fluttuazione luminosa come risulta dall'andamento dell'ODC (Fig. 6.2A). Le distribuzioni aumentano in statistica evidenziando delle deformazioni e un leggero spostamento del valore modale della velocità di decadimento verso destra (Fig. 6.1D). Dagli indicatori di skewness e flatness risulta evidente come la rappresentazione grafica della bivariata (Fig. 6.2E) mostra una distribuzione dei punti nello spazio degli eventi che si avvicina a

quella di un cerchio schiacciato e inclinato. Questo evidenzia la coerenza tra gli indicatori estratti. La variazione della portata del ricircolo si riflette sulla variazione della temperatura nel reattore e sulla diluizione dei reagenti.

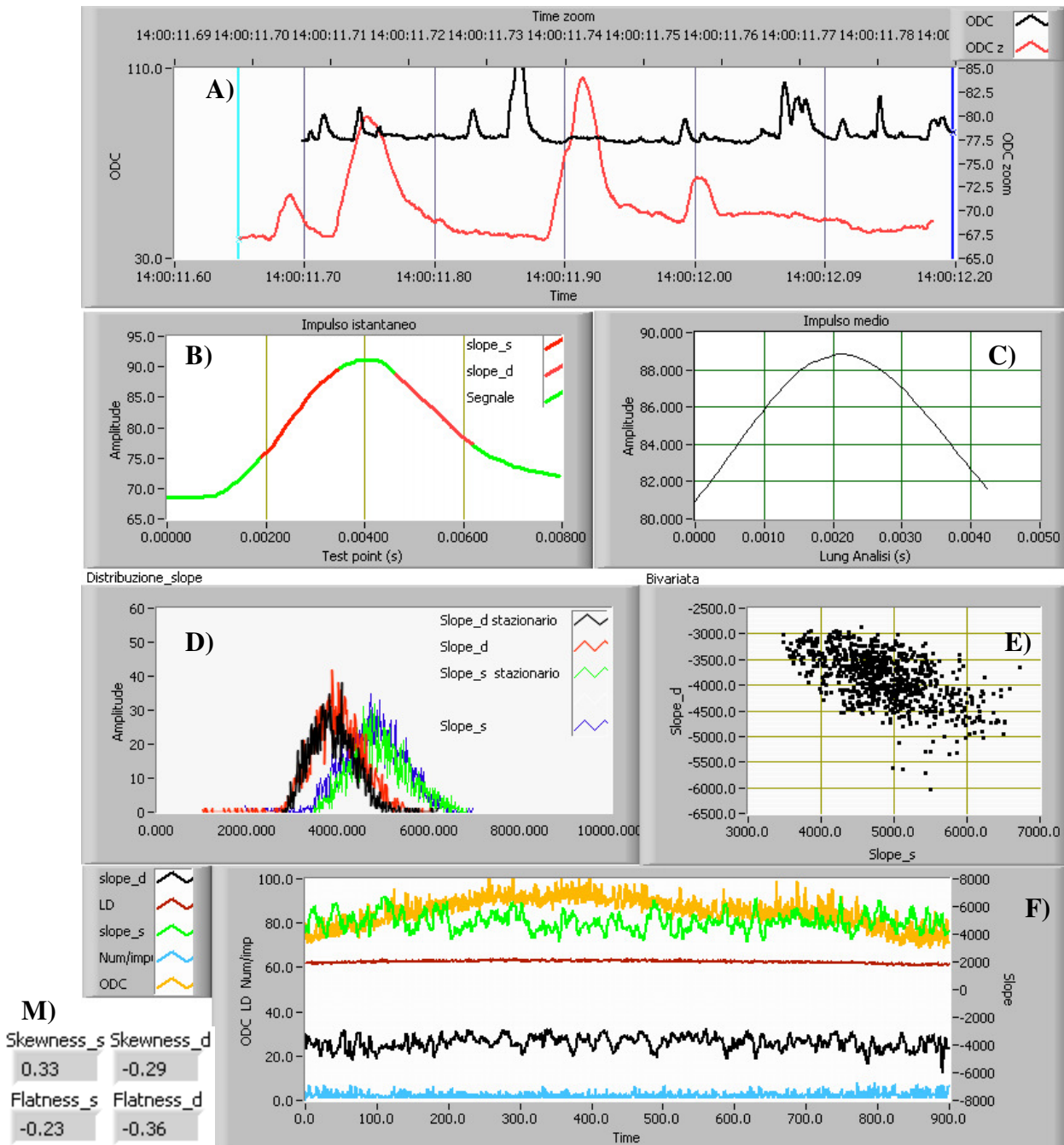


Figura6.2: Test sul segnale ODC in condizioni transitorie di variazione della portata di ricircolo lungo.

La variazione (aumento) della portata dell'ossigeno (Fig. 6.3) provoca principalmente la variazione delle concentrazioni dei reagenti, e quindi la variazione della temperatura, a cui corrisponde una diminuzione delle dimensioni del picco (Fig. 6.3A). Le distribuzioni diventano fortemente asimmetriche e evidenziano multimodalità (Fig. 6.3D). E' evidente come la riduzione della quantità dei impulsi nel tempo sia correlabile a una riduzione della zona reattiva localizzata

(diffusiva). La rappresentazione della bivariata (Fig. 6.3E) mostra una elevata correlazione tra la variazione delle due pendenze.

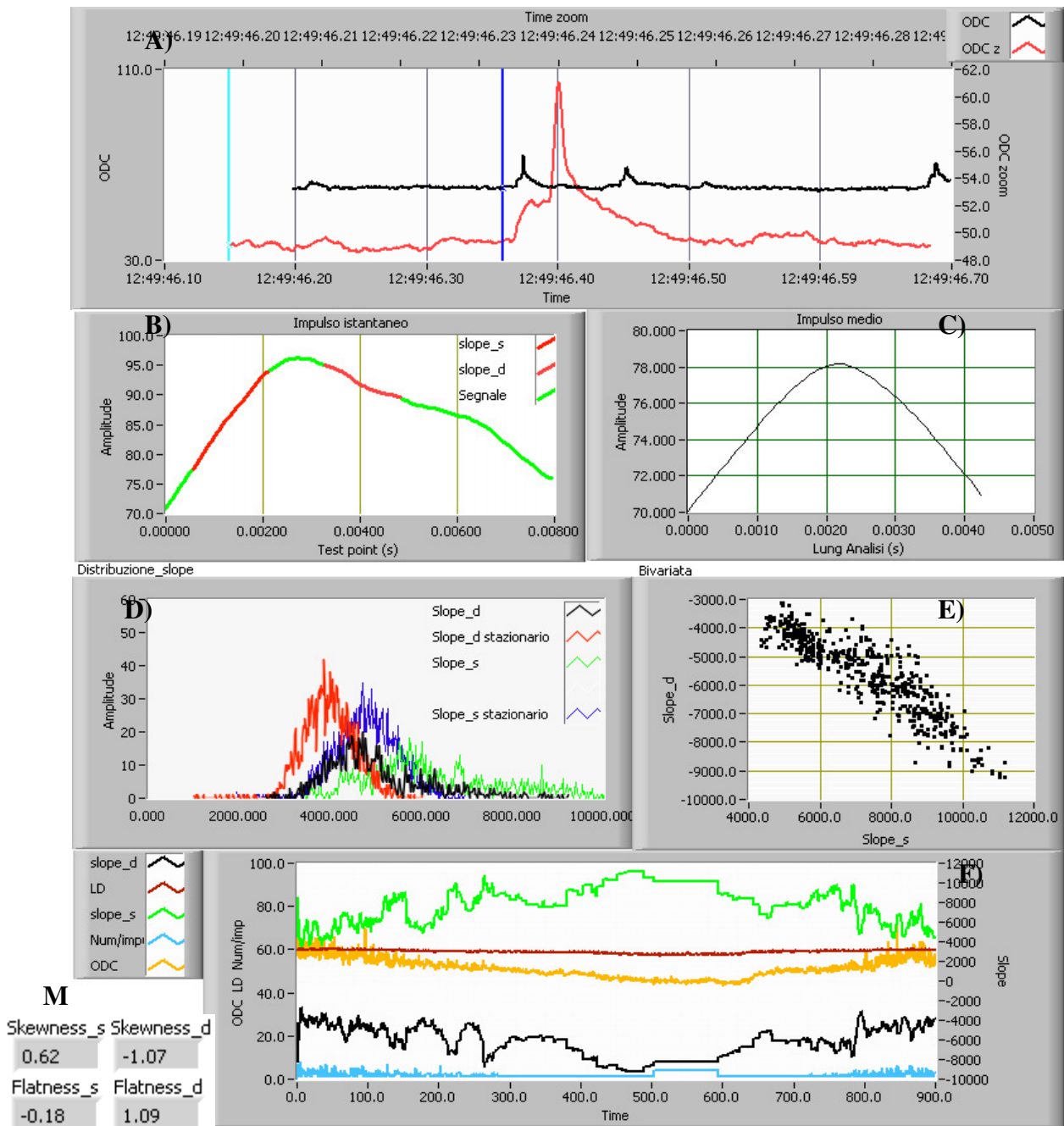


Figura 6.3: Test sul segnale ODC in condizioni di variazione della portata di ossigeno.

La **variazione (riduzione) del combustibile** (Fig. 6.4) ha ovviamente un effetto pesante sul processo che viene evidenziato dal fatto che la quantità degli impulsi varia coerentemente con la variazione del combustibile, anche le pendenze (Fig. 6.4B-D) mostrano una forte correlazione con la variazione del combustibile e inoltre l'appiattimento delle distribuzioni evidenzia una deriva dei valori delle pendenze (coerente con la deriva dei valori del combustibile).

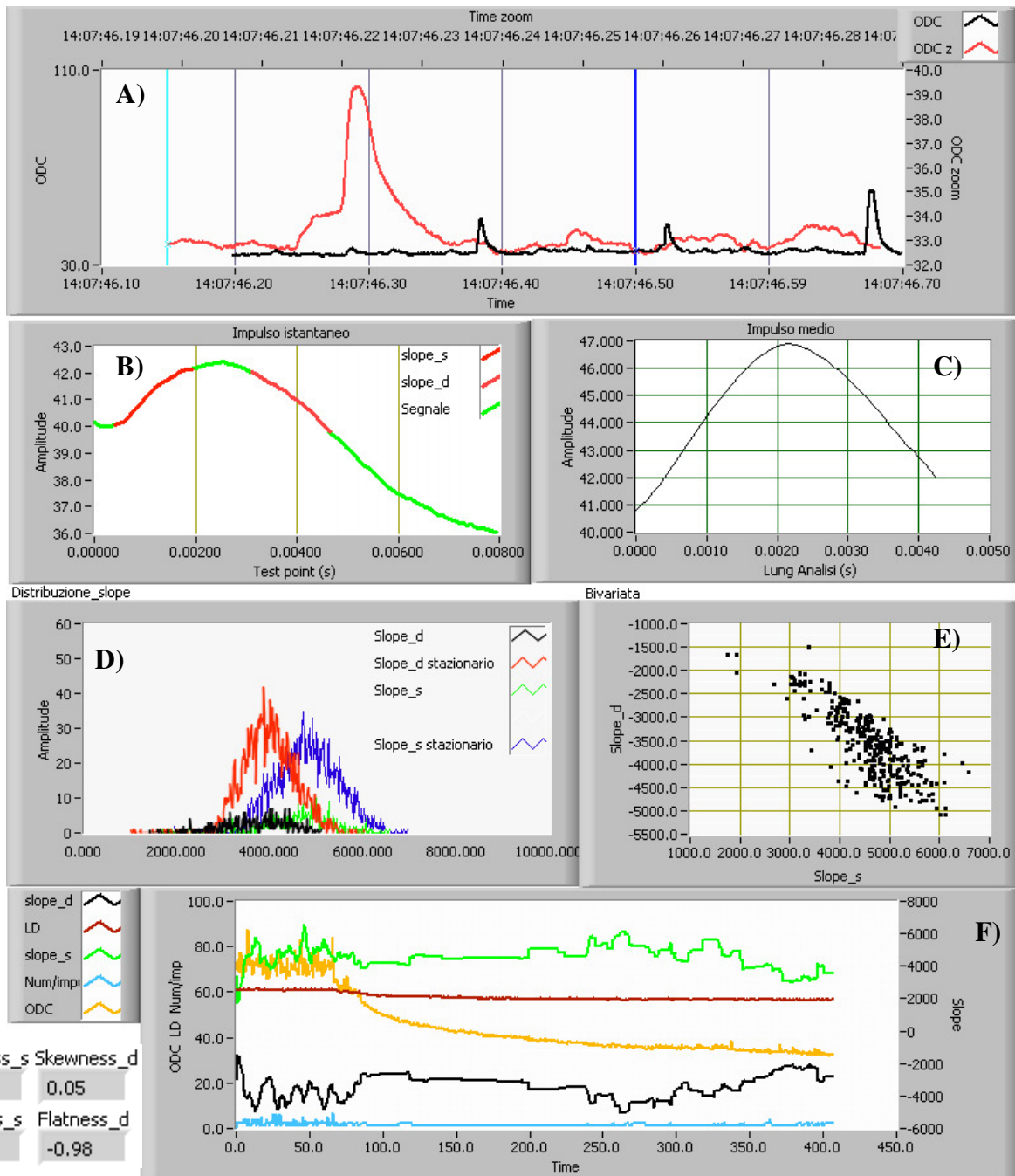


Figura 6.4: Test sul segnale ODC in condizioni di variazione della portata olio combustibile.

Dai test mostrati risulta evidente la correlazione tra gli indicatori estratti dal segnale ODC e i transitori realizzati. Da quanto mostrato, la forma dell'impulso e la frequenza degli eventi sono correlati sia alle concentrazioni dei reagenti, che alle variabili fisiche in cui si sviluppa il processo (transitorio ricircolo lungo).

## 6.1 Aspetti discriminanti

Le dinamiche della combustione sono legate agli aspetti chimico fisici del processo, e, come vedremo, l'analisi del segnale dell'ODC, ha capacità discriminanti rispetto a questi. La possibilità di isolare gli impulsi e misurare  $Slope_s$  e  $Slope_d$  ci permette di caratterizzare due fasi della combustione localizzata. La fase di salita è legata essenzialmente alla concentrazione dei reagenti e quindi agli aspetti chimici, oltre che a quelli fisici dell'ambiente circostante. La fase di discesa è legata essenzialmente ai processi di decadimento energetico e quindi alle variabili fisiche del processo. Di seguito verrà dimostrata questa peculiarità analizzando alcune fluttuazioni. Per evidenziare questi aspetti sono stati effettuati test in condizioni stazionarie utilizzando l'algoritmo di cross-correlazione per evidenziare il legame esistente tra i diversi segnali d'interesse.

In **condizioni stazionarie** (Fig. 6.5, Fig. 6.6, Fig. 6.7) è da notare che:

- Gli indicatori sintetici sono scorrelati con il segnale dell'ODC da cui derivano, mentre tra di loro sono correlati.
- il segnale “*numero/impulsi*” è correlato e in fase rispetto a quello dell'ODC, in quanto più aumentano gli eventi locali nel tempo, più aumenta l'intensità luminosa e quindi il segnale prodotto dall'ODC. Questa variabile incide sulla consistenza del calcolo della pendenza del fronte di salita e discesa, in quanto ne determina la statistica disponibile.

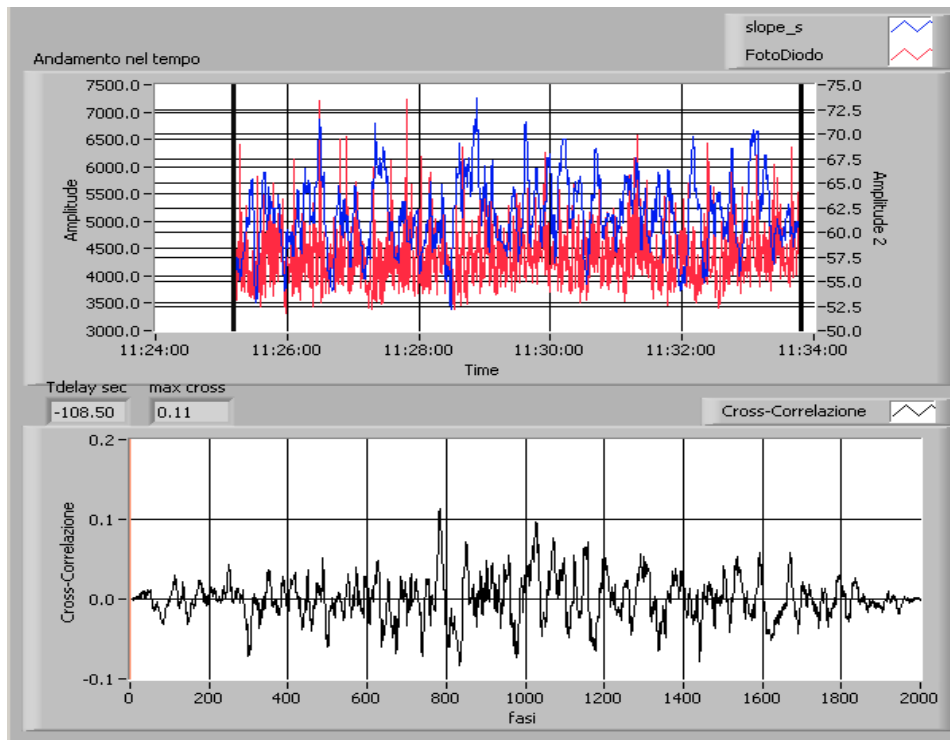


Figura 6.5: Andamento nel tempo (in alto) e Cross-correlazione (in basso) tra ODC-Slope\_s

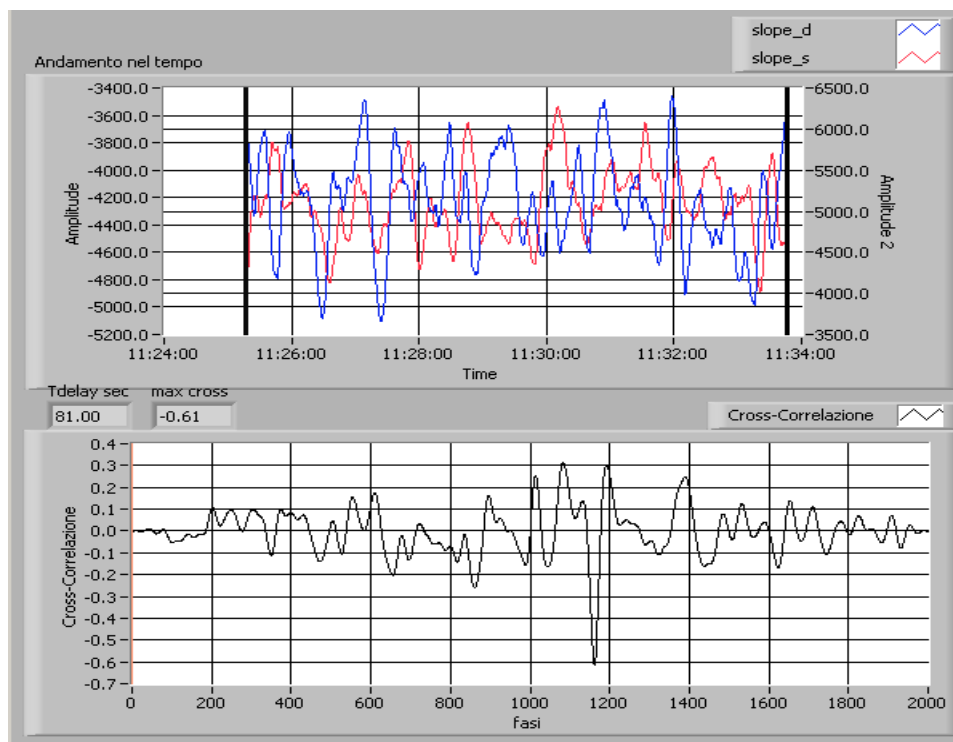


Figura 6.6 Andamento nel tempo (in alto) e Cross-correlazione (in basso) tra Slope\_d -Slope\_s



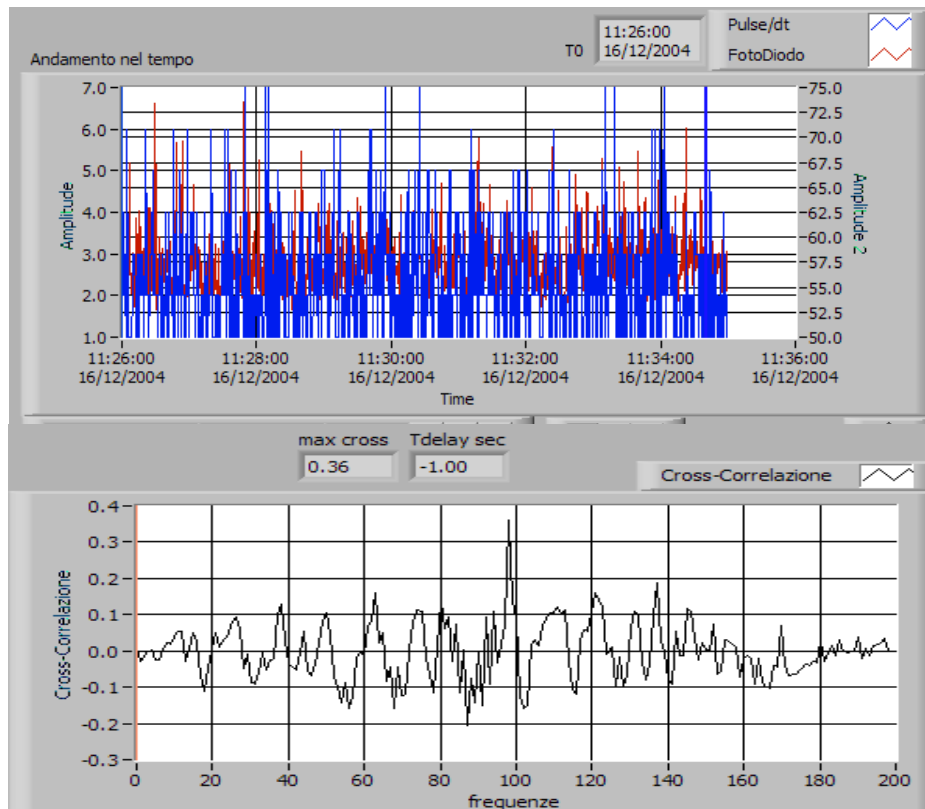


Figura 6.7: Andamento nel tempo (in alto) e Cross-correlazione (in basso) tra ODC-numero/impulsi.

In **condizioni transitorie** (Fig. 6.8, 6.9) modificando una variabile d'ingresso (portata  $O_2$ ) relativa alla portata dei reagenti si nota:

- un aumento del coefficiente di correlazione del segnale dell'ODC, con i segnali di salita e di discesa.
- un aumento del coefficiente di cross-correlazione tra il segnale ODC e il segnale *numero/impulsi*, la variazione della concentrazione dei reagenti incide fortemente su tutte le variabili del processo di combustione.

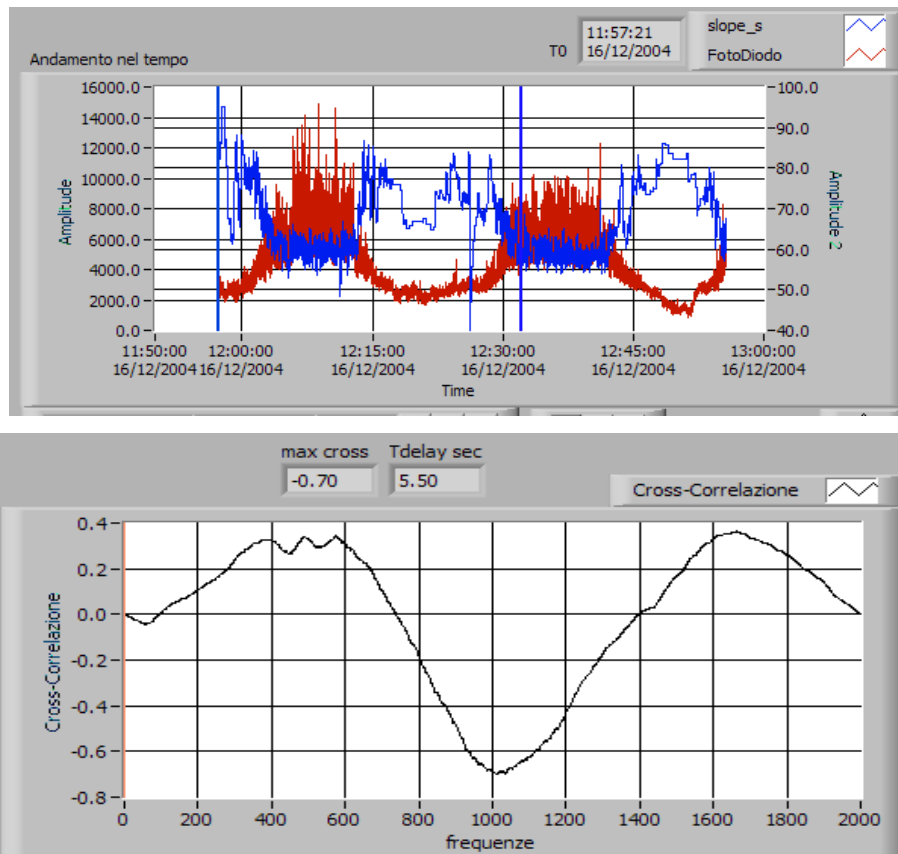


Figura 6.8: Andamento nel tempo (in alto) e Cross-correlazione (in basso) tra Slope\_s-ODC.

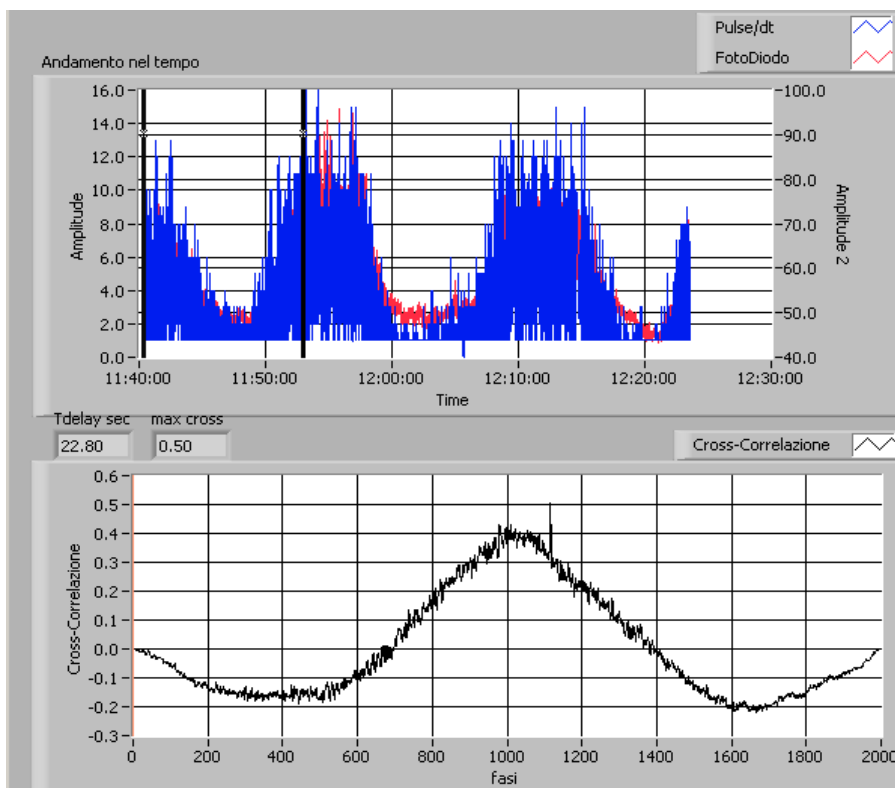


Figura 6.9: Andamento nel tempo (in alto) e Cross-correlazione (in basso) tra numero/impulsi-ODC.

Modificando il **ricircolo lungo** (Fig. 6,10, 11, 12) si riscontra che:

- cambia il coefficiente di correlazione tra il segnale ODC e quelli di salita e di discesa. In particolare il segnale di discesa ha una correlazione maggiore con l'ODC rispetto a quello di salita, mostra quindi una maggiore sensibilità verso le variazioni delle condizioni di processo.
- la correlazione tra i segnali di salita e discesa è invariata rispetto alla condizione di stazionarietà.
- variando il ricircolo lungo la quantità di impulsi non varia sensibilmente (l'effetto di diluizione dei reagenti non influisce pesantemente).

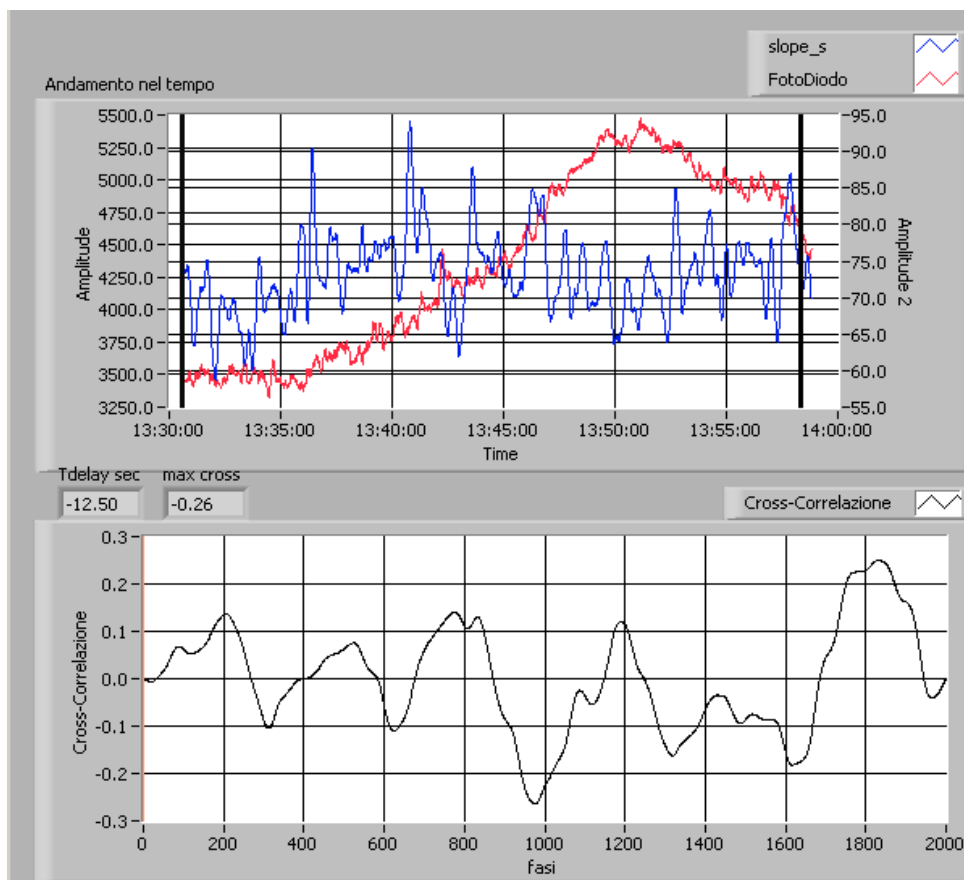


Figura 6.10: Andamento nel tempo (in alto) e Cross-correlazione (in basso) tra Slope\_s-ODC.

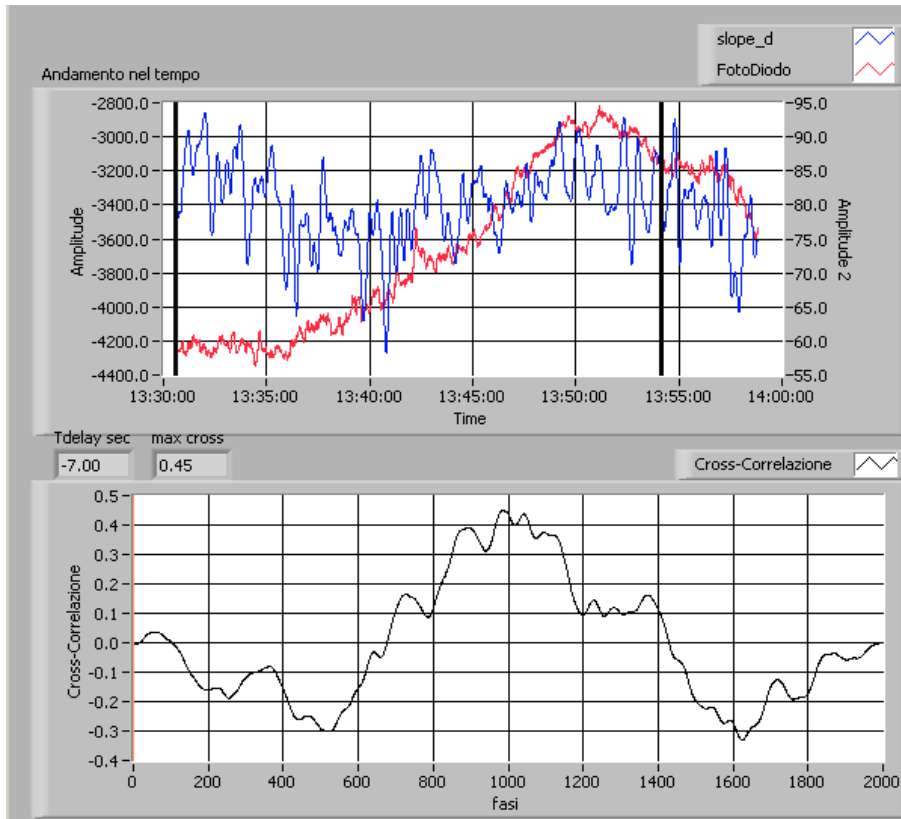


Figura 6.11: Andamento nel tempo (in alto) e Cross-correlazione (in basso) tra Slope\_d-ODC.

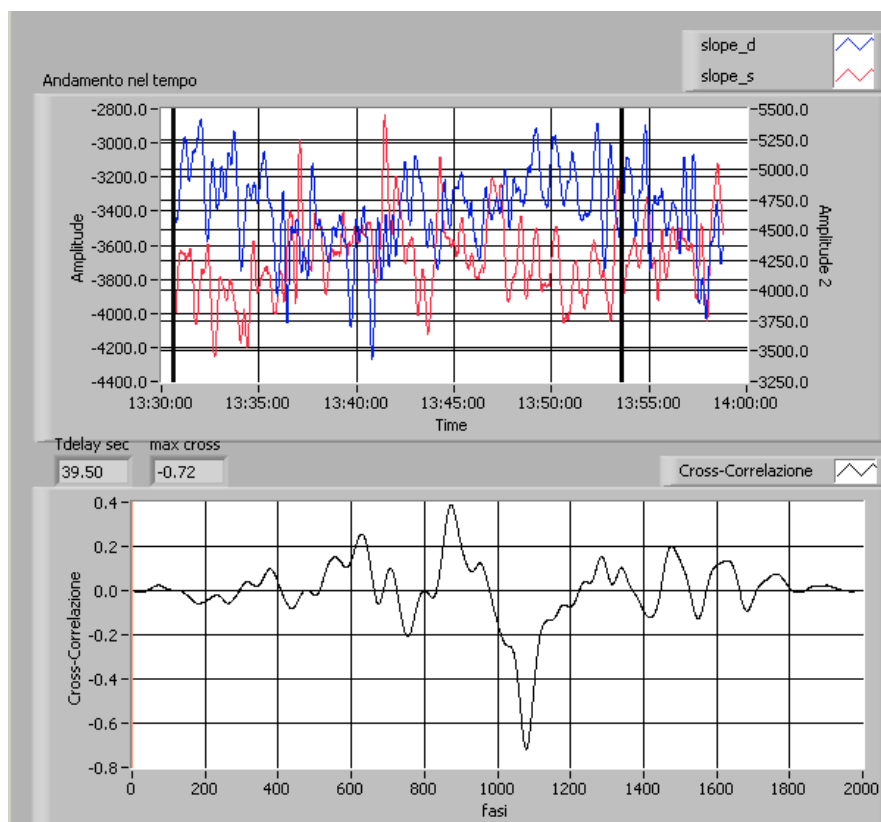


Figura 6.12: Andamento nel tempo (in alto) e Cross-correlazione (in basso) tra Slope\_s-Slope\_d.

## 7. Valutazione dell'efficienza degli indicatori sintetici.

Gli indicatori estratti sono come già detto l'espressione sintetica del modo di evolvere e di decadere di un processo combustivo localizzato. Pertanto possono essere considerati una stima "diretta" del processo di combustione a differenza delle altre variabili convenzionali che sono invece una stima delle cause o delle conseguenze della combustione. Di seguito vedremo come queste inserite nel sistema di monitoraggio (necessariamente off-line) siano correlabili alle variabili d'impianto.

Dagli andamenti mostrati in Fig. 7.1 è evidente che l'aumento della portata dell'ossigeno è rilevato dagli indicatori sintetici sia con un aumento della pendenza del fronte di salita, accrescimento, che di quella di discesa, decadimento. La quantità di impulsi nel tempo diminuisce, questo fa ipotizzare che una variazione della portata di ossigeno si ripercuota sia sull'estensione che sul numero delle zone reattive locali. Quindi l'informazione che ci danno i tre indicatori sintetici consiste in una riduzione complessiva del processo di combustione nella zona a monte del reattore. Questo trend può essere confermato dagli andamenti delle variabili d'impianto e precisamente: la temperatura sulla testa del reattore misurata dal pirometro e le concentrazioni di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O misurata del sistema di analisi dei gas combusti.

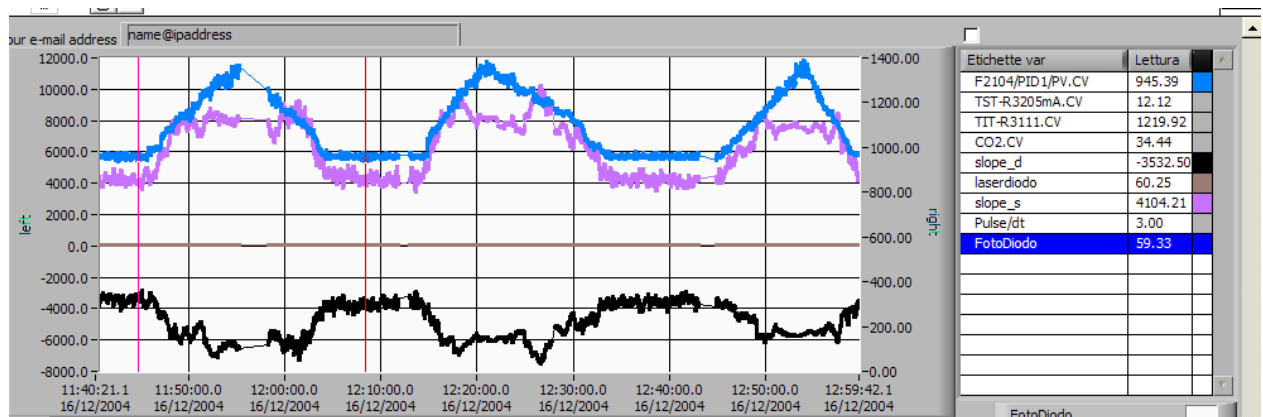


Figura 7.1: Andamento degli indicatori sintetici Slope\_s (viola), Slope\_d (nero), portata ossigeno [kg/h] (blu).

Come mostrato dalla Fig. 7.2 all'aumentare della portata di ossigeno corrisponde:

- riduzione della temperatura di pelle del refrattario nella zona a monte del reattore;
- riduzione delle concentrazioni dei gas combusti .

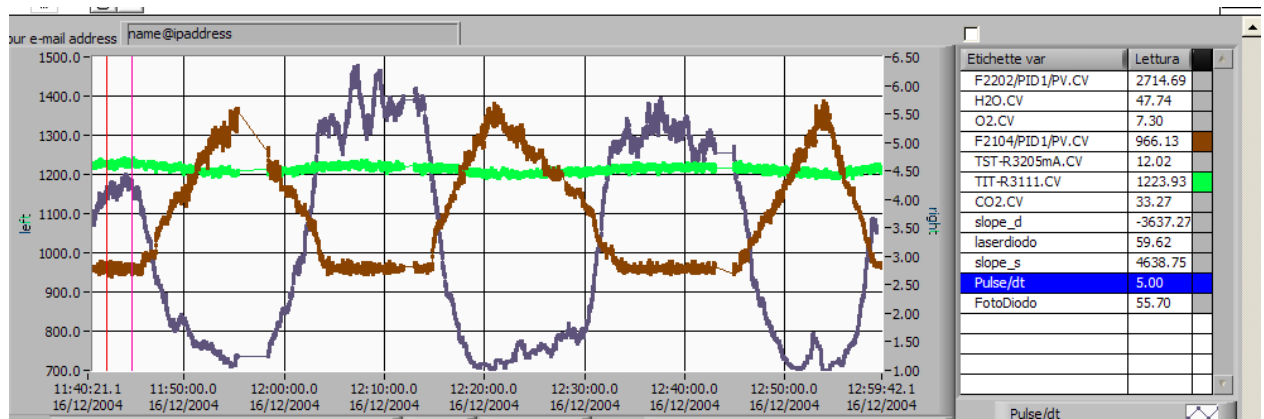


Figura 7.2: Andamento degli indicatori sintetici numero/impulsi (grigio), temperatura pirometro [°C] (verde), portata ossigeno [kg/h] (marrone).

Complessivamente si osserva che l'eccessiva diluizione della miscela combustibile-comburente, e quindi la diminuzione della zona reattiva diffusiva si ripercuote su tutto il sistema come mostrato in Fig. 7.3.

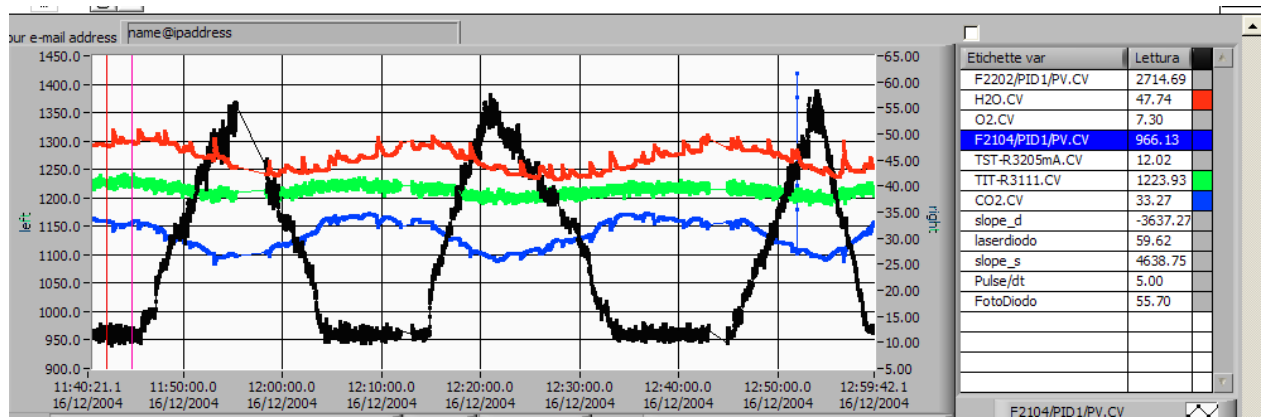
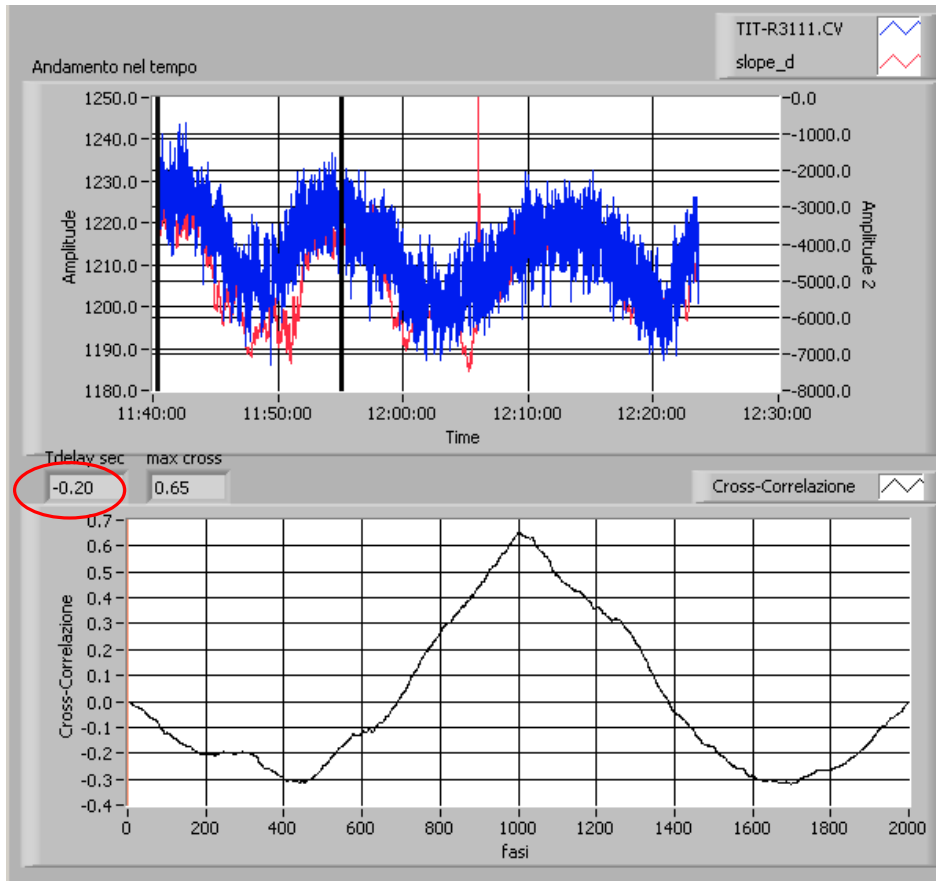


Figura 7.3: Andamento nel tempo portata ossigeno [kg/h] (nero), H2O% (rosso), CO2% (blu), temperatura pirometro [°C] (verde).

Nelle figure successive, attraverso la stima del tempo di propagazione del transitorio dell'ossigeno, è calcolato ed è mostrato lo sfasamento temporale tra il monitoraggio effettuato dal pirometro (allo stato attuale lo strumento più veloce per la misurazione della temperatura) e quello prodotto dagli indicatori sintetici.

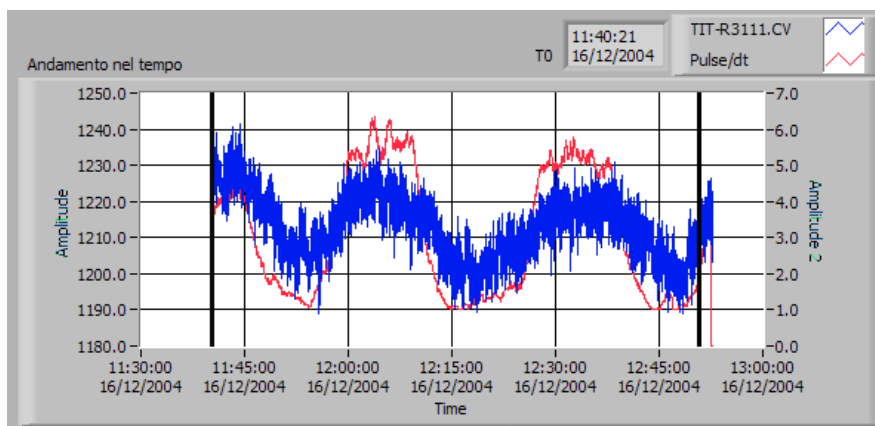
Poiché i dati provengono da archivi e sistemi differenti (orologi differenti), per evitare incoerenze temporali è stata eseguita una procedura di sincronizzazione basata sul calcolo dello sfasamento tra i segnali forniti dai due sistemi (DCS e sistema Enea), ma che leggono l'uscita dello stesso strumento, il laser diodo. Questo garantisce che le misure di sfasamento effettuate abbiano una elevata consistenza. Per ogni test sarà quindi effettuata la procedura di rifasamento.

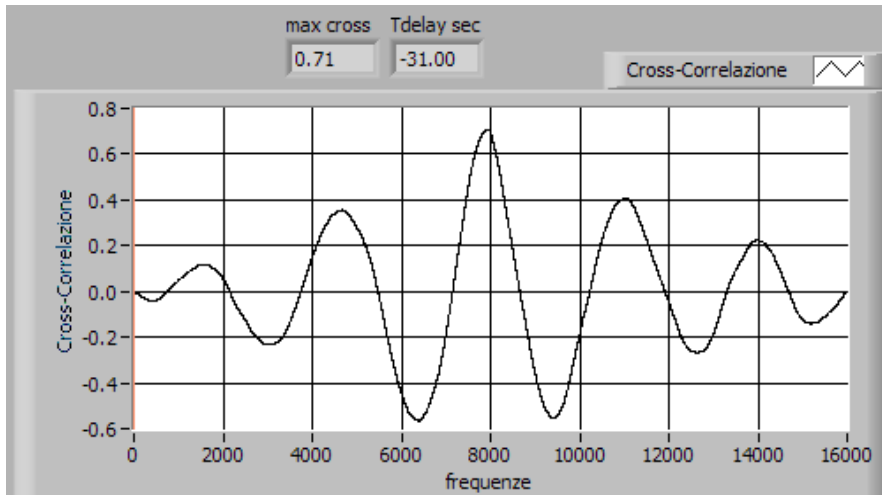
Come mostrato in Fig. 7.4 il ritardo tra il segnale di discesa e il segnale del pirometro è di 0.2 secondi.



**Figura 7.4: Cross-correlazione tra Slope\_d e la temperatura letta dal pirometro.**

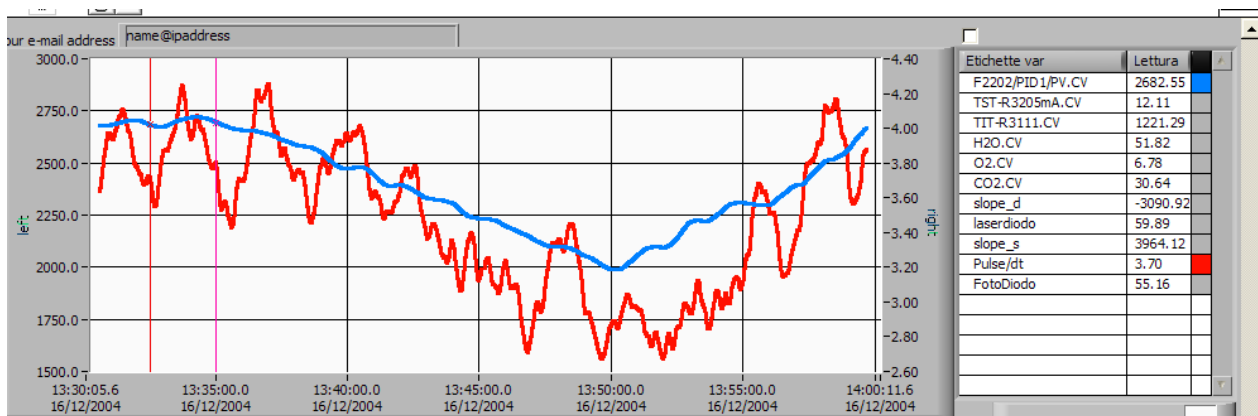
Il segnale quantità degli impulsi (Fig.7.5) è in anticipo rispetto al pirometro (30 secondi). Questo come già spiegato è legato al fatto che l'indicatore sintetico in questione inizia a percepire le variazioni fin dalle prime avvisaglie dovute agli eventi precursori, per cui mostra una inerzia bassissima ai cambiamenti del processo combustivo.





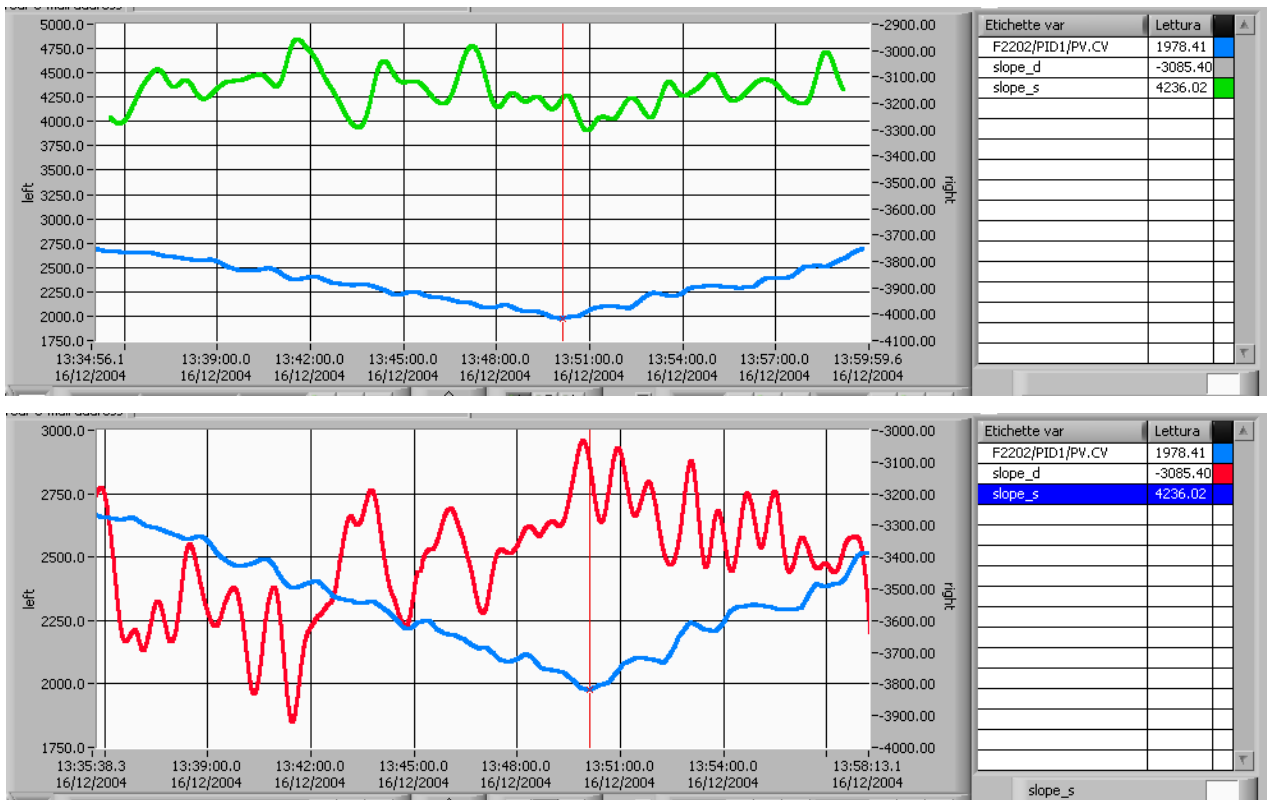
**Figura 7.5: Cross-correlazione tra numero/impulsi e la temperatura letta dal pirometro.**

Considerata una riduzione della portata del ricircolo lungo si osserva una riduzione del numero di impulsi nel tempo (Fig. 7.6) e una lieve diminuzione della velocità di decadimento mentre quella di salita rimane costante (Fig. 7.7). Questo può essere interpretato nel seguente modo: la riduzione degli impulsi è attribuibile a un ampliamento delle zone reattive locali, e la diminuzione della velocità di decadimento è relazionabile a un aumento del tempo necessario allo scambio energetico. Questo dovrebbe implicare un aumento localizzato della temperatura a monte del reattore.



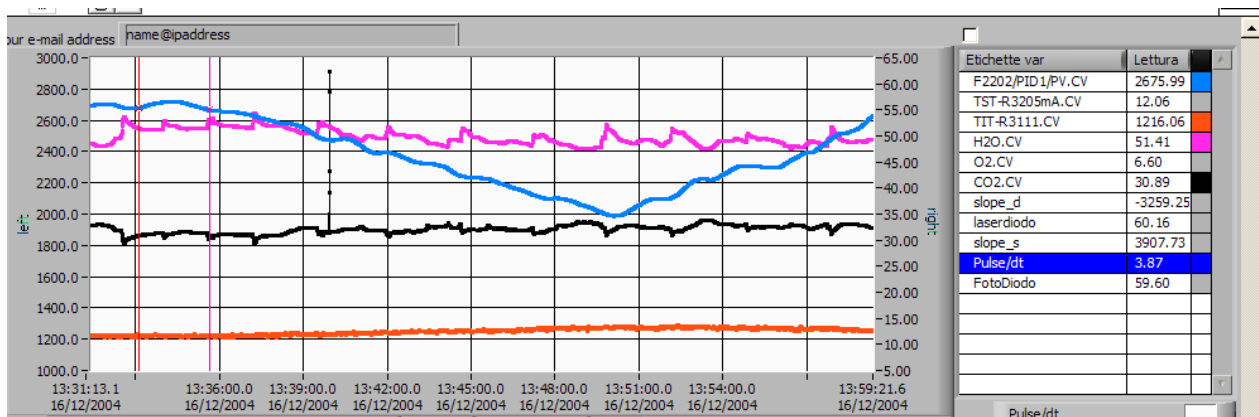
**Figura 7.6: Andamento nel tempo della portata del ricircolo lungo[kg/h] (blu), impulsi/tempo (rosso).**





**Figura 7.7:** Andamento nel tempo della portata del ricircolo lungo[kg/h] (blu), Slope\_s (verde),(in alto), portata del ricircolo lungo[kg/h] (blu) Slope\_d (rosso).

Dagli andamenti delle variabili d'impianto infatti si nota (Fig. 7.8) che al diminuire della portata di ricircolo lungo non si hanno effetti evidenti sulle concentrazioni dei gas combusti in uscita ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ). Quindi la quantità di reazione complessivamente non varia, e la quantità di calore prodotta è costante. L'aumento di temperatura che si nota è dovuto alla diminuzione della portata di gas di ricircolo, che oltre a un effetto diluente, raffreddano l'ambiente reattivo in quanto introdotti a bassa temperatura ( $200^\circ C$ ).



**Figura 7.8:** Andamento nel tempo della portata del ricircolo lungo [kg/h] (blu),  $H_2O\%$  (rosa), temperatura pirometro [ $^\circ C$ ] (arancio),  $CO_2\%$  (nero).

In Fig. 7.9 è mostrato lo sfasamento temporale tra la portata di ricircolo lungo e il segnale della quantità di impulsi.

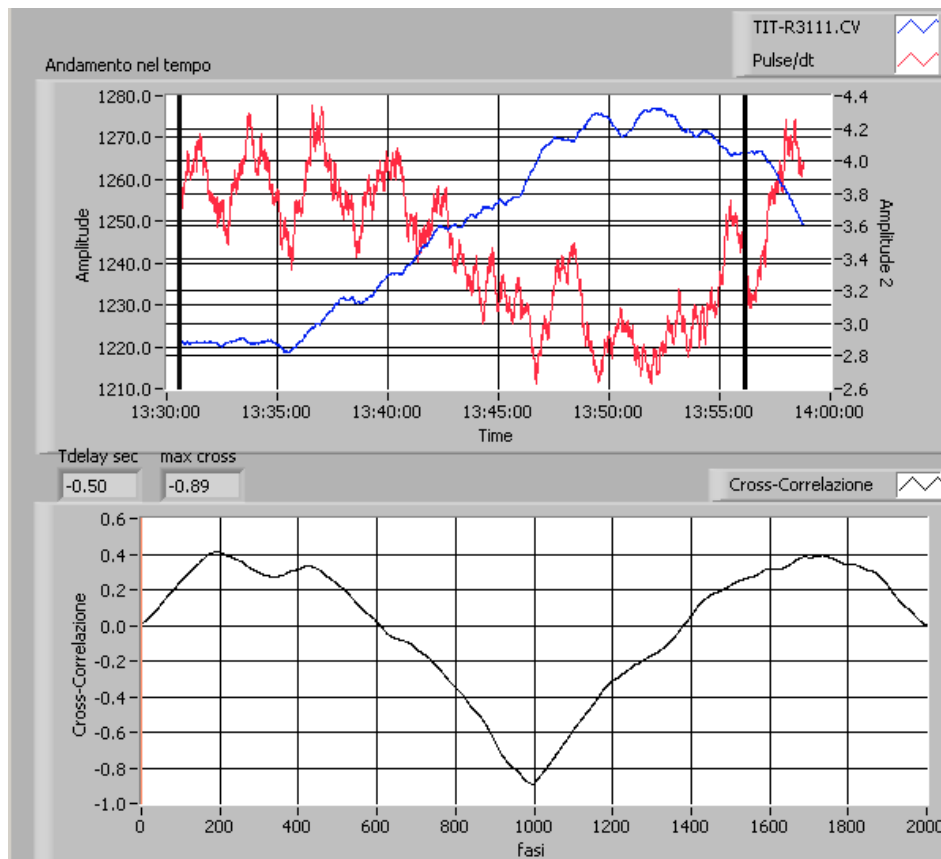


Figura 7.9: Cross-correlazione tra numero/impulsi e la temperatura letta dal pirometro[°C].

I test effettuati mostrano con chiarezza che è possibile estrarre ulteriori informazioni (pendenza salita, discesa, quantità impulsi nel tempo) con elevata capacità diagnostiche dal segnale dell'ODC. Queste informazioni sono perfettamente sincrone al processo di combustione e consentono una diagnostica efficiente, veloce e non intrusiva, caratteristiche indispensabili per realizzare sistemi di monitoraggio in un ambiente ostile. I tre indicatori analizzati contemporaneamente permettono di discriminare i diversi stati del processo di combustione diffusivo.

## 8. Conclusioni

Le argomentazioni trattate mettono in luce le principali problematiche relative alla gestione e al controllo di un processo innovativo per la oxy-combustione di carbone. Queste problematiche sono aggravate dalla ostilità dell'ambiente di processo, che impedisce l'installazione di una efficiente rete sensoristica dedicata sia alla diagnostica, che ai sistemi di controllo e regolazione.

D'altra parte, la mancanza di sensoristica adatta, impedisce di approfondire la conoscenza del complesso processo di combustione realizzato nel reattore. Questa problematica è stata in parte risolta con la metodologia diagnostica ODC. L'acquisizione ad alta frequenza della chemiluminescenza di reazione, ed l'interpretazione delle dinamiche del segnale corrispondente, ha mostrato una buona efficacia a osservare ed interpretare i processi di combustione. L'estrazione dell'informazione dal segnale ottico, ha permesso l'individuazione di fluttuazioni di "singoli" eventi combustivi e l'identificazione di questi come indicatori dello stato medio del processo di combustione.

Gli algoritmi usati per estrarre le informazioni dai segnali luminosi e produrre quelli che sono stati chiamati indicatori sintetici, sono semplici e veloci e pertanto sono in grado di fornire una diagnostica efficiente del processo di oxy-combustione nella sua complessità. Inoltre va notato che la tecnica di analisi ha capacità diagnostiche consistenti già sugli eventi precursori e pertanto è efficace anche nella fase di incipienza di possibili andamenti indesiderati. Questa diagnosi ha evidenziato che la presenza di zone ad alta reattività in prossimità della testa del reattore, con processi di combustione di tipo diffusivo, condiziona pesantemente il processo, a valle, che è ipoteticamente una combustione di volume (senza fiamma).

Questo aspetto dall'analisi diagnostica, basato sull'uso degli indicatori sintetici, può essere esteso e approfondito al fine di implementare sistemi di controllo più efficaci per la regolazione del processo ed estenderne, quindi, il suo range di funzionamento.