



Ricerca di Sistema elettrico

Identificazione di Fenomeni Precursori di Instabilità Termo-Acustiche con il Sistema ODC Basato su Segnali UV/NIR

E. Giuliotti, C. Stringola, E. Giacomazzi, M.L. Grilli, A. Piegari

Report RdS/PAR2016/186

IDENTIFICAZIONE DI FENOMENI PRECURSORI DI INSTABILITA' TERMO-ACUSTICHE CON IL SISTEMA ODC BASATO SU SEGNALI UV/NIR

E. Giulietti, C. Stringola, E. Giacomazzi, M.L. Grilli, A. Piegari (ENEA, DTE-PCU-IPSE)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Progetto B2- "Polo Tecnologico del Sulcis: tecnologie e metodologie 'low carbon' e edifici ad energia quasi Zero (nZEB)"

PARTE A1-SISTEMI AVANZATI DI MONITORAGGIO E DIAGNOSTICA PER LA COMBUSTIONE E LA RILEVAZIONE DI "CO2 LEAKAGE"

Ob. b.1: Sviluppo di sistemi di monitoraggio della combustione

Task 1- Sperimentazione del sensore ottico ODC per la valutazione di condizioni di instabilità di combustione

Responsabile del Progetto: Dott.ssa Franca Rita Picchia, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 LE PROBLEMATICHE ATTUALI DI LOAD E FUEL FLEXIBILITY PER I TURBOGAS.....	5
2 DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SVOLTA	5
2.1 LA TECNICA ODC DELL'ENEA.....	5
3 CRITERIO DI CHU PER LE INSTABILITÀ TERMOACUSTICHE.....	12
4 CRITERIO DELLA CROSS-CORRELAZIONE	14
5 PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI FILTRI OTTICI	15
5.1 FILTRI OTTICI NEL RANGE UV-VIS	15
5.2 FILTRO OTTICO NEL RANGE NIR.....	21
6 SET-UP SPERIMENTALE SU ROMULUS E TEST-MATRIX	21
7 ANALISI PRELIMINARE: RUMORE EMESSO DALLA CAPP A DI ASPIRAZIONE E DAL PILOTA	25
8 RISULTATI DELLE PROVE CON I FILTRI PASSA-BANDA A 300-550 NM NELLA LINEA UV-VIS	26
8.1 SEGNALI ACQUISITI	26
8.2 CONDIZIONE AD ALTO RUMORE ACUSTICO	27
8.3 CONDIZIONE A BASSO RUMORE ACUSTICO	29
9 RISULTATI DELLE PROVE SENZA I FILTRI PASSA-BANDA NELLA LINEA UV-VIS	30
9.1 SEGNALI ACQUISITI	30
9.2 CONDIZIONE AD ALTO RUMORE ACUSTICO	31
9.3 CONDIZIONE A BASSO RUMORE ACUSTICO	33
10 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO COMET-HP E DELL'APPARATO SPERIMENTALE	34
11 RISULTATI DELLE PROVE SULL'IMPIANTO COMET-HP	36
11.1 SEGNALI ACQUISITI	36
11.2 ANALISI SPETTRALE	38
11.3 ANDAMENTO DEGLI INDICI DI INSTABILITÀ	41
12 CONCLUSIONI.....	45
13 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	46
13 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	47

Sommario

Il monitoraggio continuo della combustione e l'identificazione in tempo reale dei fenomeni precursori di *instabilità*, ed il controllo (passivo, attivo, reattivo) della 'combustion dynamics', sono temi molto importanti per i produttori e utilizzatori di TurboGas (TG). Risulta quindi strategico studiare, attraverso la diagnostica avanzata, i fenomeni di instabilità, in particolare termo-acustica legata alla variabilità di carico e di composizione del combustibile durante l'esercizio. Di conseguenza risulta fondamentale mettere a punto sensori robusti ed affidabili in grado di rilevare le instabilità in tempo reale, oltre che mettere a punto sistemi di acquisizione e analisi dati robusti.

Per questo motivo l'attività dell'ENEA si è rivolta all'ulteriore miglioramento del sistema ottico ODC (*Optical Diagnostics of Combustion*), brevetto ENEA, volto al monitoraggio in tempo reale della combustione in bruciatori convenzionali e per Turbine a Gas tramite software di gestione sviluppato in ambiente LabVIEW della National Instruments. In particolare l'attività di sviluppo prevista nell'annualità era finalizzata alla definizione di un indice di stabilità più generale di quello classico di Rayleigh per una migliore identificazione di fenomeni precursori di instabilità. Sono state apportate modifiche h/w e s/w del sistema ODC ed eseguiti test sperimentali su due diverse facility, il test rig ROMULUS, realizzato nell'ambito di questo progetto, e l'impianto ENEA COMET-HP. In particolare, sono stati affrontati i seguenti punti:

1. la parte sensoristica ODC è stata ampliata con l'aggiunta di una linea NIR (Near InfraRed) operante prevalentemente nel range 900-2.570 nm per l'implementazione di un ulteriore indice di instabilità;
2. sono stati progettati, realizzati ed integrati dei filtri ottici passa-banda
 - a. nel range 300-1000 nm con elevata trasmissione nel range 300-550 nm e bloccaggio della radiazione nel range 550-1000 nm per il sensore ottico UV-VIS,
 - b. e un filtro passa-alto con elevata trasmissione nel range 900-2.600 nm e bloccaggio a lunghezze d'onda minori di 900 nm per il sensore ottico NIR,
 con l'obiettivo di selezionare con certezza solo il range d'interesse;
3. è stata realizzata ed integrata l'analisi di correlazione tra le fluttuazioni del rilascio di calore (componente UV-VIS) e quelle di temperatura (componente NIR);
4. il sistema è stato sperimentato all'ENEA presso la facility di laboratorio ROMULUS contribuendo alla caratterizzazione del bruciatore stesso;
5. il sistema è stato inoltre sperimentato all'ENEA presso la facility dell'impianto COMET-HP consentendo l'analisi dei dati derivanti da regimi di combustione instabile e permettendo il confronto tra i vari indici da utilizzare per il monitoraggio.

1 Le problematiche attuali di load e fuel flexibility per i TurboGas

Due importanti obiettivi della ricerca che si effettua sull'efficienza degli impianti di produzione elettrica sono ampliare la *flessibilità di carico* (*load flexibility*) e la *flessibilità nell'uso di combustibili* non tradizionali (*fuel flexibility*).

- a) Tra le tecnologie di conversione da fonte fossile, i TurboGas a ciclo semplice presentano la più elevata *flessibilità di carico*, requisito indispensabile per compensare le fluttuazioni di potenza associate alle rinnovabili non programmabili, che li rende pertanto strategici per lo sviluppo ed il supporto del futuro sistema energetico "low carbon" e delle criticità introdotte nella gestione della rete elettrica.
- b) La crescente produzione elettrica da rinnovabili, programmabili e non, oltre al requisito della flessibilità di carico, pone il problema della *flessibilità di combustibile*, dovuta sia alla crescente globalizzazione del mercato dei combustibili già in atto, sia all'immissione nell'infrastruttura di rete di combustibili gassosi di provenienza "extra-giacimento" (digestori, power2gas, gassificazione del carbone e/o biomasse, LNG).

La combustione premiscelata di gas naturale (NG) o di syngas idrogenati, derivanti dalla gassificazione di carbone, è affetta da problematiche legate alla instabilità di combustione, ed in particolare alla carenza, e quindi alla necessità, di sviluppo di diagnostica adeguata per il monitoraggio ed il controllo, nonché di metodi numerici avanzati di simulazione per la progettazione, e la loro validazione.

La variabilità nella composizione del combustibile può indurre fenomeni di *instabilità di combustione* con conseguenti possibili rotture e fermi di impianto, che si traducono in penalizzazioni in termini di costi, sicurezza e disponibilità del sistema di conversione.

Inoltre si può affermare che la maggior parte dell'energia utilizzata dalla società industriale viene attualmente prodotta bruciando combustibili fossili in impianti a motori termici, alla cui famiglia appartengono anche le Turbine a Gas (TG). Le fonti energetiche convenzionali tenderanno quindi a conservare il loro ruolo predominante anche per i prossimi decenni. E infatti la discontinuità e/o la scarsa concentrazione di potenza delle fonti rinnovabili, come l'energia eolica e solare, non permettono allo stato attuale, come in un prossimo futuro, di fronteggiare la crescente domanda mondiale di energia elettrica.

2 Descrizione dell'attività svolta

2.1 La tecnica ODC dell'ENEA

La metodologia diagnostica ODC (*Optical Diagnostics of Combustion*) sviluppata in ENEA ([1],[2],[3],[4]) è basata sull'analisi delle emissioni ottiche e permette anche di individuare, nel loro stato di incipienza, anomalie funzionali sia di tipo fluidodinamico che termoacustico, in quanto riesce ad osservare, discriminandoli, i fenomeni precursori di questi, consentendo in tal modo un tempestivo intervento sul processo.

Il sistema ha un basso livello di intrusività, necessita di accessi ottici con diametro dell'ordine dei 5 mm, e gode di una elevata immunità verso la rumorosità elettromagnetica, l'aggressività chimica e l'alta temperatura di operazione. Il processo viene osservato con sonde ottiche passive, chimicamente inerti ed operative fino ai 1800°C. Per queste sue caratteristiche esso si mostra particolarmente adatto al monitoraggio di camere di combustione in impianti energetici (Turbogas) o di trattamento termico (ad esempio impianti siderurgici).

Lo strumento ODC, e le metodologie in esso implementate, permettono di monitorare, analizzare e diagnosticare in tempo reale lo stato di instabilità fluidodinamica e termoacustica di un processo di

combustione, cosa necessaria per realizzare un efficiente sistema di controllo che permette di risolvere le interattività, anche temporali, tra le due fenomenologie.

Misure sperimentali precedentemente effettuate hanno mostrato che l'ODC fornisce le stesse informazioni in frequenza ottenute con la tecnica LDA (*Laser Doppler Anemometry*) (**Figura 1**) [5], e che il segnale di luminosità può quindi essere usato nella diagnostica delle instabilità di combustione ([6], [7], [8]).

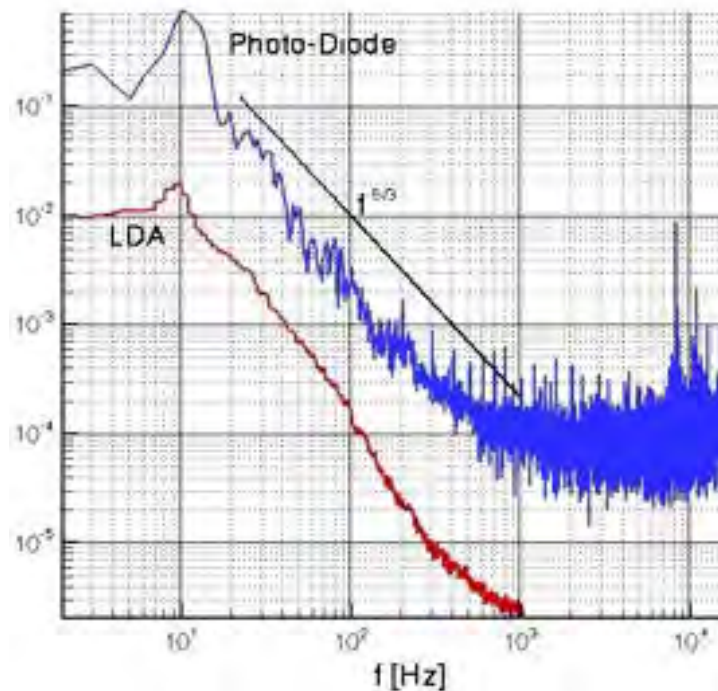


Figura 1: Confronto LDA e ODC: spettro di energia cinetica (LDA) e spettro di energia radiante (ODC tramite un fotodiodo).

I vantaggi che si hanno nell'utilizzare questa metodologia, che sfrutta in maniera adeguata le proprietà di un sensore ottico, sono:

1. il segnale in uscita è direttamente proporzionale alla luminosità del fenomeno e quindi alla reazione che sta avvenendo istantaneamente;
2. l'elevata risposta in frequenza (banda passante da 0 a 100 kHz) lo rende efficace per avere informazioni, in tempo reale, circa la cinetica-chimica, e per l'individuazione delle fenomenologie collegate con l'instabilità sia termo-acustica che fluido-dinamica;
3. l'utilizzo di *teste ottiche in zaffiro monocristallino* (**Figura 2**) rende la tecnica non intrusiva e permette un'osservazione diretta del processo combustivo (non c'è bisogno di finestre di quarzo appositamente progettate) tramite l'utilizzo di flange forate nelle camere di combustione;
4. è un sistema capace di discriminare e riconoscere gli eventi precursori dei fenomeni di instabilità.

Il processo viene osservato attraverso le emissioni ottiche prodotte dalle fenomenologie implicate. La trasduzione da segnale ottico a segnale elettrico integrato viene effettuata da un sensore ottico APD (*Avalanche PhotoDiode*) per il campo UV-VIS, e da un sensore Amplified InGaAs per il campo NIR. Questa procedura permette un elevato grado di conservazione del contenuto informativo del segnale, perché le fenomenologie di interesse, collegate alle sole fluttuazioni del segnale ottico, si distribuiscono su bande spettrali distinte: fenomeni *fluidodinamici* (grandi vortici) si limitano ad una banda della PSD (*Power Spectral Density*) in bassa frequenza, mentre quelli *chimici* occupano bande in alta frequenza, nella zona intermedia si possono, nei casi più stabili, anche riscontrare i processi di decadimento inerziale che si sviluppano con pendenza caratteristica $-5/3$ (Kolmogorov) ben nota dalla teoria (**Figura 1**).

Il segnale osservato è ottico e pertanto può essere guidato verso il sensore tramite l'uso di *fibre ottiche*: questo permette di garantire una elevata immunità all'ostilità dell'ambiente di processo (alta temperatura, elevate vibrazioni meccaniche).



Figura 2: Testa ottica con fibra di zaffiro monocristallino ($\Phi = 2 \text{ mm}$) in un tubo protettivo di allumina ($\Phi \approx 5 \text{ mm}$).

Il segnale trasdotto viene campionato ad alta frequenza ($20 \text{ kHz} \div 1 \text{ MHz}$). La successiva integrazione e mediatura del segnale permette di abbattere sensibilmente il rumore di misura, senza perdita di informazione.

La capacità di risolvere in frequenza e nel tempo i segnali acquisiti, ha permesso di implementare sistemi capaci di individuare sfasamenti temporali delle strutture vorticosse complesse dei gas combusti permettendone di stimare le loro velocità di trasporto [9]. La tecnica ha quindi permesso di mettere a punto sistemi anemometrici capaci di fornire una stima molto accurata di velocità in tempo reale.

Grazie alla potenzialità della tecnica ODC è possibile implementare configurazioni delle sonde per ottenere informazioni particolari sullo stato dinamico del processo di combustione in atto [2].

Una volta accertata per via teorica, numerica e sperimentale "l'intercambiabilità" fra gli spettri d'energia cinetica e radiante, la comparsa di deformazioni nello spettro del segnale fornito da una sonda ottica esposta alla fiamma, si prospetta come criterio per la diagnostica in tempo reale delle instabilità di combustione [8] e delle eventuali indesiderate pulsazioni della formazione di specie chimiche radicaliche.

La catena di misura utilizzata su ROMULUS comprende due rami, ognuno dei quali è configurato come in **Figura 3** (si può vedere la **Figura 15** per avere anche un'idea dello schema completo):

1) Sonda ottica ODC in zaffiro con rivestimento esterno in allumina.

A valle della sonda ottica una **fibra ottica biforcuta** suddivide il segnale in due rami paralleli, uno per il range UV-VIS, e l'altro per il range NIR: ad un canale si applica un filtro ottico passa-banda, nel range UV-VIS 300-550 nm, per il monitoraggio della *chemiluminescenza* prodotta dal fronte di fiamma, all'altro un passa-alto, nel range NIR 900-2.600 nm, per il rilievo del segnale infrarosso. In questa maniera i segnali che giungono ai sensori ottici osservano esattamente la stessa area della fiamma e sono campionati in maniera perfettamente sincronizzata.

2) Fibre ottiche in quarzo ("fused silica") con il core di 1 mm, connettori SMA-905 ad entrambi i terminali, rinforzate in acciaio mediante un metal jacket, per un range di funzionamento di lunghezza d'onda (λ) 200-1.000 nm per il **ramo UV-VIS, e 400-2.200 nm per il **ramo NIR**.**

3) Ruote porta-filtri variabili.

Durante l'esercizio di impianti industriali reali il carico termico presenta una forte variabilità durante l'arco della giornata, quindi varia molto la portata del combustibile e di conseguenza l'energia radiante emessa spontaneamente dalla fiamma del combustore. Per sopperire a problemi legati alla saturazione del sensore ottico si ha la necessità, in determinate condizioni di funzionamento, di attenuare il segnale luminoso attraverso un filtro ottico neutro. Ciò viene ottenuto attraverso la gestione di una ruota porta-filtri che seleziona l'opportuno filtro legato alla condizione operative di funzionamento dell'impianto. Tale ruota porta-filtri è dotata di un sistema motorizzato controllato direttamente dal software di gestione dell'ODC.

La ruota porta-filtri permette il collegamento con le fibre ottiche tramite un connettore SMA905. La possibilità di alloggiare **filtri ottici grigi** (neutri) e/o **filtri passa-banda** è fondamentale per controllare la qualità (o meglio l'ampiezza) del segnale ottico campionato, o per andare ad effettuare indagini mirate sullo studio dell'emissione spontanea di alcuni radicali (OH, CH, C₂, H₂CO) eliminando gli effetti di saturazione del segnale ottico.

a) Ruota per il campo UV-VIS

All'interno della **ruota porta-filtri per il campo UV-VIS** sono stati inseriti 11 filtri grigi che lavorano nel range **200-1.200 nm** e aventi *optical density* diversa (**Tabella 1**), mentre il primo alloggiamento è stato lasciato vuoto (attenuazione nulla) per consentire al sensore di avere il massimo del valore ottico proveniente dalla fiamma. I valori riportati in tabella sono valori medi nell'intervallo spettrale di interesse. La radiazione che non viene trasmessa rappresenta il livello di attenuazione.

Tabella 1: Elenco dei filtri inseriti nella ruota porta-filtri per il range UV-VIS (200-1.200 nm).

Posizione ruota	Optical Density (O.D.)	Attenuazione (A%)
1	/	/
2	0.04	10%
3	0.1	20%
4	0.3	50%
5	0.4	60%
6	0.5	68%
7	0.6	75%
8	0.7	80%
9	1.0	90%
10	1.3	95%
11	1.45	96.5%
12	2.0	99%

b) Ruota per il campo NIR

All'interno della **ruota porta-filtri per il campo NIR** sono stati inseriti 9 filtri grigi che lavorano nel range **800-2.600 nm** e aventi *optical density* diversa (**Tabella 2**), mentre il primo alloggiamento è stato lasciato vuoto (attenuazione nulla) per consentire al sensore di avere il massimo del valore ottico proveniente dalla fiamma.

Tabella 2: Elenco dei filtri inseriti nella ruota porta-filtri per il range NIR (800-2.600 nm).

Posizione ruota	Optical Density (O.D.)	Attenuazione (A%)
1	/	/
2	0.1	20%
3	0.2	37%
4	0.3	50%
5	0.4	60%
6	0.5	68%
7	0.6	75%
8	1.0	90%
9	1.3	95%
10	2.0	99%
11	/	/
12	/	/

4) Sensore ottici:

a) Sensore ottico APD ed elettronica di amplificazione per il range UV-VIS

1. Caratteristiche del sensore ottico APD:

- spectral response range (λ) = 200 to 1.000 nm
- diameter of effective active area (ϕ) = 3.0 mm

2. Caratteristiche dell'elettronica di amplificazione (con controllo da remoto) in cui è montato il sensore ottico:

- control voltage of gain = -0.2 ÷ +3.5 V
- frequency bandwidth (cut-off frequency, f_c) = DC÷100 kHz
- Noise equivalent power (NEP, at $f=100$ kHz and $\lambda=800$ nm) = 0.02 pW/Hz^{1/2}
- output = 0 ÷ - 10 V

Questo sensore ottico è utilizzato per captare la *chemiluminescenza* dei radicali OH* (~306 nm), CH* (~431 nm), C₂* (~516 nm), H₂CO* (~340 nm) e H₂O (~616 nm), che assumono maggiore importanza e intensità nel campo di lunghezze d'onda compreso tra ~300 nm e ~600 nm, e quindi le dinamiche della fiamma relative alle fluttuazioni del *rilascio di calore*.

b) Sensore ottico ed elettronica di amplificazione per il range NIR

1. Caratteristiche del sensore ottico Amplified InGaAs Detector:

- spectral response range (λ) = 900 to 2.570 nm
- diameter of effective active area (ϕ) = 1.0 mm

2. Caratteristiche dell'elettronica di amplificazione (con controllo manuale) in cui è montato il sensore ottico:

- gain adjustment = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 dB
- bandwidth filter adjustment = 0.5, 1, 5, 10, 20, 100, 500, 1000 kHz
- maximum output = +10 V

Questo sensore ottico è utilizzato per captare le fluttuazioni di *temperatura*, che avvengono nel campo IR.

E' importante notare che questi due sensori ottici forniscono valori di tensione in uscita in controfase (ovvero sfasati di 180°), ossia all'aumentare del segnale luminoso in ingresso il primo sensore ottico (operante nel range UV-VIS) fornisce un segnale positivo che aumenta, mentre il secondo (operante nel range NIR) fornisce un segnale negativo che diminuisce.

I due sistemi UV-VIS e NIR sono collegati alla stessa scheda di acquisizione (DAQ) che provvede a campionare i due segnali in maniera perfettamente sincronizzata.

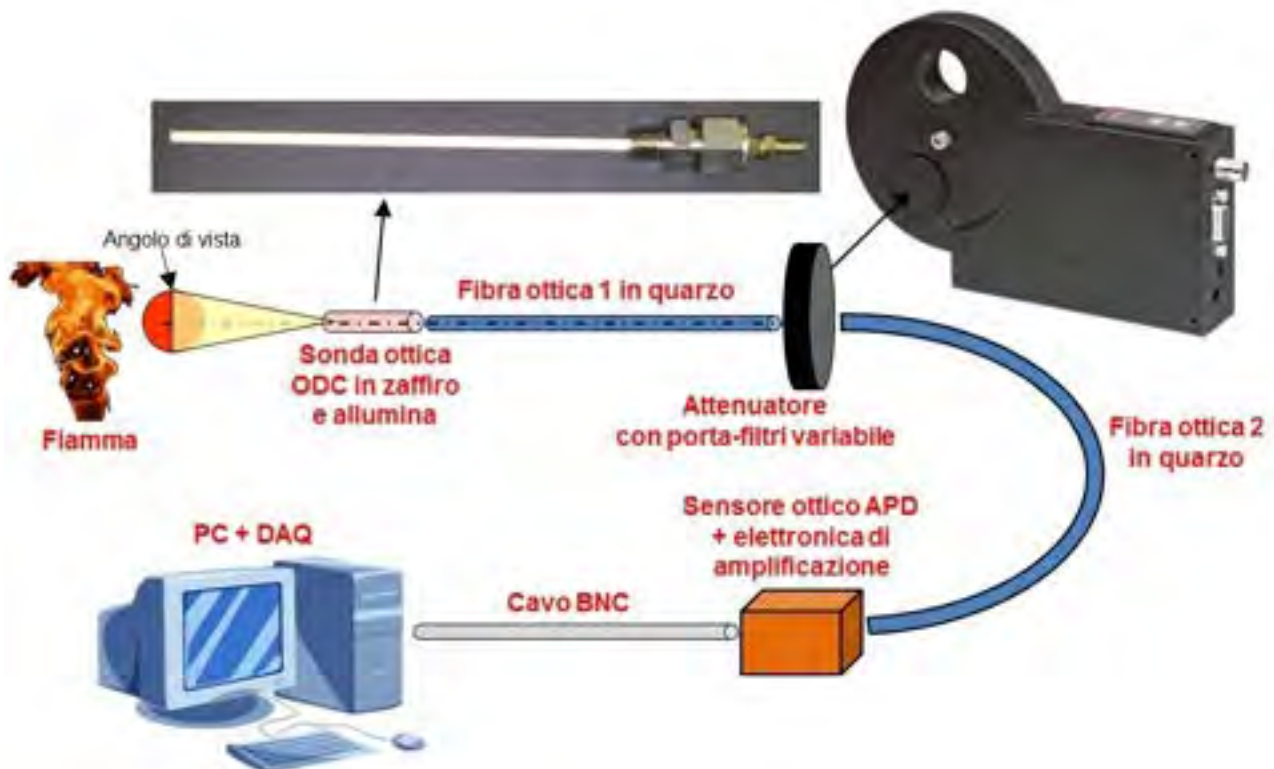


Figura 3: Schema della catena di misura per un singolo ramo della tecnica ODC [4].

5) Scatole ATEX

Per rispettare i vincoli di sicurezza industriali il sistema è stato posizionato all'interno di una scatola ATEX che ne garantisce l'incolumità e la compattezza (**Figura 4**).

Le **scatole ATEX** utilizzate sono contenitori a parete della Schneider Electric, Spacial S3DEX (codice costruttore: NSYS3DEX4320), avente le seguenti caratteristiche:

- contenitore in lamiera d'acciaio con sportello;
- dimensioni esterne di 400 x 300 x 200 mm,
- grado di protezione **IP66** senza foratura (conforme alla Commissione Internazionale Elettrotecnica IEC standard 60529),
- resistenza agli impatti meccanici esterni **IK10** (conforme alla IEC standard 62262),
- certificazione area pericolosa **ATEX II 2 GD Ex** e **IIC Gb Ex tb IIIC Db** secondo la direttiva 94/9/EC.



Figura 4: Contenitori ATEX all'interno dei quali sono posizionati i sistemi ODC con la ruota porta-filtri per i range UV-VIS e NIR.

3 Criterio di Chu per le instabilità termoacustiche

Il classico criterio per studiare le instabilità termo-acustiche è il **Criterio di Rayleigh** che consiste nella seguente equazione integrale (un integrale doppio, di volume e nel tempo τ di una finestra di osservazione)

$$\int_V \int_0^\tau p_1 \dot{\omega}_T^1 dt dV > 0$$

Secondo tale criterio una instabilità termo-acustica si verifica nel momento in cui la fluttuazione di pressione (p_1) è in fase con quella del *rilascio di calore* ($\dot{\omega}_T^1$).

Un altro criterio di instabilità è quello di *Chu* ([10],[11],[12]) che si può approssimare con

$$\int_V \int_0^\tau T_1 \dot{\omega}_T^1 dt dV > 0$$

Il valore di tale integrale è detto **“indice di instabilità di Chu”**.

Si noti che l'integrale del prodotto tra le fluttuazioni del rilascio di calore ($\dot{\omega}_T^1$) e della temperatura (T_1) è esteso all'intero volume (V) della camera di combustione, e l'instabilità termo-acustica secondo il *Criterio di Chu* si verifica quando queste due grandezze risultano essere in fase.

Si possono fare alcune osservazioni sullo studio di questi fenomeni, dalle quali seguono diverse possibili approssimazioni utili per la realizzazione di una sonda ottica per il loro monitoraggio su scala industriale.

- 1) Le fluttuazioni del *rilascio di calore* ($\dot{\omega}_T^1$) sono correlate alle fluttuazioni della *chemiluminescenza* dei radicali, e quindi alle fluttuazioni dell'intensità luminosa (I_{1_UV-VIS}) nel campo UV-VIS dell'emissione della fiamma.**

La *chemiluminescenza* (I_{ch}) è la produzione di luce, o meglio l'emissione di radiazione elettromagnetica, in particolare nel visibile (VIS) fino al vicino infrarosso (NIR), che può accompagnare una reazione chimica. Per quanto riguarda le fiamme prodotte da idrocarburi è soprattutto il contributo dei *radicali* nel campo UV-VIS che dà luogo alla *chemiluminescenza* e quindi all'energia luminosa radiante emessa spontaneamente.

Alcuni studi hanno dimostrato che la *chemiluminescenza* (I_{ch}) emessa spontaneamente da una fiamma magra di idrocarburi è proporzionale al *rilascio di calore* ($\dot{\omega}_T^1$) ([13], [14], [15] § 16). Solo se il *rapporto di equivalenza* (Φ) di una fiamma risulta essere costante, si ha che la relazione tra la *chemiluminescenza* e il *rilascio di calore* è perfettamente lineare ([16],[10]), mentre normalmente varia in maniera proporzionale ma con una legge di potenza, e quindi in maniera non lineare.

Da tutto ciò segue che il *rilascio di calore* è proporzionale all'energia radiante emessa dai radicali nel campo UV-VIS.

- 2) Le fluttuazioni della *temperatura* (T_1) sono correlate alle fluttuazioni relative all'intensità luminosa (I_{1_IR}) nel campo IR dell'emissione termica della fiamma.**

La luce emessa da una fiamma può essere prodotta da due meccanismi [5]: una emissione di *chemiluminescenza* (I_{ch}) associata, come visto, alle specie dei radicali eccitati, e un'altra associata all'*emissione termica* (I_{th}) secondo la *legge di Planck* ([17],[18]).

La *legge di Planck* $I_B(\lambda, T)$ fornisce la forma dello spettro di un *corpo nero* ed è espressa da una legge non lineare rispetto alla temperatura T .

In prima approssimazione possiamo assumere una fiamma e i suoi gas caldi combustibili prodotti come un *corpo grigio* il cui comportamento è possibile ricondurre a quello di un *corpo nero* semplicemente moltiplicando la *legge di Planck* per l'emissività ([19],[20]): $I_{th}(\lambda, T) = I_B(\lambda, T) \varepsilon_\lambda$

- 3) Il termine dell'integrale: non l'integrale del prodotto, ma il prodotto degli integrali**

E' sperimentalmente impossibile rilevare puntualmente i due segnali q' e T' su ogni punto di tutto il volume interno della camera di combustione per calcolarne prima il prodotto e poi farne l'integrale,

quindi si è costretti a sostituire la corretta espressione con il prodotto tra gli integrali di ciascuna grandezza calcolati separatamente.

4) L'estensione degli integrali: non su tutto il volume della camera, ma sul fronte di fiamma

E' sperimentalmente impossibile estendere gli integrali all'intero volume della camera di combustione, quindi si è costretti a riferirsi al solo volume dove il rilascio di calore è diverso da zero, ossia alla zona di reazione del *fronte di fiamma* (V_{ff}). Il volume inquadrato dalla tecnica ODC, che non è quello di tutta la camera di combustione, può permettere in via approssimativa di rilevare correttamente le dinamiche dell'intera fiamma se inquadra e campiona la zona di reazione. Poiché la *chemiluminescenza* proviene dalla sola fiamma, questo vincolo è automaticamente rispettato per quanto riguarda il rilascio di calore, monitorato tramite l'emissione UV-VIS. Non è così invece per quanto riguarda la temperatura, monitorata tramite l'emissione infrarossa NIR, cui partecipa l'intera massa gassosa (il contributo delle pareti è lentamente variabile e fornisce un contributo medio, e quindi è facilmente eliminabile tramite una acquisizione in modalità AC).

Si può quindi procedere, in maniera del tutto approssimativa e sperimentale, alla seguente semplificazione della forma integrale del *Criterio di Chu* in cui si considerano il *rilascio di calore* (approssimabile all'emissione della chemiluminescenza nel campo UV-VIS) e la *temperatura* (approssimabile all'emissione termica nel campo IR) sul medesimo dominio del fronte di fiamma (V_{ff}):

$$\begin{aligned} \int_V \int_0^\tau T_1 \dot{\omega}_T^1 dt dV &\cong \int_{V_{ff}} \int_0^\tau T_1 \dot{\omega}_T^1 dt dV_{ff} \cong \int_{V_{ff}} \int_0^\tau T_1 dt dV_{ff} \cdot \int_{V_{ff}} \int_0^\tau \dot{\omega}_T^1 dt dV_{ff} \\ &\cong \left(\int_{V_{ff}} \int_0^\tau I_{1_IR} dt dV_{ff} \right) \cdot \left(\int_{V_{ff}} \int_0^\tau I_{1_UV-VIS} dt dV_{ff} \right) \end{aligned}$$

Il monitoraggio dell'*indice d'instabilità di Chu*, può quindi svolgersi unicamente per via ottica e approssimativa, tramite un sistema a due canali:

1. uno sostanzialmente coincidente con un sistema ottico ODC sensibile all'emissione di **chemiluminescenza nel campo UV-VIS** (I_{ch_UV-VIS}) e quindi alle fluttuazioni del **rilascio di calore**;
2. l'altro coincidente con un sistema ottico ODC sensibile all'**emissione termica dell'infrarosso IR** (I_{th_IR}), vale a dire sulle oscillazioni di **temperatura** della fiamma T_1 .

A rigore nel calcolo dell'*indice di Chu* si dovrebbero contemplare i valori locali istantanei degli effettivi segnali del *rilascio di calore* e della *temperatura* (contributi fluttuanti). I campionamenti dei segnali disponibili tramite ODC riguardano invece la *chemiluminescenza* (I_{UV-VIS}) e l'*emissione infrarossa* (I_{IR}), rispettivamente legate al *rilascio di calore* e alla *temperatura* da leggi non lineari.

E' importante notare che la parte relativa all'integrazione volumetrica sul fronte di fiamma (V_{ff}) è svolta direttamente dalla fisica, ossia dal modo di operare dei sensori ottici, quindi l'*indice di Chu* si può ridurre in maniera approssimativa al valore dell'integrale temporale del prodotto tra la *chemiluminescenza* (I_{UV-VIS}) e l'*emissione infrarossa* (I_{IR}) in una finestra di campionamento τ (ad esempio di $\tau=1$ secondo).

4 Criterio della Cross-correlazione

Si definisce *cross-correlazione* (o *correlazione incrociata*, o semplicemente *correlazione*) tra i due segnali di energia, in generale complessi, $x(t)$ e $y(t)$ la quantità:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) y(t + \tau) dt = \int_0^{\tau} x(t) y(t + \tau_n) \frac{1}{\tau} dt$$

dove τ è la finestra di campionamento, e τ_n è lo sfasamento temporale in campioni.

La cross-correlazione si può quindi calcolare nel seguente modo:

- se il segnale $x(t)$ è complesso si deve trovare prima il suo complesso coniugato $x^*(t)$;
- traslare l'altro $y(t)$ di una quantità che è $\tau_n > 0$ se la traslazione avviene verso sinistra [$y(t + \tau_n)$];
- eseguire il prodotto tra i segnali così costruiti [$x^*(t) y(t + \tau_n)$];
- calcolare l'integrale del prodotto.

Considerando segnali a tempo discreto $x(n)$ e $y(n)$ in un arco temporale finito, per esempio tra 0 e $N - 1$, essi possono essere descritti da un vettore [$x(0), \dots, x(N - 1)$] e un vettore [$y(0), \dots, y(N - 1)$]. La convoluzione tra x e y è data dal vettore R_{xy} a $2N$ campioni dove:

$$R_{xy}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) y(k + n) \quad \text{con} \quad -N+1 \leq n \leq N-1$$

Nel nostro caso, andando a considerare ad esempio il segnale della *chemiluminescenza* (I_{UV-VIS}) e quello dell'*emissione infrarossa* (I_{IR}) che sono acquisiti contemporaneamente, possiamo scrivere che la cross-correlazione tra queste due grandezze è:

$$R_{UV-IR} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} I_{UV-VIS} I_{IR} dt$$

L'importanza della Cross-correlazione per la determinazione dell'insorgere dell'instabilità è già stata messa in risalto da parte degli autori in un precedente lavoro [6], ma ora si è cercato di ottenere un indice di cross-correlazione che considerasse anche il contributo dell'energia radiante emessa nel NIR.

5 Progettazione e realizzazione di filtri ottici

Per permettere alla tecnica ODC di operare correttamente sia nel range UV-VIS tra 300 e 550 nm, sia nel range IR tra 900 e 2600 nm, sono stati progettati e realizzati all'interno del nostro laboratorio alcuni filtri ottici interferenziali.

5.1 Filtri ottici nel range UV-VIS

Per quanto riguarda il funzionamento nel range ultravioletto-visibile, la radiazione deve essere trasmessa nell'intervallo 300-550 nm, ma contemporaneamente deve essere bloccata da 550 nm fino al vicino infrarosso, cioè a 1100 nm. Il range di lunghezze d'onda da coprire è molto ampio per un filtro interferenziale classico, nel quale la radiazione viene bloccata per riflessione. Tali filtri si basano su fenomeni di interferenza in strati di materiali dielettrici trasparenti e le bande di trasmissione e riflessione hanno una larghezza limitata. Per estendere queste zone si possono usare alcuni filtri in serie o sovrapporre diversi filtri sullo stesso substrato.

Un filtro di taglio passa-basso, costituito da una serie di strati dielettrici (coating), presenta zone di alta trasmissione e zone di alta riflessione del tipo mostrato in **Figura 5**. Tale filtro contiene 21 strati alternati di ossido di tantalio e ossido di silicio su un substrato di quarzo (diametro 0.5 pollici, spessore 2 mm) ed è stato progettato mediante un software commerciale (Optilayer) e realizzato con un impianto di deposizione per sputtering a radiofrequenza. La lunghezza d'onda di separazione (550 nm) tra le zone di elevata trasmissione ed elevata riflessione (o bloccaggio) è determinata dallo spessore degli strati, che deve essere accuratamente controllato durante la fabbricazione e che viene rapportato a una lunghezza d'onda di riferimento λ_0 (600 nm in **Figura 5**).

Per estendere la zona di riflessione e quindi di bloccaggio, come necessario per il sistema ODC, sono stati progettati diversi filtri interferenziali passa-basso con banda passante e banda di riflessione centrate a lunghezze d'onda via via crescenti, in modo da coprire il range di funzionamento richiesto mediante filtri in serie. Sono stati quindi realizzati altri quattro filtri da aggiungere in serie (**Figura 5 - Figura 9**) per operare da 300 nm a circa 1100 nm. I filtri 1, 2, 3 hanno la stessa struttura (materiali, numero e sequenza degli strati), ma con una lunghezza d'onda di riferimento λ_0 sempre maggiore e quindi spessori degli strati sempre più grandi. Lo spessore del coating per i filtri 1, 2 e 3 varia tra 1.7 e 2.2 micron. Il bloccaggio delle lunghezze d'onda minori di 280 nm è essenzialmente dovuto all'assorbimento dell'ossido di tantalio e non a fenomeni di interferenza. I filtri 4 e 5 sono invece più complessi e sono stati appositamente progettati per eliminare una banda di alta riflessione che, nella configurazione classica, si ripete a circa 1/3 della lunghezza d'onda di riferimento λ_0 , deteriorando in tal modo la banda di trasmissione (ad es. un filtro con $\lambda_0 = 990$ nm avrebbe una seconda banda di alta riflessione a circa 330 nm). Ciascuno dei filtri 4 e 5 è costituito da 61 strati di ossido di tantalio e ossido di silicio (spessore totale circa 2.6 micron) ed è ottenuto mediante la sovrapposizione sullo stesso substrato di gruppi di strati (stack) con una particolare sequenza degli spessori all'interno del singolo gruppo. Questa operazione è piuttosto delicata perché piccole variazioni possono dare origine ad alcuni picchi di riflessione o trasmissione non voluti. La differenza tra i due filtri è data soltanto dalla lunghezza d'onda di riferimento λ_0 . La fabbricazione di tali filtri comporta inoltre tempi più lunghi e controlli più accurati.

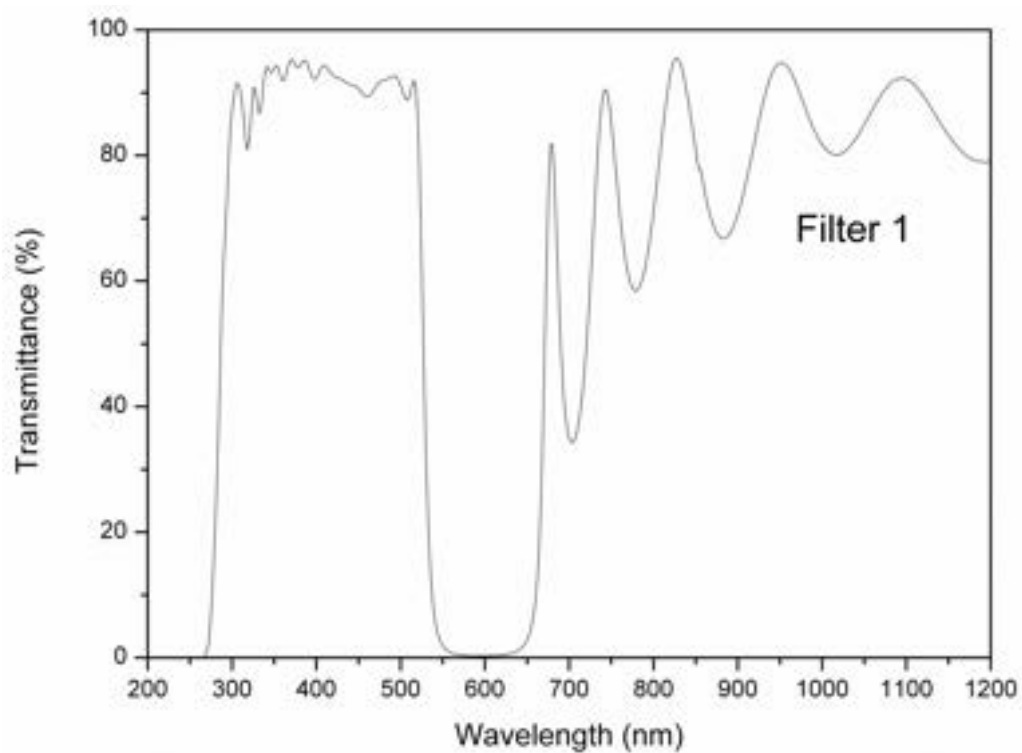


Figura 5: Trasmittanza misurata del filtro n. 1 in funzione della lunghezza d'onda.

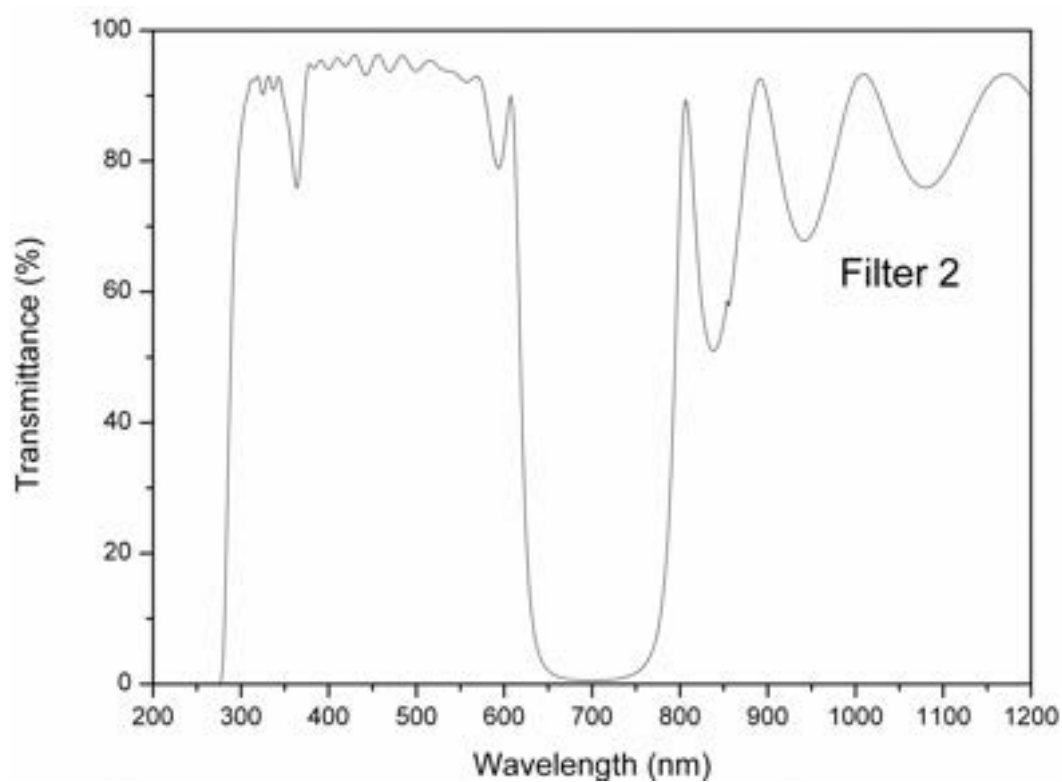


Figura 6: Trasmittanza misurata del filtro n. 2

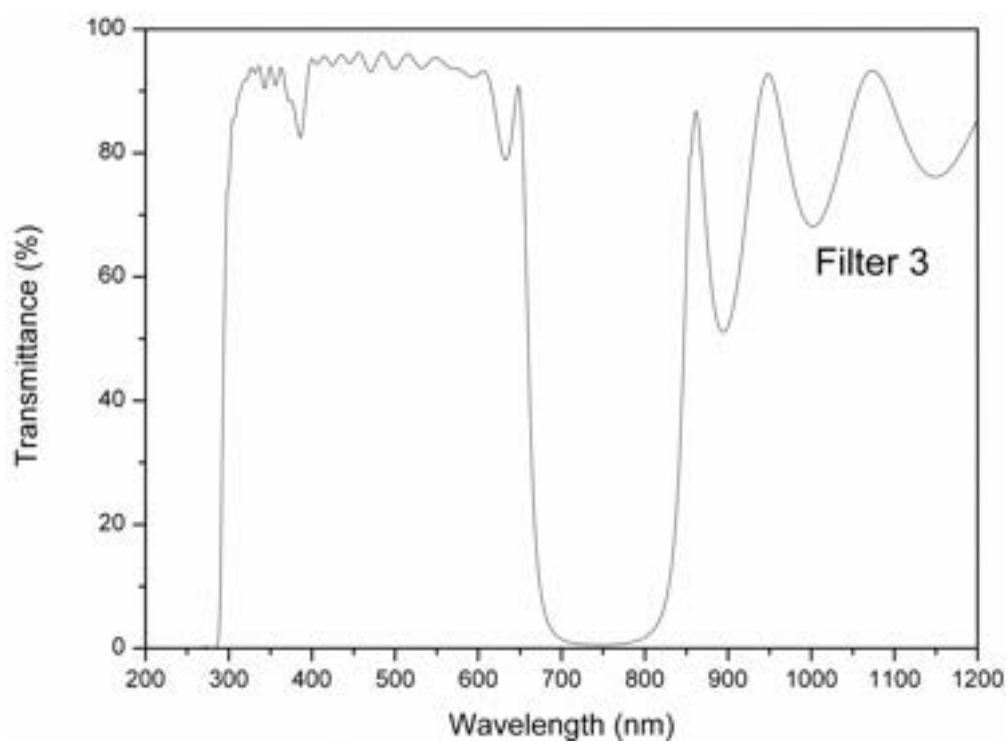


Figura 7: Trasmittanza misurata del filtro n. 3

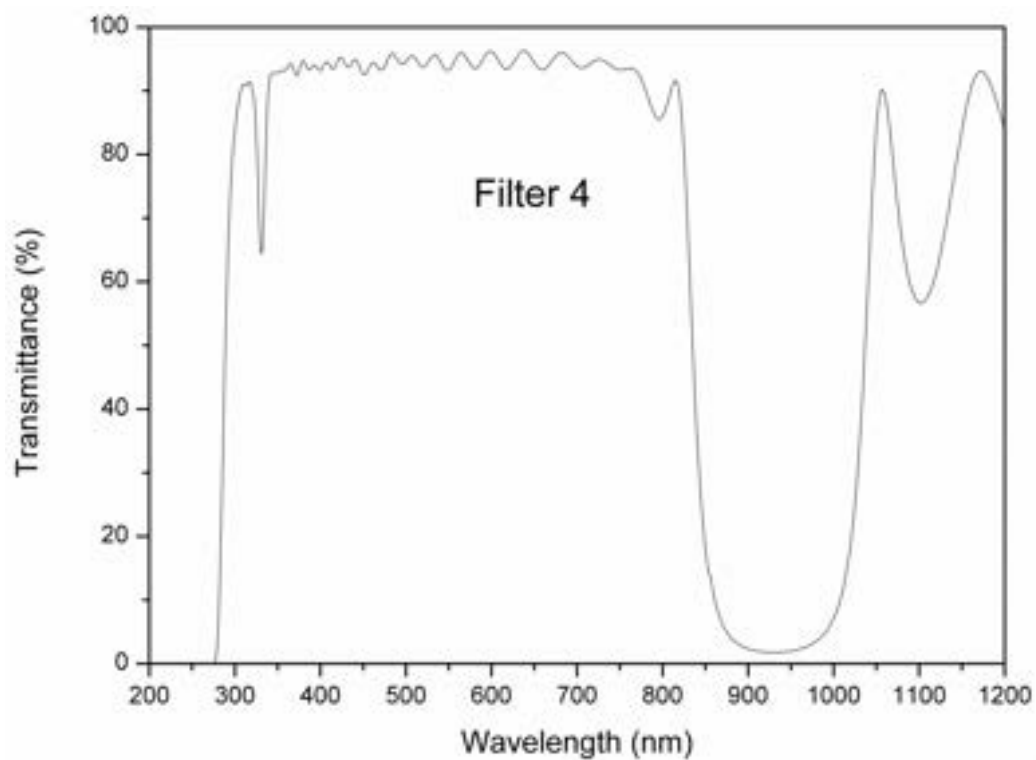


Figura 8: Trasmittanza misurata del filtro n. 4

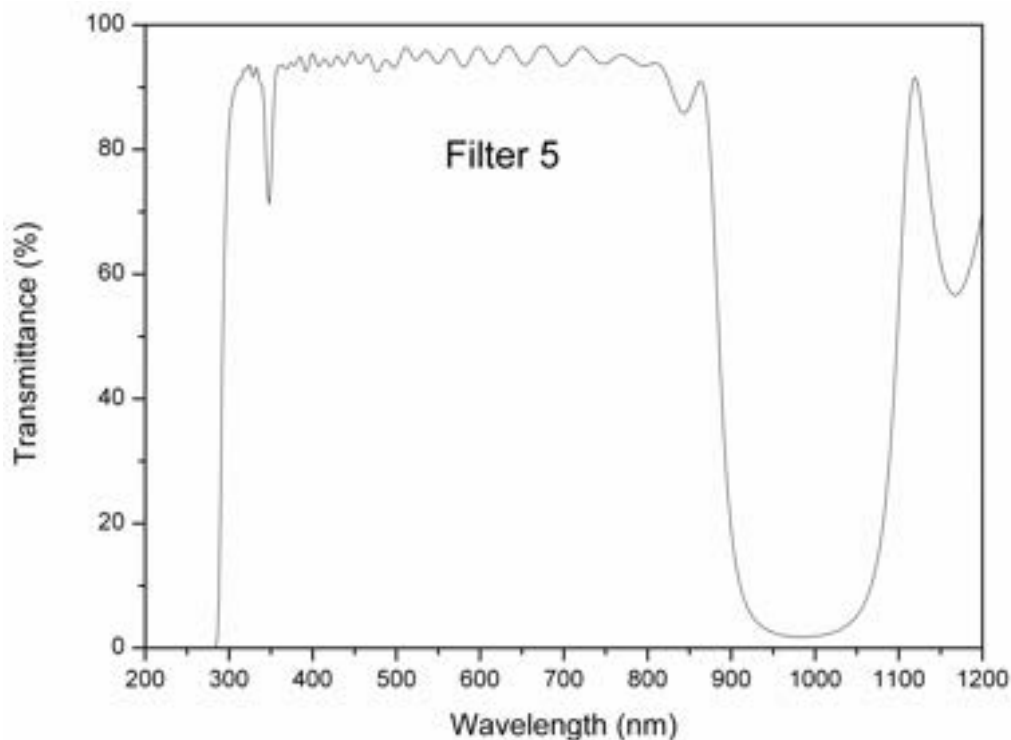


Figura 9: Trasmittanza misurata del filtro n. 5

L'utilizzo di vari filtri in serie in ogni caso causa un peggioramento del livello di trasmissione, nonché l'accentuarsi di alcuni picchi non desiderati nella curva spettrale, quindi è opportuno giungere a un compromesso tra il numero di filtri e il range di lunghezze d'onda di reale utilizzo. Alcune configurazioni dei filtri in serie sono mostrate in **Figura 10** e **Figura 11**, come da misure effettuate al variare del numero di filtri. La **Figura 11** riporta la misura di trasmittanza effettuata ponendo in serie tutti e cinque i filtri. Tutte le misure sono state effettuate con uno spettrofotometro commerciale.

Problemi aggiuntivi sono causati dalla dimensione geometrica dei filtri stessi perché in tal caso, cioè mettendo in serie cinque filtri con spessore di 2 mm, la distanza tra il sensore ottico e l'intestazione della fibra ottica risulta eccessiva, con una conseguente elevata attenuazione del segnale ottico. Si è deciso quindi di progettare e realizzare un unico filtro passa-basso con elevata trasmissione nel range 300-550 nm ed elevata riflessione nel range 600-1050 nm (**Figura 12**). Tale filtro (filtro 6) ha una sequenza di strati molto complessa, contiene 82 strati alternati di ossido di tantalio e ossido di silicio con spessori diversi uno dall'altro, ed è stato progettato utilizzando il software Optilayer e basandosi sull'esperienza nel settore. E' stato poi realizzato mediante deposizione per sputtering su un unico substrato e, data la bassa velocità di questo processo di deposizione e l'elevato numero di strati (lo spessore complessivo degli strati è circa 5.1 micron), la fabbricazione di quest' unico filtro ha richiesto diversi giorni.

Da notare che uno spessore così elevato per un coating interferenziale può provocare fenomeni di distacco dal substrato, se i materiali e le condizioni di deposizione non sono opportunamente scelti.

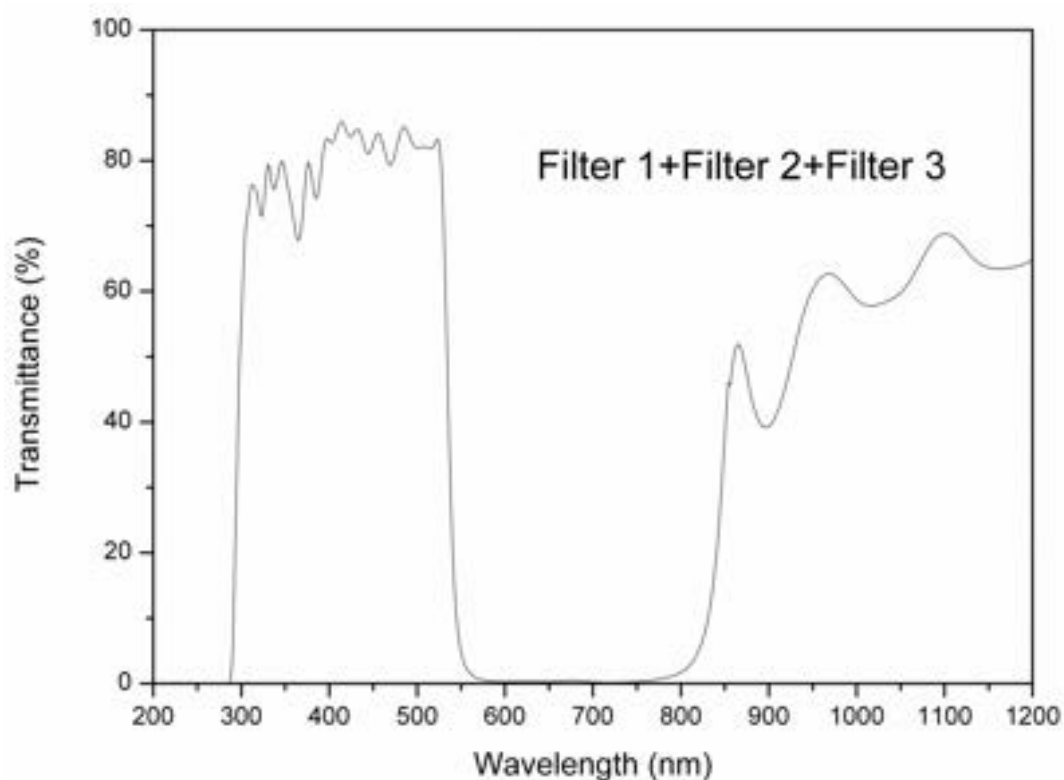


Figura 10: Trasmittanza del filtro risultante dalla sovrapposizione di tre filtri (Filter 1 + Filter 2 + Filter 3) centrati a lunghezza d'onda crescente.

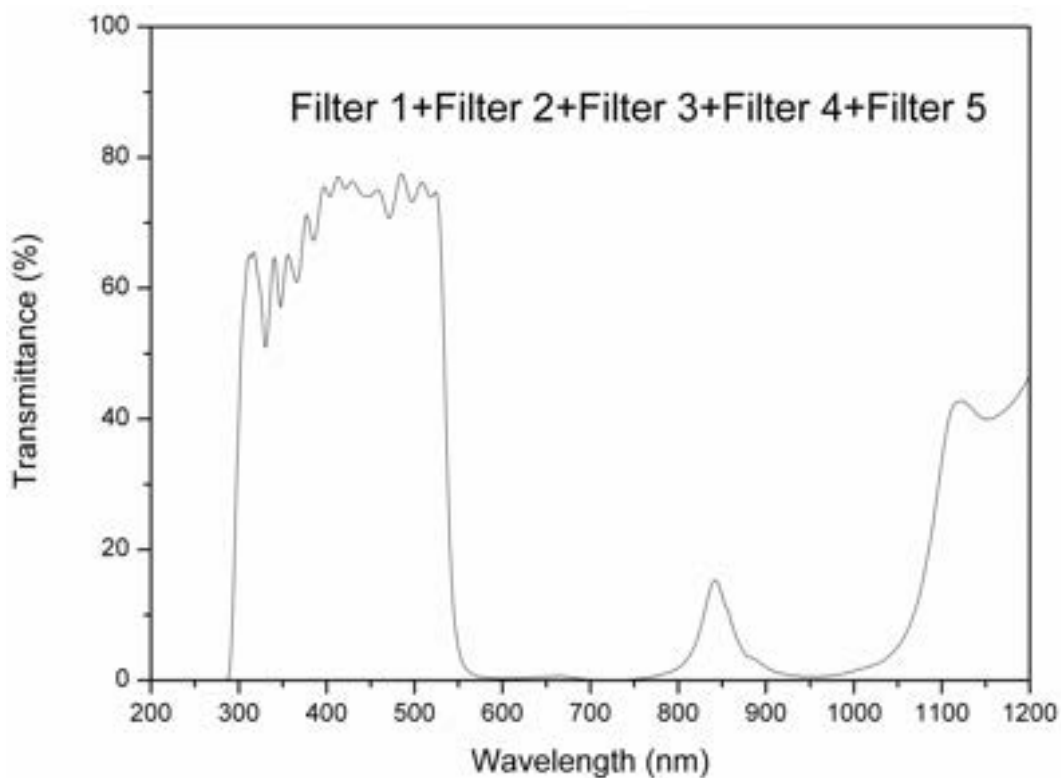


Figura 11: Trasmittanza del filtro risultante dalla sovrapposizione di cinque filtri (Filter 1 + Filter 2 + Filter 3 + Filter 4 + Filter 5) centrati a lunghezza d'onda crescente.

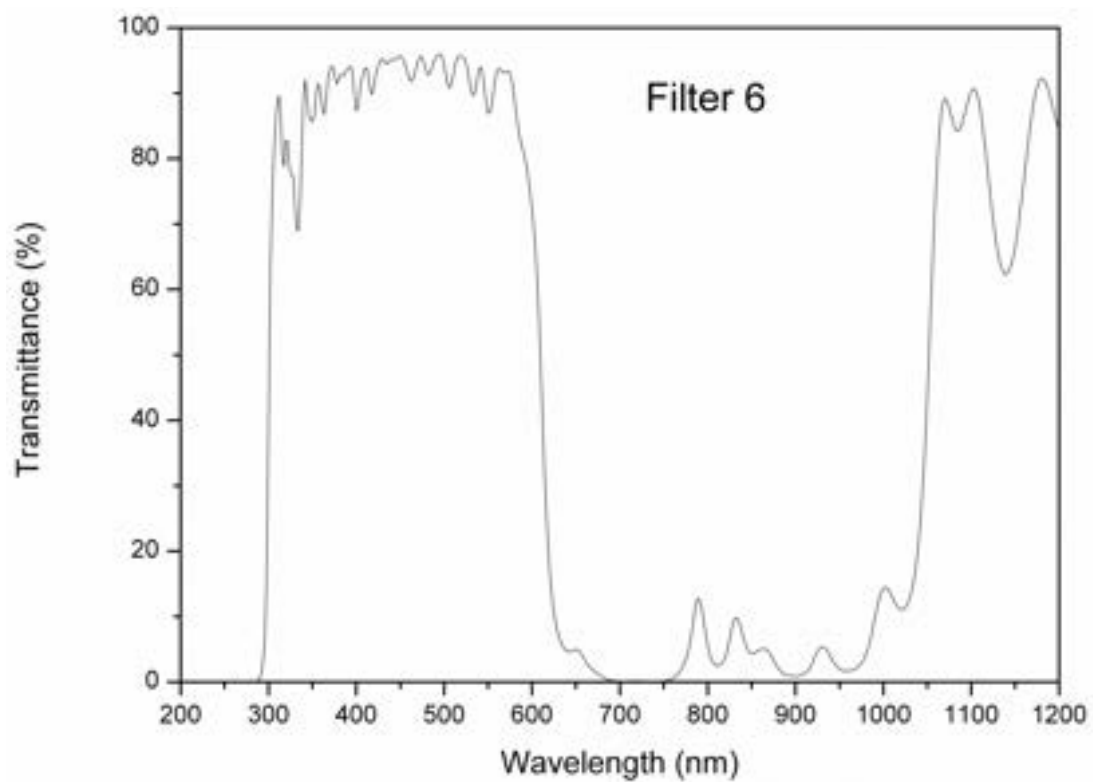


Figura 12: Trasmittanza misurata del filtro passa-basso (operante nel range 300-1100 nm) ottenuto con 82 strati su un substrato di quarzo.

5.2 Filtro ottico nel range NIR

Per quanto riguarda la linea di acquisizione nell'infrarosso è stato realizzato un filtro passa-alto (**Figura 13**) con elevata trasmissione nel range 900 - 2600 nm e bloccaggio al di sotto di 900 nm, quindi con un range di operazione molto ampio (300 - 2600 nm). In questo caso, per il bloccaggio della radiazione sono state sfruttate le proprietà del silicio che ha elevato assorbimento a lunghezze d'onda minori di 800 nm ed è trasparente per lunghezze d'onda più lunghe. Questa caratteristica è stata combinata con gli effetti dell'interferenza negli strati trasparenti. Il filtro contiene strati alternati di ossido di silicio e di silicio e, sfruttando l'assorbimento di quest'ultimo, si è potuto ridurre notevolmente il numero di strati rispetto al caso precedente. I due picchi di assorbimento che si notano a 1400 nm e 2200 nm sono dovuti al substrato di quarzo, mentre le oscillazioni nella zona di elevata trasmissione sono dovute a fenomeni di interferenza.

Figura 13: Trasmittanza misurata di un filtro passa-alto nel range 200-2600 nm, con taglio a 900 nm.

6 Set-up sperimentale su ROMULUS e test-matrix

Il bruciatore ROMULUS è un piccolo bruciatore a pressione ambientale la cui fiamma premiscelata principale è realizzata tramite una miscela di metano (CH_4) e aria, mentre la fiamma pilota, che tende a stabilizzare la fiamma, è una miscela di propano (C_3H_8) e aria (**Figura 14 e Figura 15**).

Poiché lo studio oggetto di questa sperimentazione consisteva nell'analisi dei limiti della tecnica ODC, nel caratterizzare la fiamma, e nell'indagare i regimi acusticamente instabili, si è provveduto a posizionare due *microfoni* (PRES1 e PRES2) lungo l'asse di uscita dei gas e una *testa ottica in zaffiro* capace di trasmettere i segnali di energia radiante a due *sistemi ODC* tramite l'utilizzo di una *fibra ottica biforcuta* e operante nel range di lunghezze d'onda 200-2.100 nm (**Figura 15**). In particolare il primo canale (ODC1) campiona il

segnale nel range UV-VIS 200-1.00 nm (che si riduce a 300-550 nm con l'aggiunta di un filtro passa-banda), mentre il secondo canale (ODC2) campiona il segnale nel range NIR 900-2.570 nm.

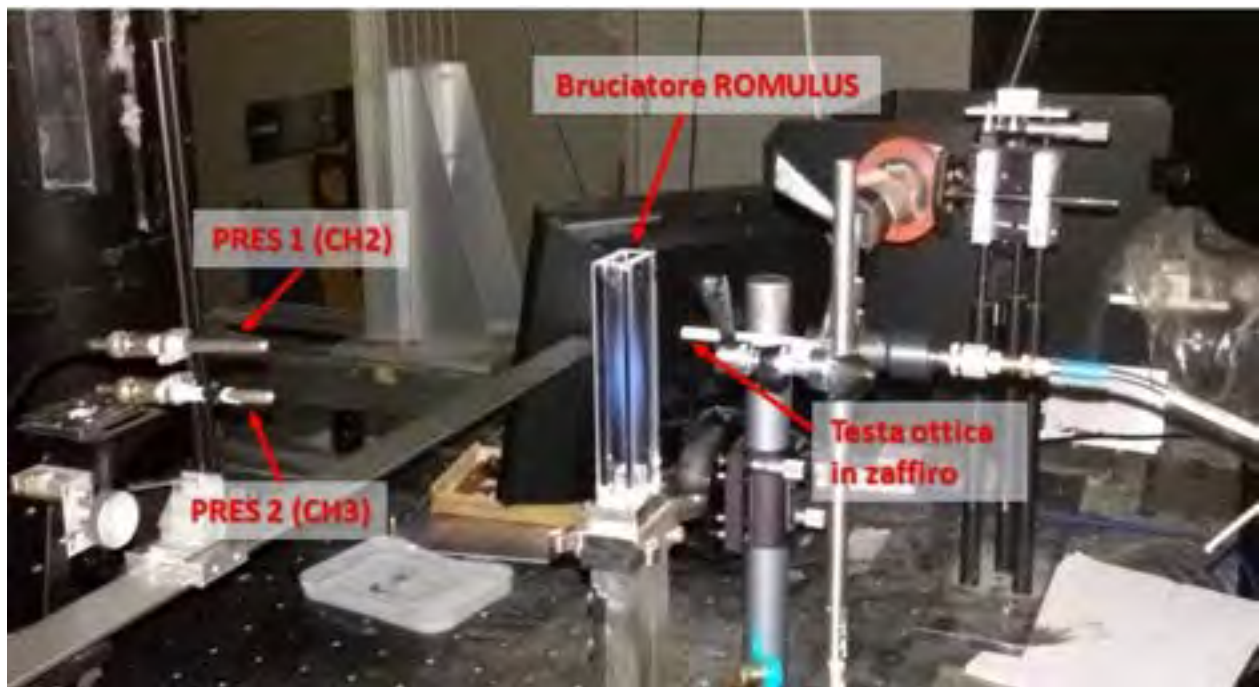


Figura 14: Set-up utilizzato durante le prove effettuate.

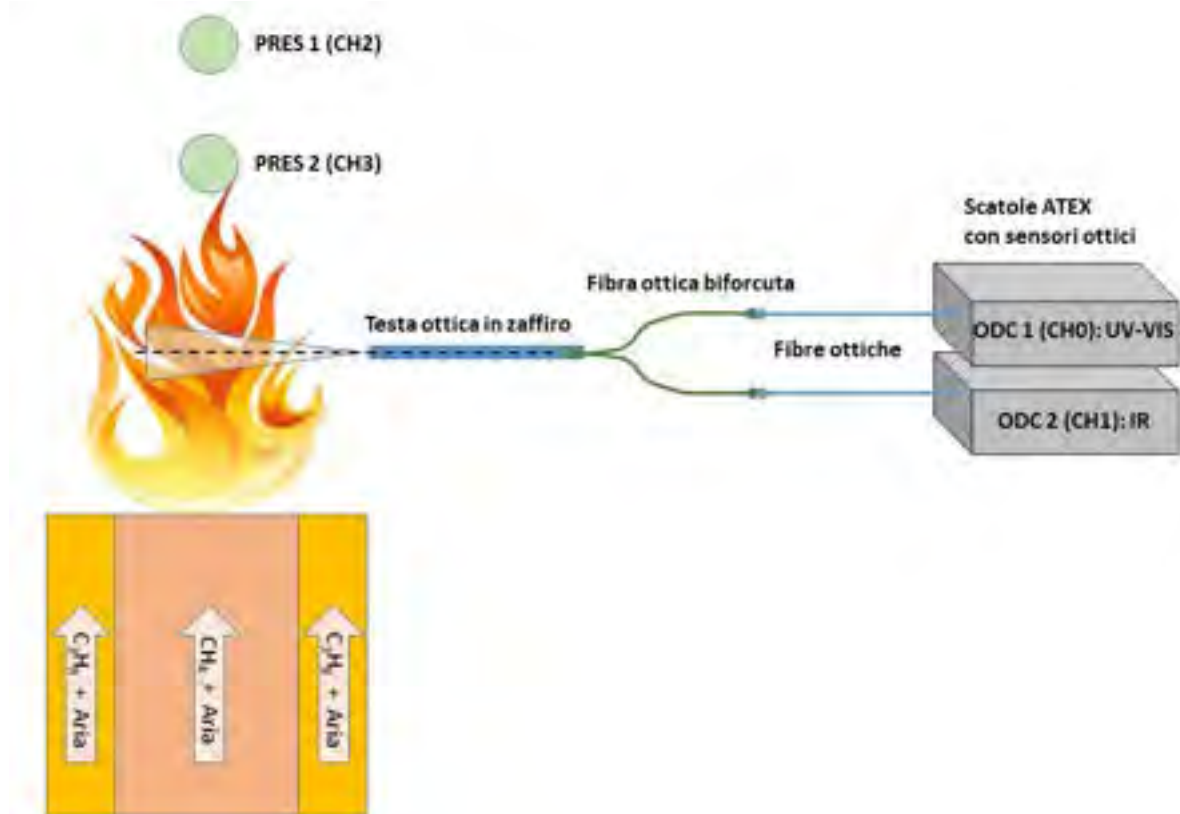


Figura 15: Schema del set-up utilizzato durante le prove effettuate.

Sono state realizzate tre diverse test-matrix di prove sperimentali:

1. nella prima si è variata la portata dell'aria della fiamma pilota (Q_{Aria_pil}) e si è utilizzato un filtraggio del segnale ottico UV-VIS tra 300-550 nm nel ramo dell'ODC1 (**Tabella 3**);
2. nella seconda, come nella precedente si è variata la portata dell'aria della fiamma pilota (Q_{Aria_pil}), ma si è eliminata la serie di filtri posizionati davanti al sensore ottico del ramo ODC1 permettendogli di acquisire su tutta la sua lunghezza ottica 200-1.000 nm (**Tabella 4**);
3. nella terza si è variato il numero di Reynolds (**Tabella 5**).

L'uscita dei microfoni è un segnale temporale in tensione $V'(t)$, che è proporzionale al segnale della fluttuazione di pressione $p'(t)$ tramite il valore di calibrazione (la cui unità di misura è Volt/bar) fornito dal costruttore oppure ricavato tramite una taratura. Il valore della fluttuazione di pressione $p'(t)$ è normalizzato attraverso una pressione di riferimento di $p_0=20 \mu Pa^1$. Lo spettro $S(f)$ della fluttuazione di pressione così normalizzata è poi calcolato attraverso un algoritmo di *Fast Fourier Transform* (FFT). Mentre il *Sound Pressure Level* (SPL) è semplicemente la rappresentazione logaritmica dello Spettro $S(f)$ ed è calcolato come:

$$SPL(f) = 10 \log_{10} S(f) \quad \text{la cui unità di misura è dB/Hz}$$

L'energia totale contenuta nello spettro è dato dall' integrazione dello Spettro su tutte le frequenze:

$$E = \int S(f) df$$

L'*Overall Sound Pressure Level* (OASPL) sarà il valore espresso dalla seguente grandezza:

$$OASPL = 10 \log_{10} E \quad \text{la cui unità di misura è dB.}$$

Nelle **Tabella 3** e **Tabella 4** si sono evidenziate le condizioni in cui si è avuto il valore massimo e minimo di OASPL.

Tabella 3: Test-matrix 1 effettuata al variare della portata di aria della fiamma pilota (Q_{Aria_pil}) e con l'ODC1 filtrato nel range 300-550 nm.

Ora	Fiamma PRINCIPALE (a CH_4)		Fiamma PILOTA (a C_3H_8)	
	Re	Φ	$Q_{Gas_propano}$ (g/s)	Q_{Aria_pil} (g/s)
14:12	4.000	1	0,002	0,075
14:21	4.000	1	0,002	0,065
14:25	4.000	1	0,002	0,086
14:28	4.000	1	0,002	0,097
14:32	4.000	1	0,002	0,110
14:39	4.000	1	0,002	0,060
14:44	4.000	1	0,002	0,054

¹ Si ricorda che $1 \mu Pa$ corrisponde a 10^{-6} Pa e che 1 Pascal ($=1 N/m^2$) corrispondono a 10^{-5} bar. Da ciò segue che $20 \mu Pa$ corrispondono a 2^{-10} bar.

Tabella 4: Test-matrix 2 effettuata al variare della portata di aria della fiamma pilota (Q_{Aria_pil}) e con l'ODC1 senza filtri, e quindi operante nel range 200-1.000 nm.

Ora	Fiamma PRINCIPALE (a CH ₄)		Fiamma PILOTA (a C ₃ H ₈)	
	Re	Φ	$Q_{Gas_propano}$ (g/s)	Q_{Aria_pil} (g/s)
15:55	4.000	1	0,002	0,054
16:00	4.000	1	0,002	0,060
16:03	4.000	1	0,002	0,065
16:07	4.000	1	0,002	0,075
16:09	4.000	1	0,002	0,086
16:13	4.000	1	0,002	0,097
16:16	4.000	1	0,002	0,110

Tabella 5: Test-matrix 3 effettuata al variare del Reynolds della fiamma principale e con l'ODC1 senza filtri, ossia operante nel range 200-1.000 nm.

Ora	Fiamma PRINCIPALE (a CH ₄)		Fiamma PILOTA (a C ₃ H ₈)	
	Re	Φ	$Q_{Gas_propano}$ (g/s)	Q_{Aria_pil} (g/s)
16:19	4.000	1	0,002	0,086
16:25	6.000	1	0,002	0,086
16:28	8.000	1	0,002	0,086

7 Analisi preliminare: rumore emesso dalla cappa di aspirazione e dal pilota

Nella fase preliminare si è pensato di caratterizzare il rumore ambientale nel quale si sono svolte le prove, e l'influsso acustico della sola fiamma pilota. Si è notato che:

- La cappa di aspirazione posizionata sulla forza più alta aspirante emette un rumore di circa 67.7 dB, e presenta dei picchi alle frequenze di 103, 166 e 385 Hz (**Figura 16**).
- La fiamma pilota non presenta picchi di emissione acustica e quindi dà nessun contributo al rumore (**Figura 17**).

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

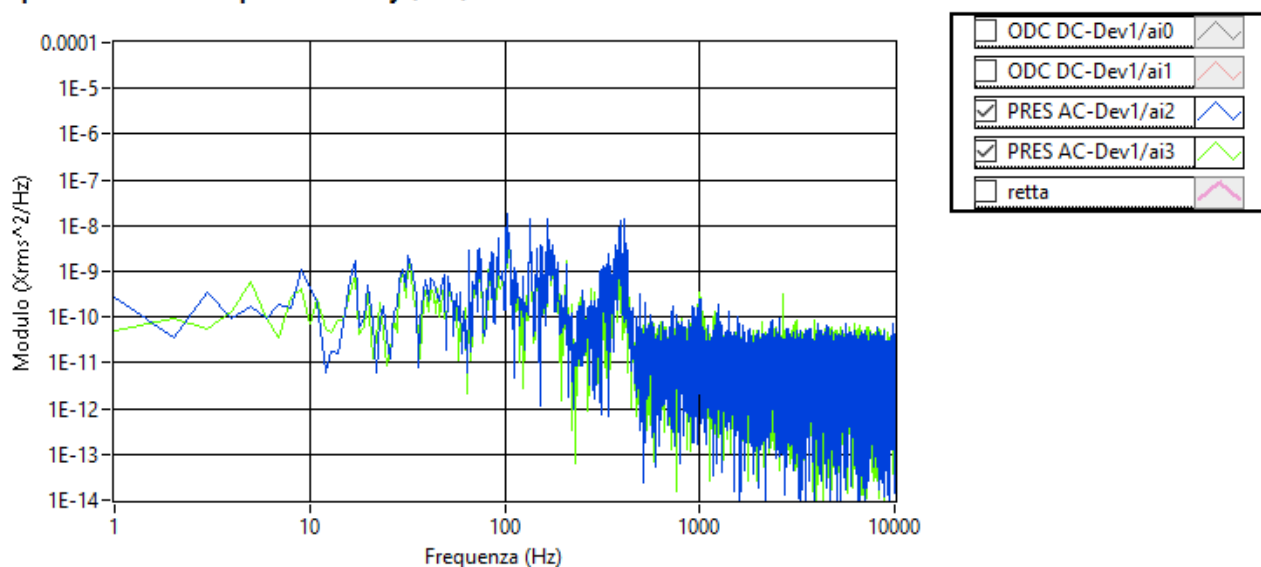


Figura 16: PSD dei segnali **PRES1** e **PRES2** dei microfoni per l'analisi del rumore emesso dalla cappa di aspirazione, con la fiamma pilota spenta ($Q_{pilota_C3H8}=0$ g/s e $Q_{Aria_pil}=0$ g/s) e il flusso principale spento ($Re=0$, $\Phi_{CH4}=0$).

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

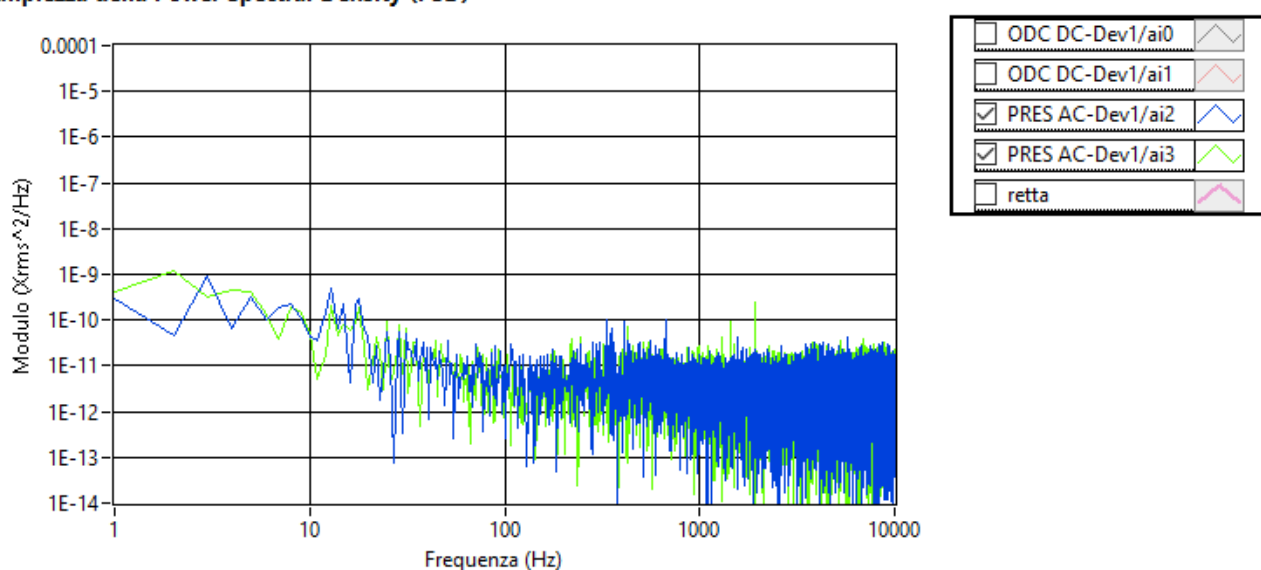


Figura 17: PSD dei segnali **PRES1** e **PRES2** dei microfoni per la condizione di funzionamento con soltanto la fiamma pilota accesa alle portate $Q_{pilota_C3H8}=0,002$ (g/s) e $Q_{Aria_pil}=0,086$ (g/s), mentre il flusso principale è spento ($Re=0$, $\Phi_{CH4}=0$).

8 Risultati delle prove con i filtri passa-banda a 300-550 nm nella linea UV-VIS

8.1 Segnali acquisiti

Qui di seguito si riportano i segnali temporali dei due sensori ottici (ODC1 e ODC2) e di un microfono (PRES1) per tutte le 7 prove della **Tabella 3**. Non si è riportato anche l'andamento del segnale del microfono PRES2 perché risulta essere molto simile a quello PRES1.

Semplicemente osservando l'andamento temporale dei segnali si può osservare che mentre i microfoni PRES1 (**Figura 20**) e PRES2, e il sensore ottico ODC2 che opera nel IR (**Figura 19**), presentano una buona variazione sia nel valore medio che nell'ampiezza, il sensore ottico ODC1 (**Figura 18**), operante nel range UV-VIS ristretto a lunghezze d'onda tra 300-550 nm, risulta in questa applicazione essere insensibile alle variazioni di funzionamento, e l'ampiezza del segnale si confonde con il rumore del segnale stesso. La motivazione di ciò risiede probabilmente nel fatto che la fiamma prodotta dal bruciatore ROMULUS ha una combustione che produce poche specie radicaliche OH e CH, infatti il fronte di fiamma risulta poco percettibile ad occhio nudo (**Figura 14**). Da ciò segue che il bruciatore ROMULUS non è adatto a testare completamente la tecnica ODC.

Preview

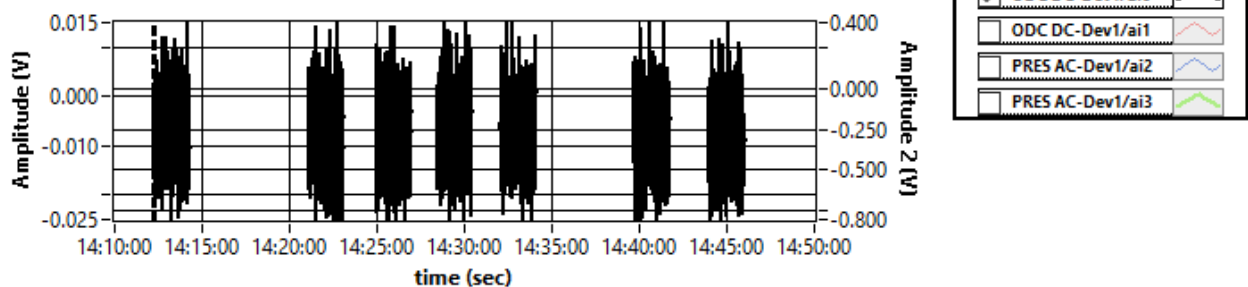


Figura 18: Serie di segnali della durata di 120 sec del sensore ottico **ODC1** (operante con filtri passa-banda nel range UV-VIS=300-550 nm) per differenti condizioni di alimentazioni (**Tabella 3**).

Preview

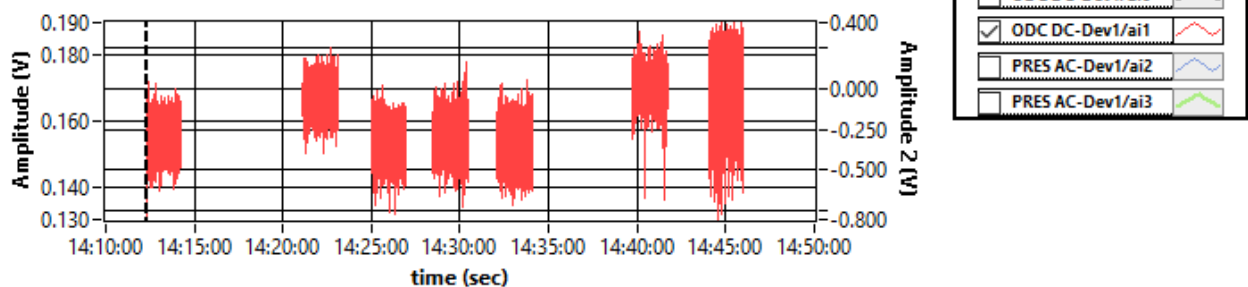


Figura 19: Serie di segnali della durata di 120 sec del sensore ottico **ODC2** (operante nel range IR=900-2.570 nm) per differenti condizioni di alimentazioni (**Tabella 3**).

Preview

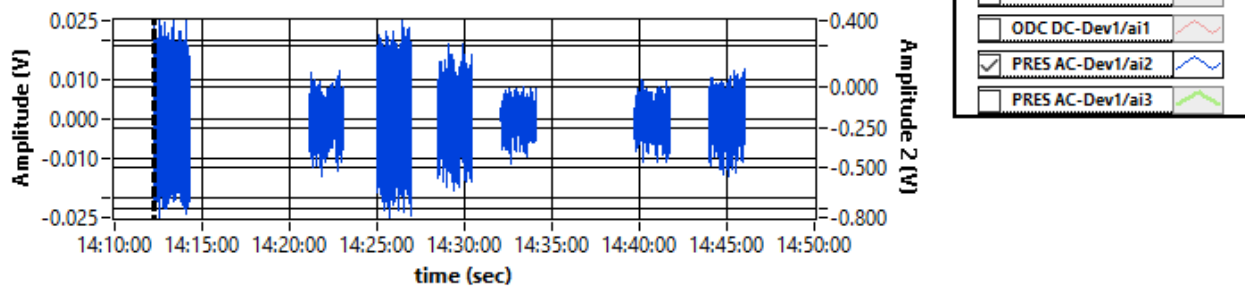


Figura 20: Serie di segnali della durata di 120 sec del microfono **PRES1** per differenti condizioni di alimentazioni (Tabella 3).

8.2 Condizione ad alto rumore acustico

Qui di seguito si riportano gli spettri (PSD) dei due segnali di pressione (**Figura 21**) e dei due segnali ottici (**Figura 22**) nel caso di una portata di aria del pilota di $Q_{Aria_pil}=0,086$ g/s nella **Tabella 3**, che corrisponde ad una fiamma molto rumorosa.

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

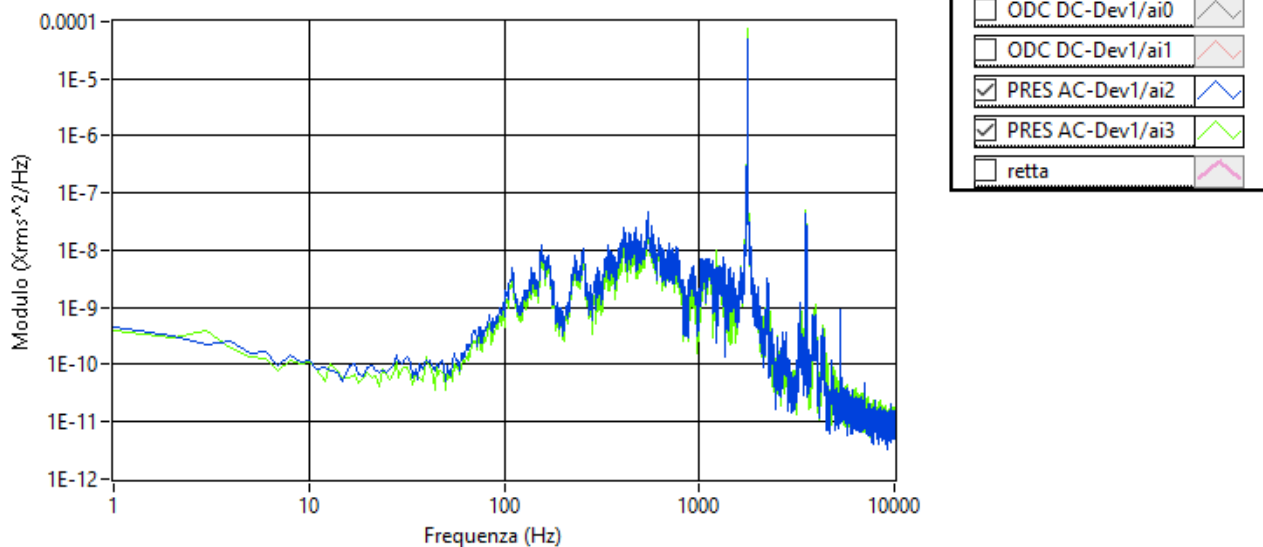


Figura 21: PSD dei segnali **PRES1** e **PRES2** dei microfoni per la condizione $Re=4.000$, $\Phi_{CH_4}=1$, $Q_{pilota_C_3H_8}=0,002$ (g/s), $Q_{Aria_pil}=0,086$ (g/s).

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

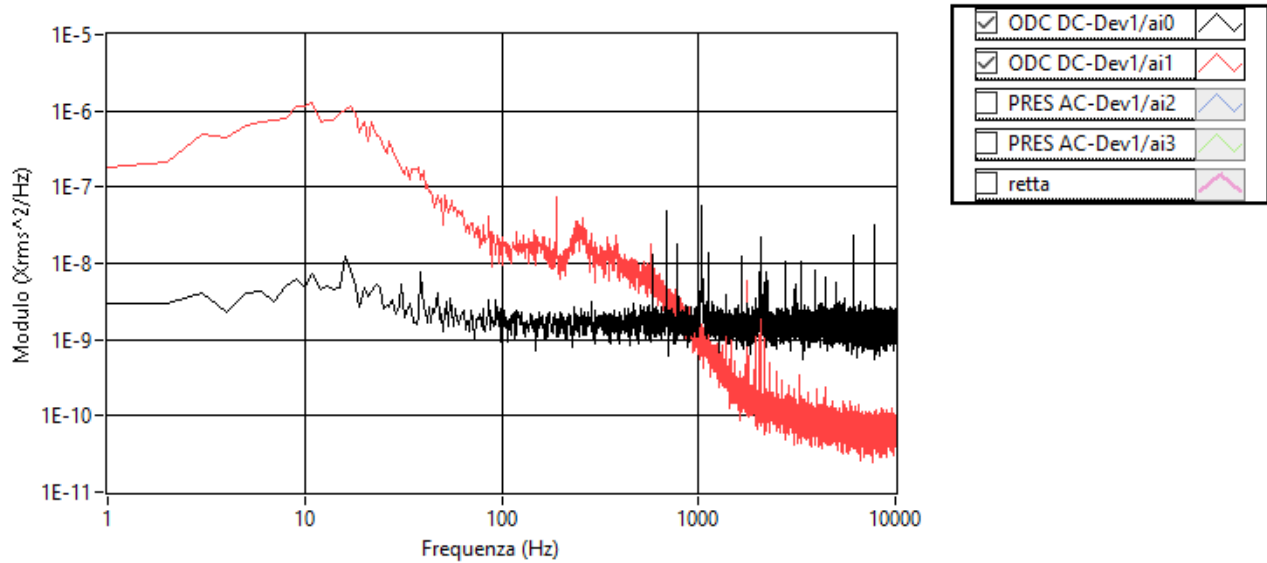


Figura 22: PSD dei segnali ottici **ODC1** (operante con filtri passa-banda nel range UV-VIS=300-550 nm) e **ODC2** (operante nel range IR =900-2.570 nm) per la condizione $Re=4.000$, $\Phi_{CH4}=1$, $Q_{pilota_C3H8}=0,002$ (g/s), $Q_{Aria_pil}=0,086$ (g/s).

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate sia da **PRES1** che da **PRES2** sono $f=110, 166, 235, 255, 550, 1.780$ (che è il picco di gran lunga maggiore) e 3.560 Hz (che è un'armonica della precedente frequenza). Il microfono **PRES2**, che è quello più vicino all'uscita dei gas, misura una OASPL di 95 dB, mentre il microfono **PRES1** misura una OASPL di 92 dB.
- Il sensore **ODC1** operante nel range UV-VIS non rileva nessun picco, e risulta essere totalmente insensibile alla dinamica del flusso.
- Il sensore **ODC2** operante nel campo IR rileva soltanto la frequenza di $f=255$ Hz.

8.3 Condizione a basso rumore acustico

Qui di seguito si riportano gli spettri (PSD) dei due segnali di pressione (**Figura 23**) e dei due segnali ottici (**Figura 24**), nel caso di una portata di aria del pilota di $Q_{Aria_pil}=0,110$ g/s nella **Tabella 3**, che corrisponde ad una fiamma stabile e poco rumorosa.

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

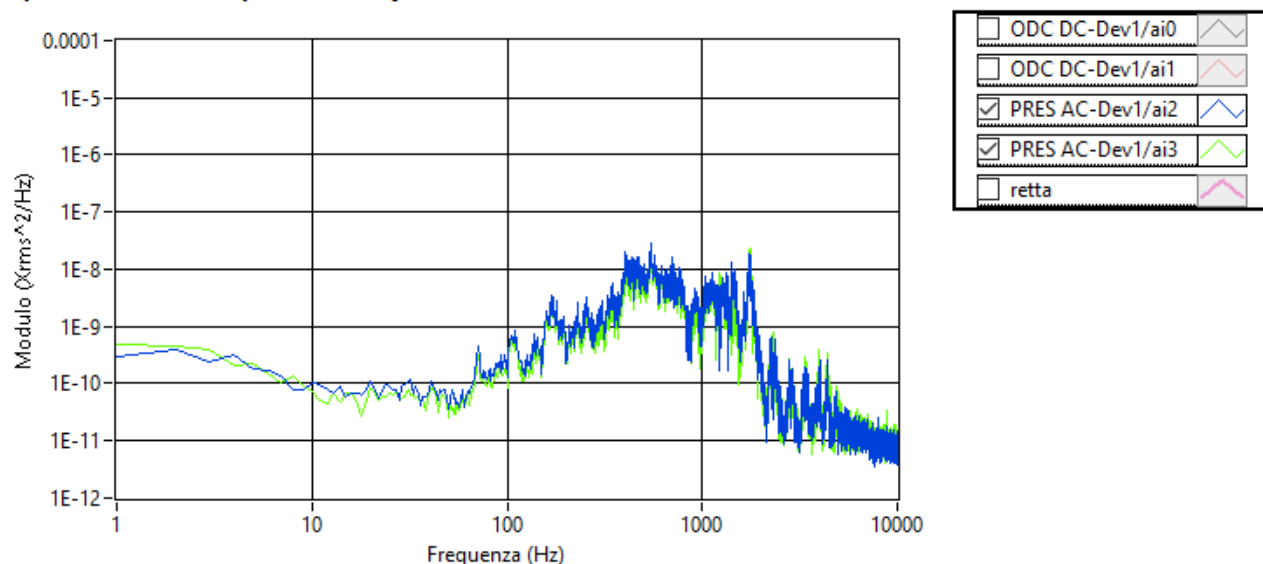


Figura 23: PSD dei segnali **PRES1** e **PRES2** dei microfoni per la condizione $Re=4.000$, $\Phi_{CH4}=1$, $Q_{pilota_C3H8}=0,002$ (g/s), $Q_{Aria_pil}=0,110$ (g/s).

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

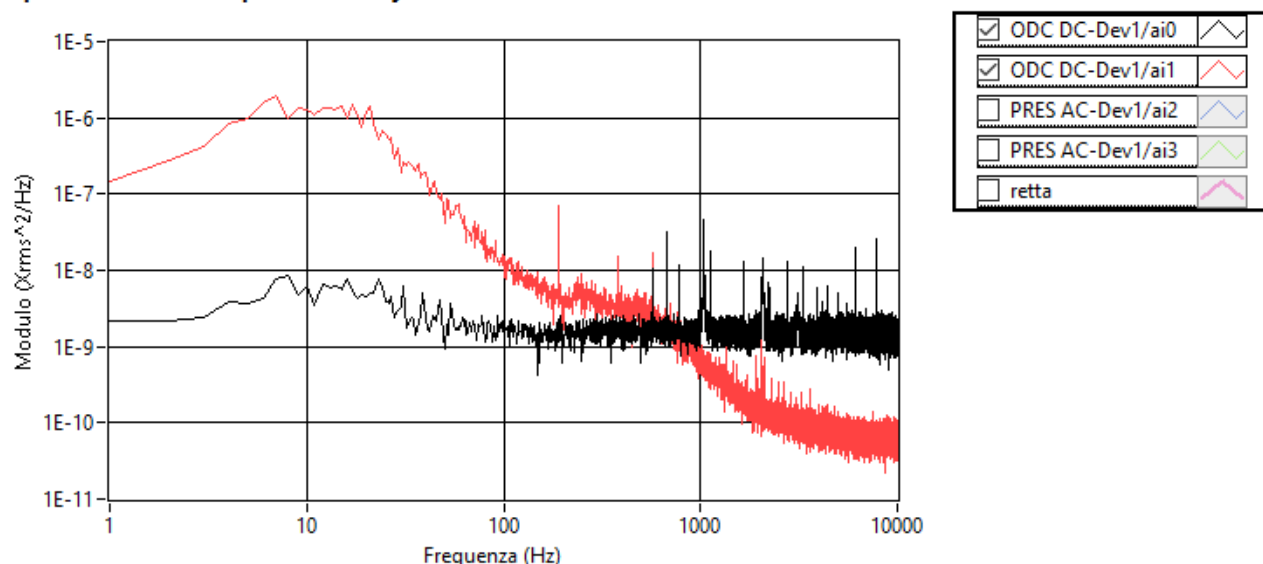


Figura 24: PSD dei segnali ottici **ODC1** (operante con filtri passa-banda nel range UV-VIS=300-550 nm) e **ODC2** (operante nel range IR =900-2.570 nm) per la condizione $Re=4.000$, $\Phi_{CH4}=1$, $Q_{pilota_C3H8}=0,002$ (g/s), $Q_{Aria_pil}=0,110$ (g/s).

Si può affermare che:

- Nei segnali di pressione **PRES1** e **PRES2** non si notano picchi particolarmente elevati: le frequenze rilevate sono essenzialmente $f=550$ e 1.780 Hz.
Il rumore è inferiore al caso precedente, infatti il microfono **PRES2** misura una OASPL di 79.8 dB, mentre il microfono **PRES1** misura una OASPL di 79.7 dB.
- Il sensore **ODC1** operante nel range UV-VIS anche in questo caso non rileva nessun picco, e risulta essere totalmente insensibile alla dinamica del flusso.
- Il sensore **ODC2** operante nel campo IR rileva soltanto un piccolo picco alla frequenza di $f=190$ Hz.

9 Risultati delle prove senza i filtri passa-banda nella linea UV-VIS

9.1 Segnali acquisiti

Qui di seguito si riportano i segnali temporali dei due sensori ottici (ODC1 e ODC2) e di un microfono (PRES1) per tutte le 7 prove della **Tabella 4**. Non si è riportato anche l'andamento del segnale del microfono **PRES2** perché risulta essere molto simile a quello **PRES1**.

A differenza del segnale ottico **ODC1** di **Figura 18**, che era stato filtrato nel range di lunghezze d'onda 300-550 nm, il segnale non filtrato (ossia operante tra 200-1.000 nm) e rappresentato in **Figura 25** risulta essere sensibile alle variazioni di funzionamento, infatti si può notare una deriva nel tempo del suo valor medio. Le motivazioni sono essenzialmente due.

1. La prima motivazione consiste nel fatto che, essendo lo spessore complessivo dei tre filtri in serie di circa 6 mm, ne risultava una attenuazione del segnale, e quindi la sua rimozione consente un avvicinamento della fibra ottica al sensore APD ed un miglioramento del segnale campionato.
2. La seconda motivazione consiste nel fatto che, aumentando il range di lunghezze d'onda che contribuiscono al segnale ottico campionato, si è utilizzato anche il contributo del campo NIR.

E' importante ricordare che i due elementi sensibili del sensore UV-VIS e NIR forniscono segnali in controfase, come è visibile in **Figura 25** e **Figura 26**.

Preview

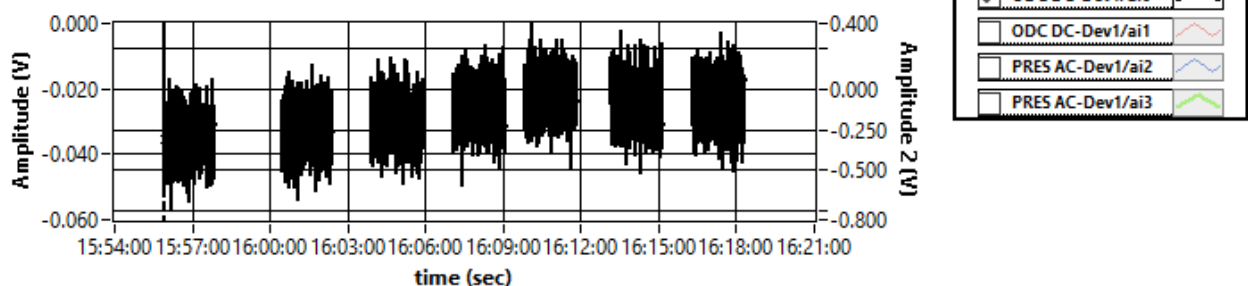


Figura 25: Serie di segnali della durata di 120 sec del sensore ottico **ODC1** (operante con filtri passa-banda nel range UV-VIS=200-1.000 nm) per differenti condizioni di alimentazioni (**Tabella 4**).

Preview

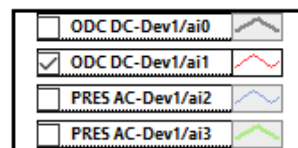
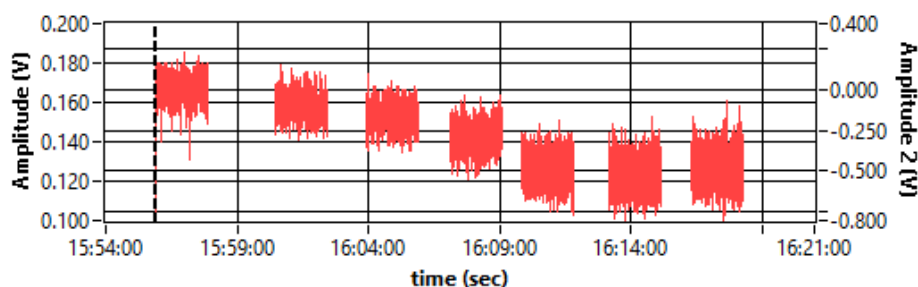


Figura 26: Serie di segnali della durata di 120 sec del sensore ottico **ODC2** (operante nel range IR=900-2.570 nm) per differenti condizioni di alimentazioni (**Tabella 4**).

Preview

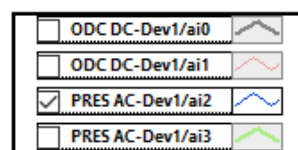
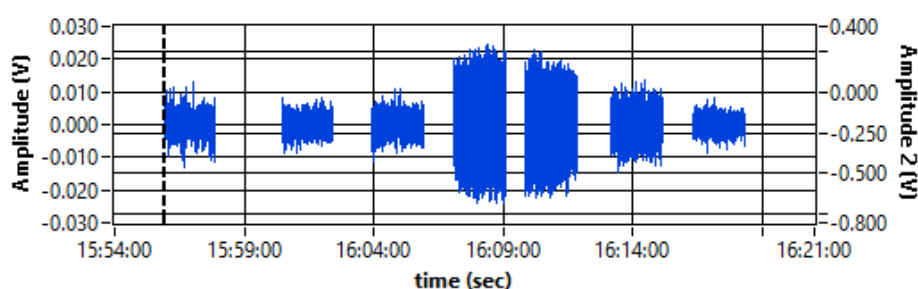


Figura 27: Serie di segnali della durata di 120 sec del microfono **PRES1** per differenti condizioni di alimentazioni (**Tabella 4**).

9.2 Condizione ad alto rumore acustico

Qui di seguito si riportano gli spettri (PSD) dei due segnali di pressione (**Figura 28**) e dei due segnali ottici (**Figura 29**) nel caso di una portata di aria del pilota di $Q_{Aria_pil}=0,086$ g/s nella **Tabella 4**, che corrisponde ad una fiamma molto rumorosa.

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

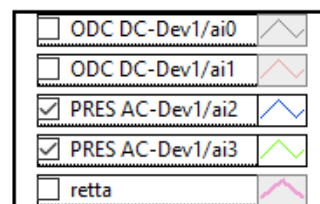
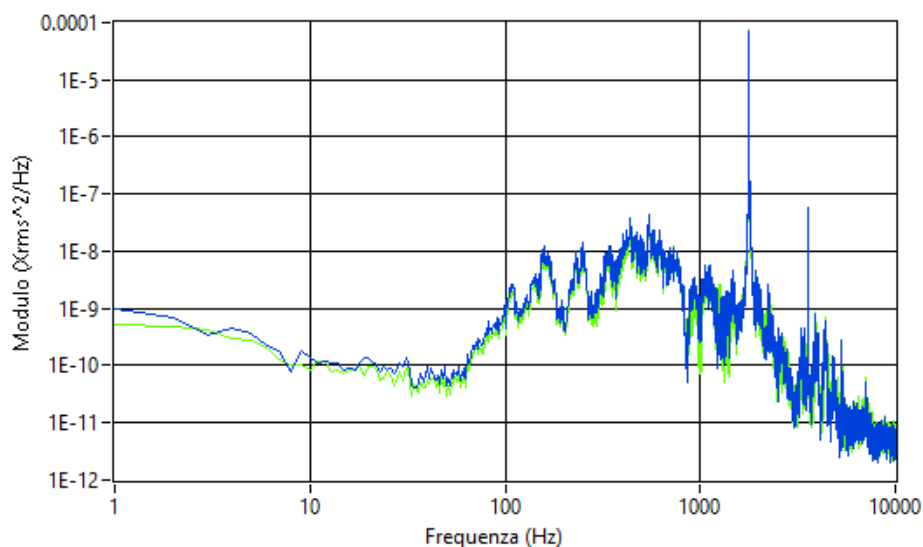


Figura 28: PSD dei segnali **PRES1** e **PRES2** dei microfoni per la condizione $Re=4.000$, $\Phi_{CH4}=1$, $Q_{pilota_C3H8}=0,002$ (g/s), $Q_{Aria_pil}=0,086$ (g/s).

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

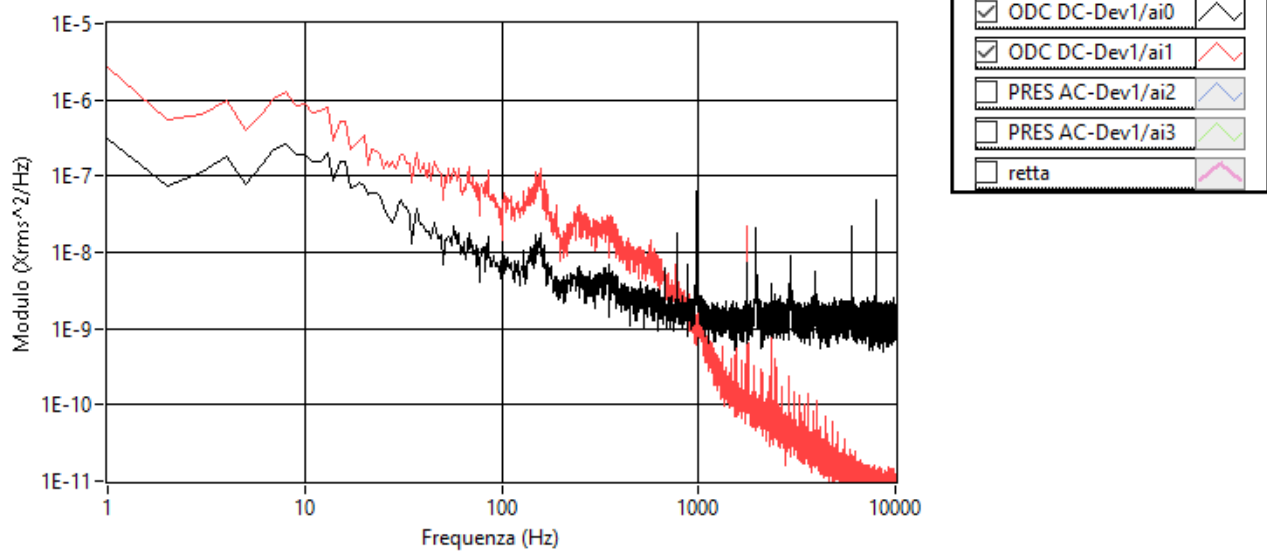


Figura 29: PSD dei segnali ottici **ODC1** (operante nel range UV-VIS=200-1.000 nm) e **ODC2** (operante nel range IR =900-2.570 nm) per la condizione $Re=4.000$, $\Phi_{CH4}=1$, $Q_{pilota_C3H8}=0,002$ (g/s), $Q_{Aria_pil}=0,086$ (g/s).

Si può affermare che:

- Entrambi i microfoni **PRES1** e **PRES2** rilevano le frequenze di $f=110$, 155, 235, 255, 445, 550, 1.780 (che è il picco di gran lunga maggiore) e 3.560 Hz (che è un'armonica della precedente frequenza). Il microfono **PRES2**, che è quello più vicino all'uscita dei gas, misura una OASPL di 93.9 dB, mentre il microfono **PRES1** misura una OASPL di 92.9 dB.
- Entrambi i sensori **ODC1** e **ODC2** rilevano soltanto la frequenza di $f=155$ Hz.

9.3 Condizione a basso rumore acustico

Qui di seguito si riportano gli spettri (PSD) dei due segnali di pressione (**Figura 30**) e dei due segnali ottici (**Figura 31**) nel caso di una portata di aria del pilota di $Q_{Aria_pil}=0,110$ g/s nella **Tabella 4**, che corrisponde ad una fiamma stabile e poco rumorosa.

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

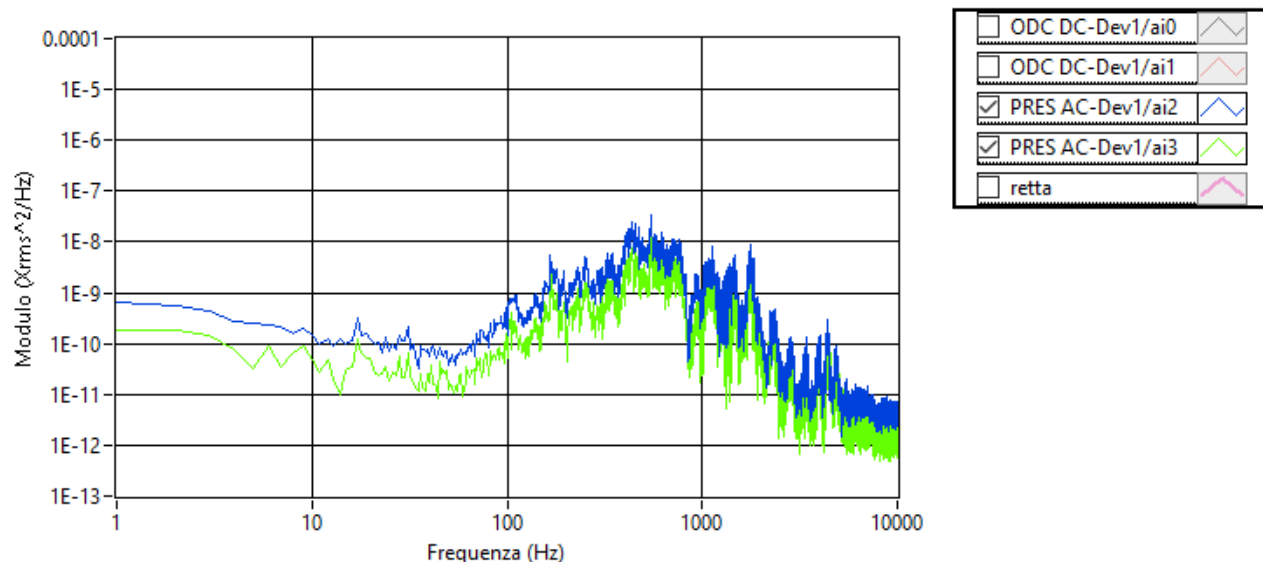


Figura 30: PSD dei segnali **PRES1** e **PRES2** dei microfoni per la condizione $Re=4.000$, $\Phi_{CH_4}=1$, $Q_{pilota_C_3H_8}=0,002$ (g/s), $Q_{Aria_pil}=0,110$ (g/s).

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

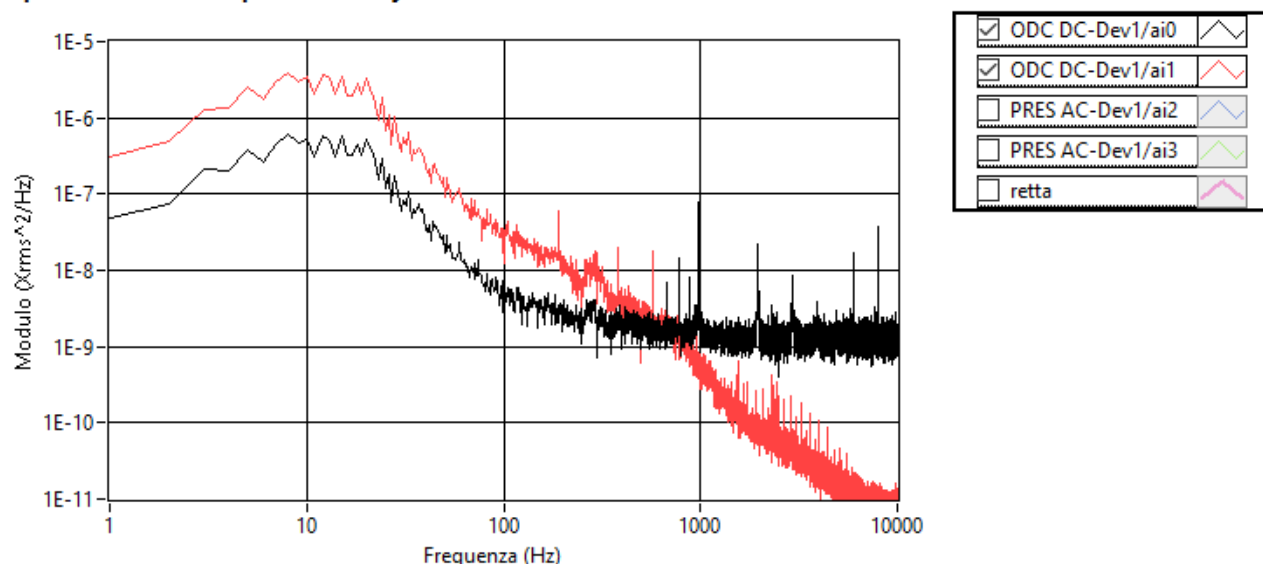


Figura 31: PSD dei segnali ottici **ODC1** (operante nel range UV-VIS=200-1.000 nm) e **ODC2** (operante nel range IR =900-2.570 nm) per la condizione $Re=4.000$, $\Phi_{CH_4}=1$, $Q_{pilota_C_3H_8}=0,002$ (g/s), $Q_{Aria_pil}=0,110$ (g/s).

Si può affermare che:

- Entrambi i microfoni **PRES1** e **PRES2** rilevano le frequenze di circa $f=550$ e 1.780 Hz ma che presentano una piccola ampiezza.
Entrambi i microfoni, PRES 1 e PRES2 misurano una OASPL di 78.5 dB, e quindi il rumore della fiamma è molto basso.
- Entrambi i sensori **ODC1** e **ODC2** non rilevano picchi di particolare ampiezza ad eccezione della frequenza $f=190$ Hz.

10 Descrizione dell'impianto COMET-HP e dell'apparato sperimentale

COMET-HP (*COMbustion Experimental Tests in High Pressure conditions*) (**Figura 32**) è un impianto sperimentale per prove di combustione in bruciatori e camere di combustione per Turbine a Gas. L'impianto può attualmente operare ad una pressione di 5 bar e con preriscaldamento del comburente (aria) fino a 450°C . Il gas utilizzato per la realizzazione del processo combustivo in aria è il gas naturale, del tutto simile a quello tipico dei combustori per Turbina a Gas.

La sezione di prova dell'impianto COMET-HP è in grado di ospitare bruciatori di potenza termica massima pari a circa 1 MWt, e prevede accessi ottici laterali in grado di permettere l'impiego di diagnostiche non invasive, di tipo ottico e laser, per misure di velocità, stabilità di combustione, temperatura e specie chimiche (sia stabili che "radicaliche"). Il bruciatore montato durante questa sessione di prove è stato quello schematicamente riportato in **Figura 33**.

Il gas metano di alimentazione all'impianto è fornito dalla rete di Centro ENEA Casaccia ad una pressione di circa 7 bar, mentre l'aria comburente viene prodotta da un gruppo compressori costituito da due macchine capaci di produrre circa $700 \text{ Nm}^3/\text{h}$ di aria alla pressione di circa 7 bar.

Al fine di analizzare i fenomeni di instabilità del combustore tramite la tecnica ODC si è deciso di operare a pressione ambiente ($p = 1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa}$), condizione in cui per esperienza si è notato il maggior insorgere di tali fenomeni.

Per effettuare le prove di nostro interesse si è provveduto ad equipaggiare l'impianto COMET-HP con la seguente sensoristica (**Figura 34**): due trasduttori di pressione Kulite, la cui pressione nominale è 1 bar, ed una testa ottica in zaffiro collegata a due rami di fibre ottiche.

1. Il primo sensore ottico ha un fotodiodo APD operante nel range UV-VIS di lunghezze d'onda 200-1000 nm, ma al quale è stato montato un filtro passa-banda nel range 300-550 nm.
2. Il secondo sensore ottico ha un Amplified InGaAs Detector operante nel range NIR di lunghezze d'onda 900-2.700 nm e al quale è stato montato un filtro passa-alto tra 900-2.600 nm per avere una maggiore sicurezza che si campioni soltanto il segnale NIR della fiamma.

Figura 32: Immagine dell'impianto COMET-HP.

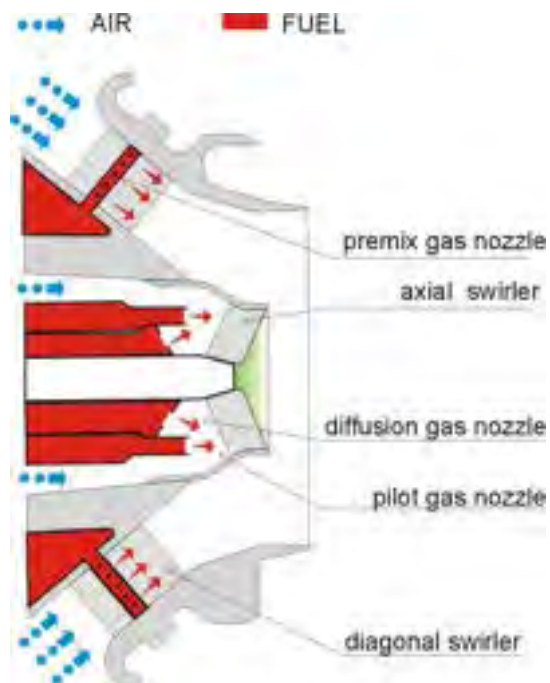


Figura 33: Schema del bruciatore montato sull'impianto COMET-HP.

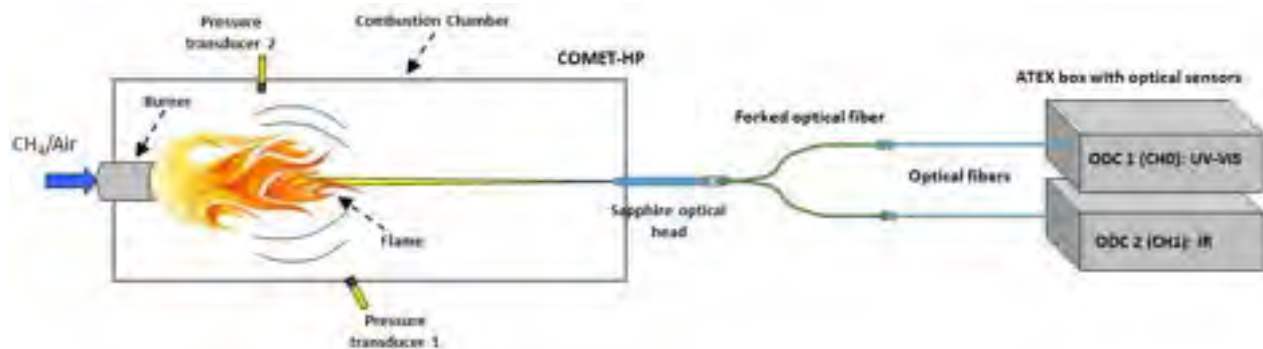


Figura 34: Schema del set-up utilizzato per lo studio del bruciatore con la tecnica ODC sull'impianto COMET. Dal suo schema è possibile osservare il posizionamento di una sonda ODC (collegata ai due rami ottici, uno per UV-VIS e l'altro per NIR) e di due trasduttori di pressione Kulite.

11 Risultati delle prove sull'impianto COMET-HP

11.1 Segnali acquisiti

Qui di seguito si riportano alcuni risultati relativi ad una acquisizione di 1.925 secondi (circa 32 minuti) consecutivi del funzionamento dell'impianto COMET-HP che si porta volutamente in diverse condizioni di instabilità per miscele magre. Nella **Figura 35** si possono notare:

- i tre momenti di instabilità caratterizzati da un aumento notevole delle ampiezze dei segnali ottici e acustici: 100-350 sec e 450-620 sec (**Figura 36**); 1.600-1.900 sec (**Figura 37**);
- il momento in cui l'impianto si è spento intorno a 1.918 sec (**Figura 38**) perché la miscela risultava particolarmente magra ($\Phi_{\text{globale}}=0.45$).
- il momento in cui è stato diminuito manualmente il guadagno del sensore ottico per l'IR (curva di colore rosso) all'istante 780 sec;
- tre finestre (A, B e C) delle quali si sono riportati i grafici delle PSD (**Figura 39-Figura 41**).

Nelle figure circa gli andamenti il colore nero indica il segnale ODC relativo al range UV-VIS, il colore rosso indica quello dell'ODC relativo al range NIR, il colore blu e verde indicano i segnali di pressione dei due trasduttori di pressione che risultano praticamente sovrapposti.

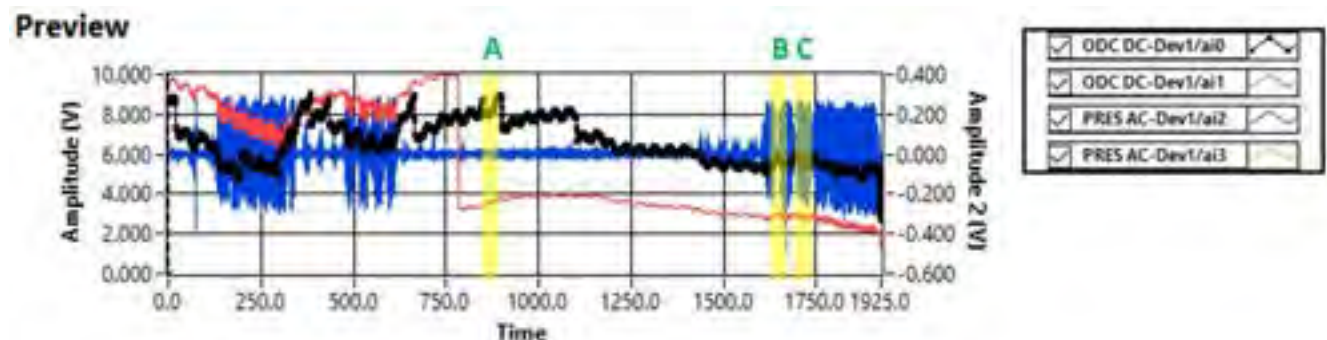


Figura 35: Storia temporale dei due segnali ottico ODC (colore nero e rosso) e dei due segnali di pressione (blu e verde).

Figura 36: Zoom della storia temporale di Figura 35 tra 0 e 750 sec.

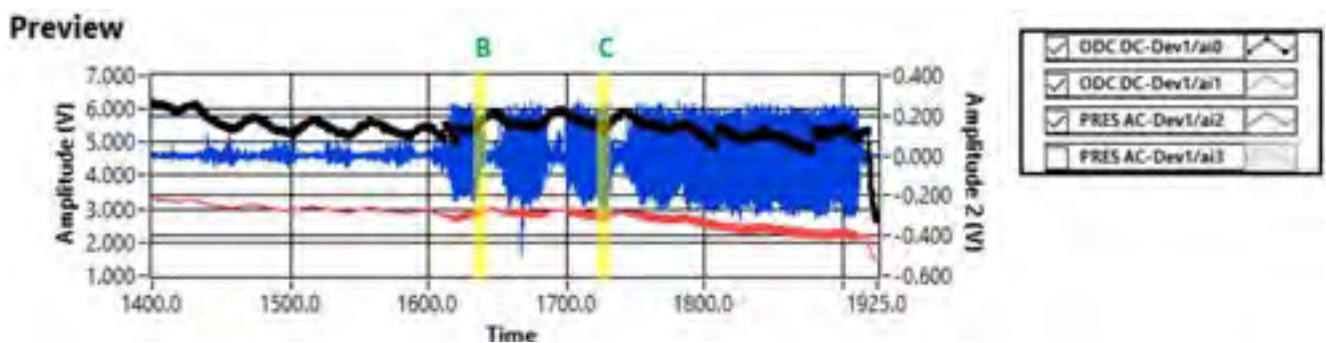


Figura 37: Zoom della storia temporale di Figura 35 tra 1.400 e 1.925 sec.

Osservando il decadimento dei segnali ottici UV-VIS (di colore nero) e NIR (di colore rosso) nel momento dello spegnimento (**Figura 38**) a circa 1918 sec, ci si poteva attendere un brusco decadimento della componente UV-VIS dovuto all'estinzione della fiamma e quindi dei radicali ad essa collegati, e un decadimento esponenziale della componente NIR. Il fatto che entrambe le componenti presentano un decadimento esponenziale è probabilmente dovuto al fatto che mentre il sensore UV-VIS è sensibile al range 200 to 1.000 nm, il filtro passa-banda 300-550 nm non azzerava completamente le componenti a lunghezze d'onda superiori (**Figura 12**).

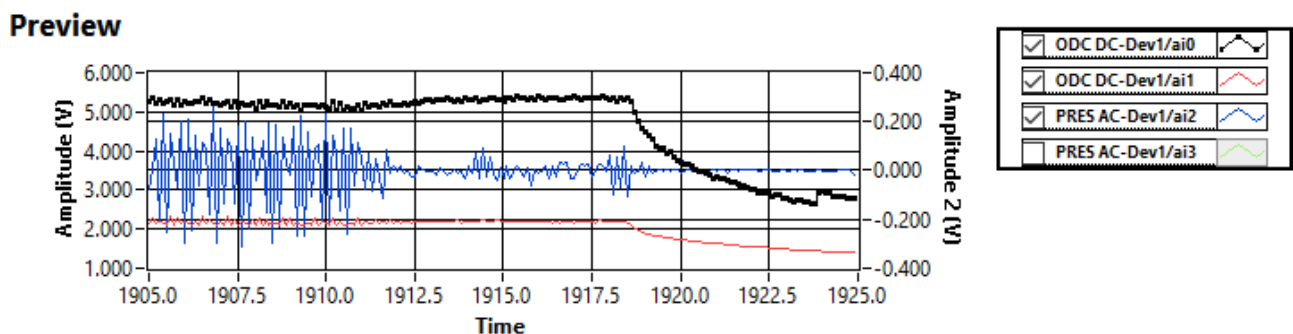


Figura 38: Zoom della storia temporale di Figura 35 tra 1.900 e 1.925 sec, ossia al momento dello spegnimento.

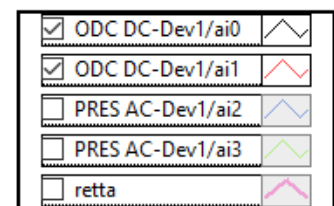
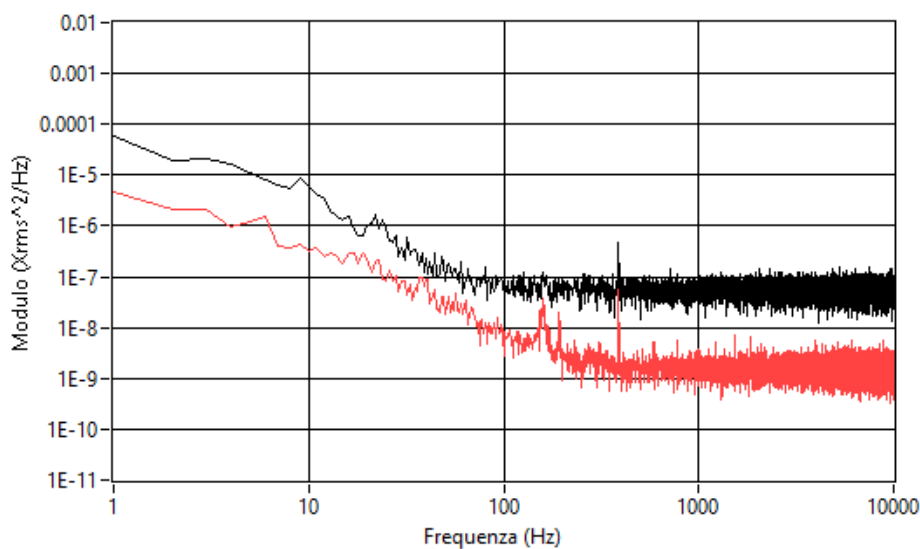
11.2 Analisi spettrale

Di seguito sono riportate le analisi spettrali delle tre condizioni (A, B e C) della **Figura 35**.

Per quanto riguarda la **condizione A (Figura 39)** si può notare che:

- Sia il segnale del primo trasduttore di pressione **PRES1** ("PRES AC-Dev1/ai2") che il secondo **PRES2** ("PRES AC-Dev1/ai3") presentano un picco a 158 Hz. Mentre il sensore ottico NIR **ODC2** ("ODC DC-Dev1/ai1") vede anch'esso la frequenza a 158 Hz, il sensore UV-VIS **ODC1** ("ODC DC-Dev1/ai0") non la mostra.
- Tutti i sensori individuano il picco a 390 Hz.
- Solo i due trasduttori di pressione rilevano un picco ad una frequenza di 6 Hz, ma di piccola ampiezza.

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)



Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

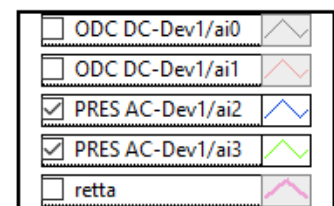
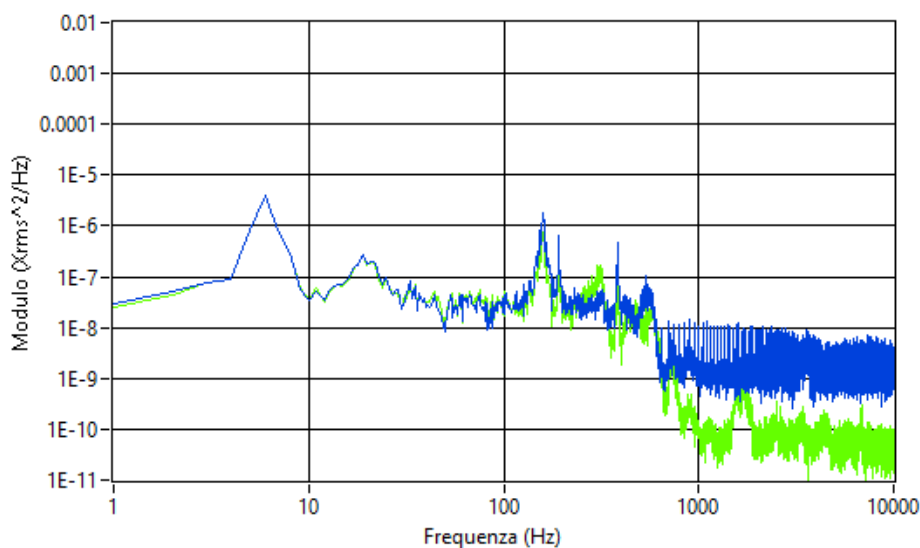
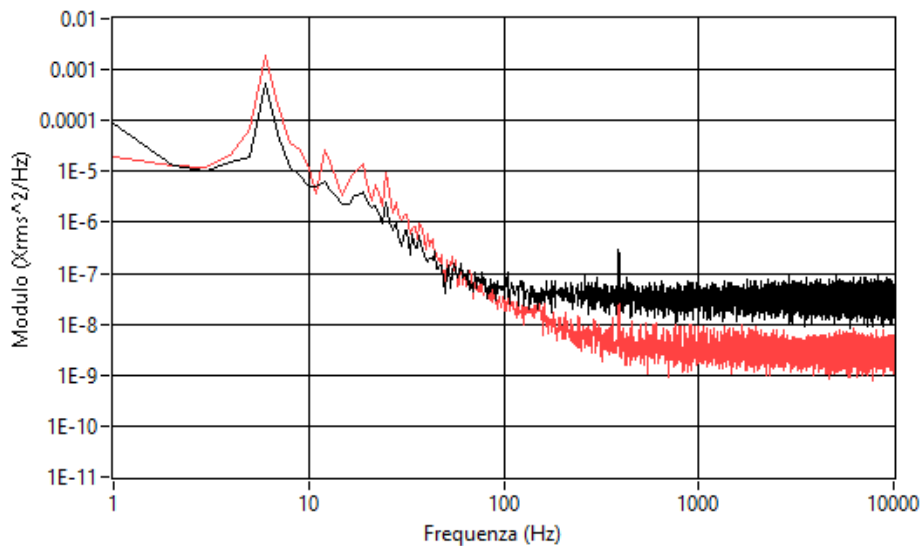


Figura 39: Spettri PSD alla **condizione A** della **Figura 35** (istante 866 sec dall'inizio dell'acquisizione), ossia avente aria primaria di 1.150 kg/h, aria secondaria di 45 kg/h, gas primario 34 kg/h, e gas pilota 4 kg/h. Si ha quindi un $\Phi_{globale}=0.51$.

Per quanto riguarda la **condizione B (Figura 40)** si può notare che:

- Tutti i sensori rilevano un picco di grande ampiezza ad una frequenza di 6 Hz e alle sue armoniche successive (12, 18, 24 Hz), mentre le ampiezze degli altri picchi risultano molto inferiori.
- Soltanto i due sensori ottici ODC evidenziano un piccolo picco a 390 Hz.

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)



Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

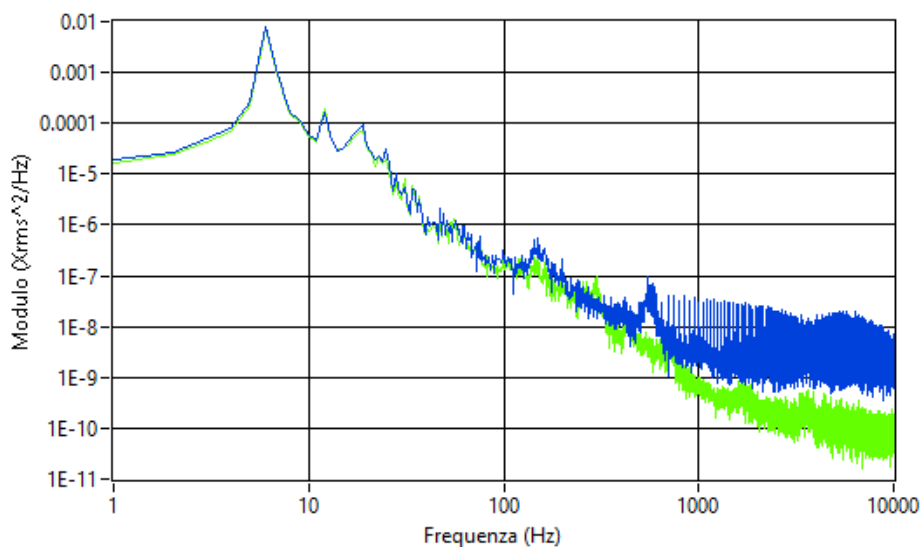
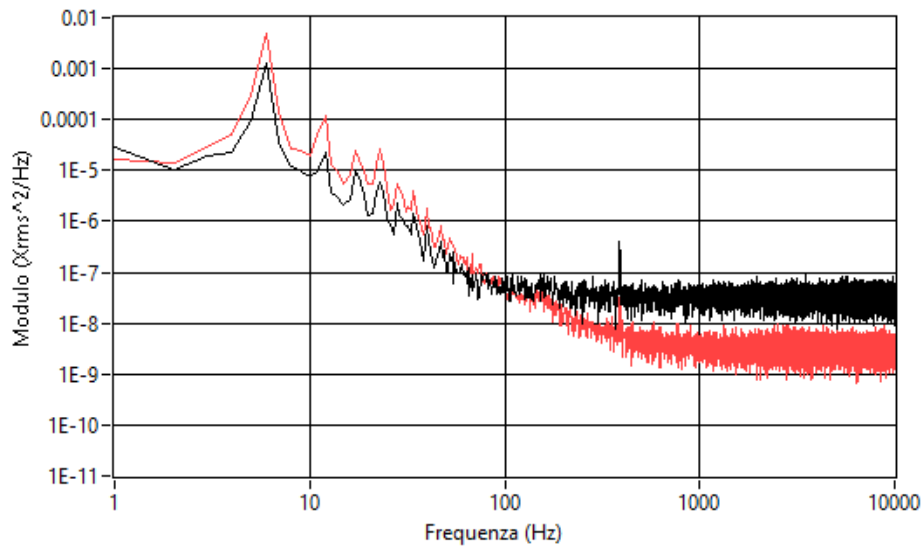


Figura 40: Spettri PSD alla **condizione B** della **Figura 35** (istante **1.641 sec** dall'inizio dell'acquisizione), ossia avente aria primaria di 1.300 kg/h, aria secondaria di 45 kg/h, gas primario 34 kg/h, e gas pilota 4 kg/h. Si ha quindi un $\Phi_{globale}=0.48$.

Per quanto riguarda la **condizione C (Figura 41)** si può notare che:

- Tutti i sensori individuano un picco di grande ampiezza ad una frequenza di 6 Hz e le sue armoniche successive (12, 18, 24 Hz) aumentano di ampiezza rispetto alla condizione precedente, mentre le ampiezze degli altri picchi risultano inferiori.

Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)



Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

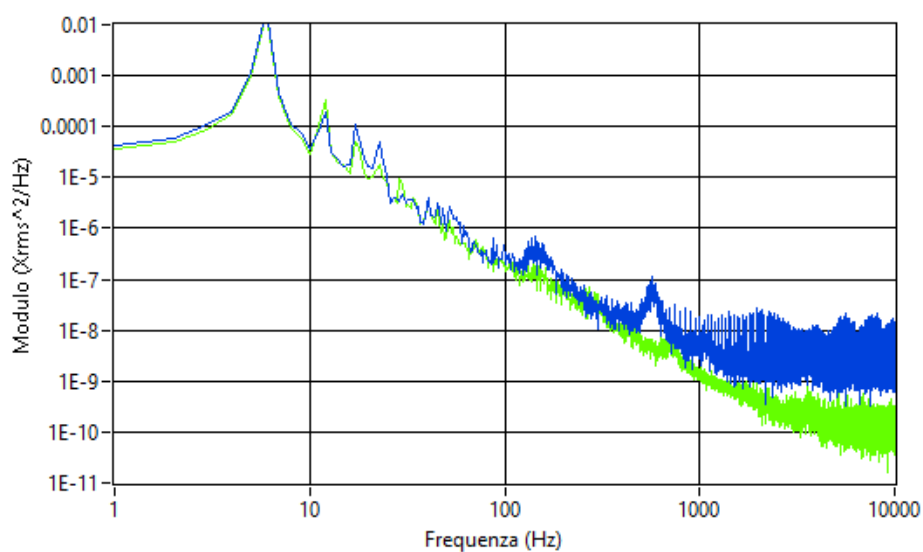


Figura 41: Spettri PSD alla **condizione C** della **Figura 35** (istante **1.725 sec** dall'inizio dell'acquisizione), ossia avente aria primaria di 1.350 kg/h, aria secondaria di 45 kg/h, gas primario 34 kg/h, e gas pilota 4 kg/h. Si ha quindi un $\Phi_{globale}=0.47$.

11.3 Andamento degli indici di instabilità

I dati acquisiti sono stati analizzati in due zone d'interesse caratterizzate da regimi di funzionamento differenti:

1. il primo va dall'inizio dell'acquisizione al secondo 750 (**Figura 36**);
2. l'altro va dal secondo 1.400 al 1.925 (**Figura 37**), ossia alla fine.

Per ognuna di queste due zone sono stati analizzati gli andamenti dei seguenti indici di instabilità:

- *indice di Rayleigh* (**Figura 42 e Figura 45**);
- *indice di Chu* (**Figura 43 e Figura 46**);
- *indici dipendenti dalla Cross-correlazione* (**Figura 44 e Figura 47**) tra ODC1, ODC2 e PRES1.

In entrambe le zone si può osservare che, per quanto riguarda l'individuazione delle instabilità:

- L'*indice di Rayleigh* implementato risulta praticamente insensibile.
- L'*indice di Chu* e quello *dipendente dalla Cross-correlazione* risultano notevolmente sensibili.

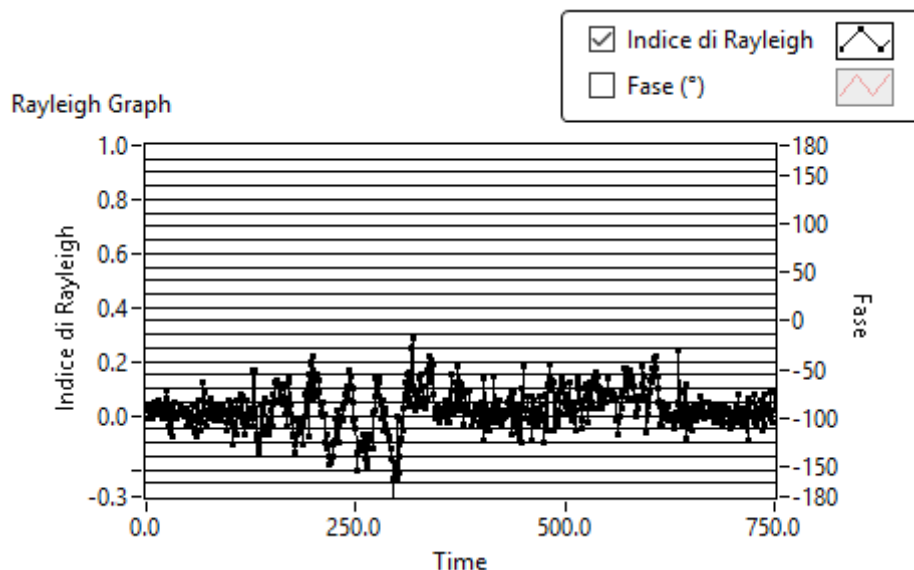


Figura 42: Andamento dell'*indice di Rayleigh* tra gli istanti 0 e 750 sec dell'acquisizione.

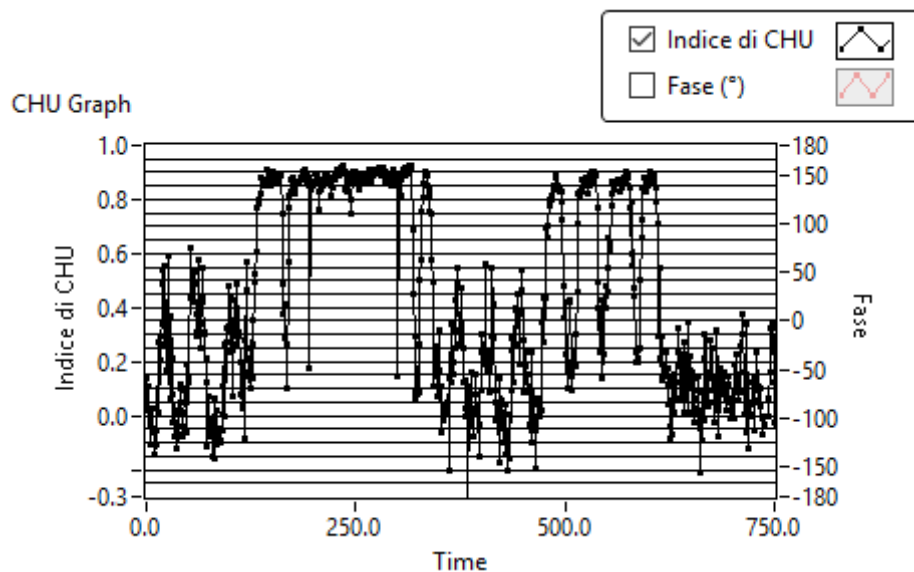


Figura 43: Andamento dell'*indice di Chu* tra gli istanti 0 e 750 sec dell'acquisizione.

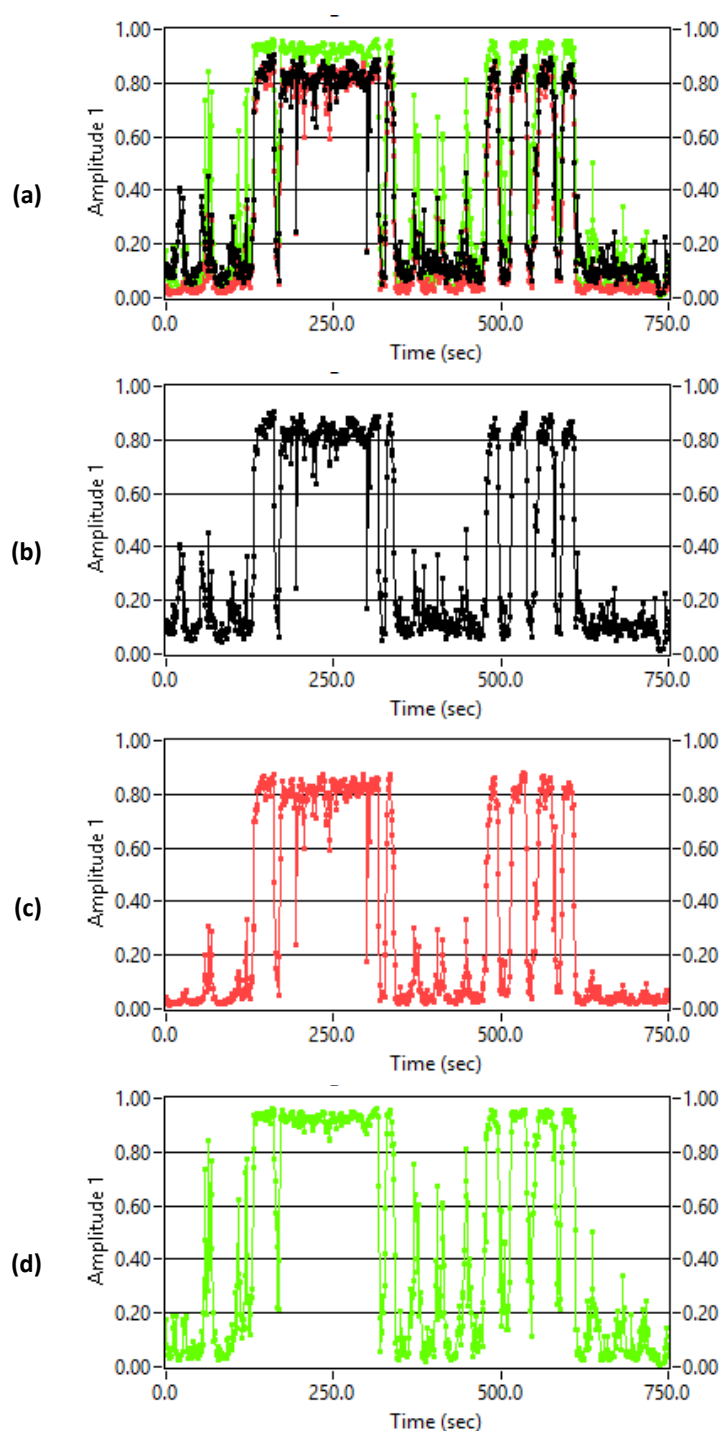


Figura 44: Andamento dell'indice di instabilità dipendente dalla Cross-correlazione (a) tra gli istanti 0 e 750 sec dell'acquisizione. La curva nera (b) è relativa alla Cross-correlazione tra ODC1 (UV-VIS) e ODC2 (NIR); la curva rossa (c) è relativa alla Cross-correlazione tra ODC1 (UV-VIS) e il trasduttore di pressione PRES1; la curva verde (d) è relativa alla Cross-correlazione tra ODC2 (NIR) e il trasduttore di pressione PRES1.

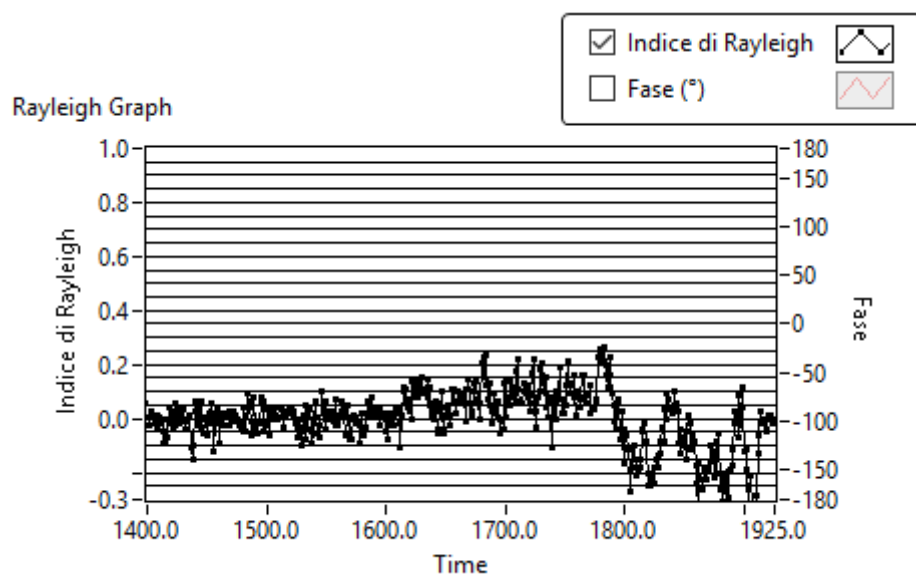


Figura 45: Andamento dell'indice di Rayleigh tra gli istanti 1.400 e 1.925 sec dell'acquisizione.

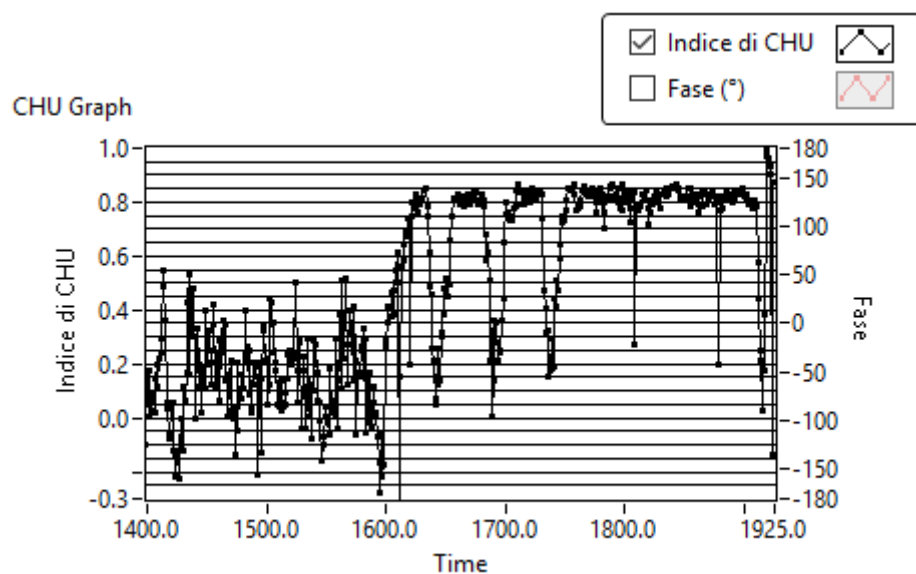


Figura 46: Andamento dell'indice di Chu tra gli istanti 1.400 e 1.925 sec dell'acquisizione.

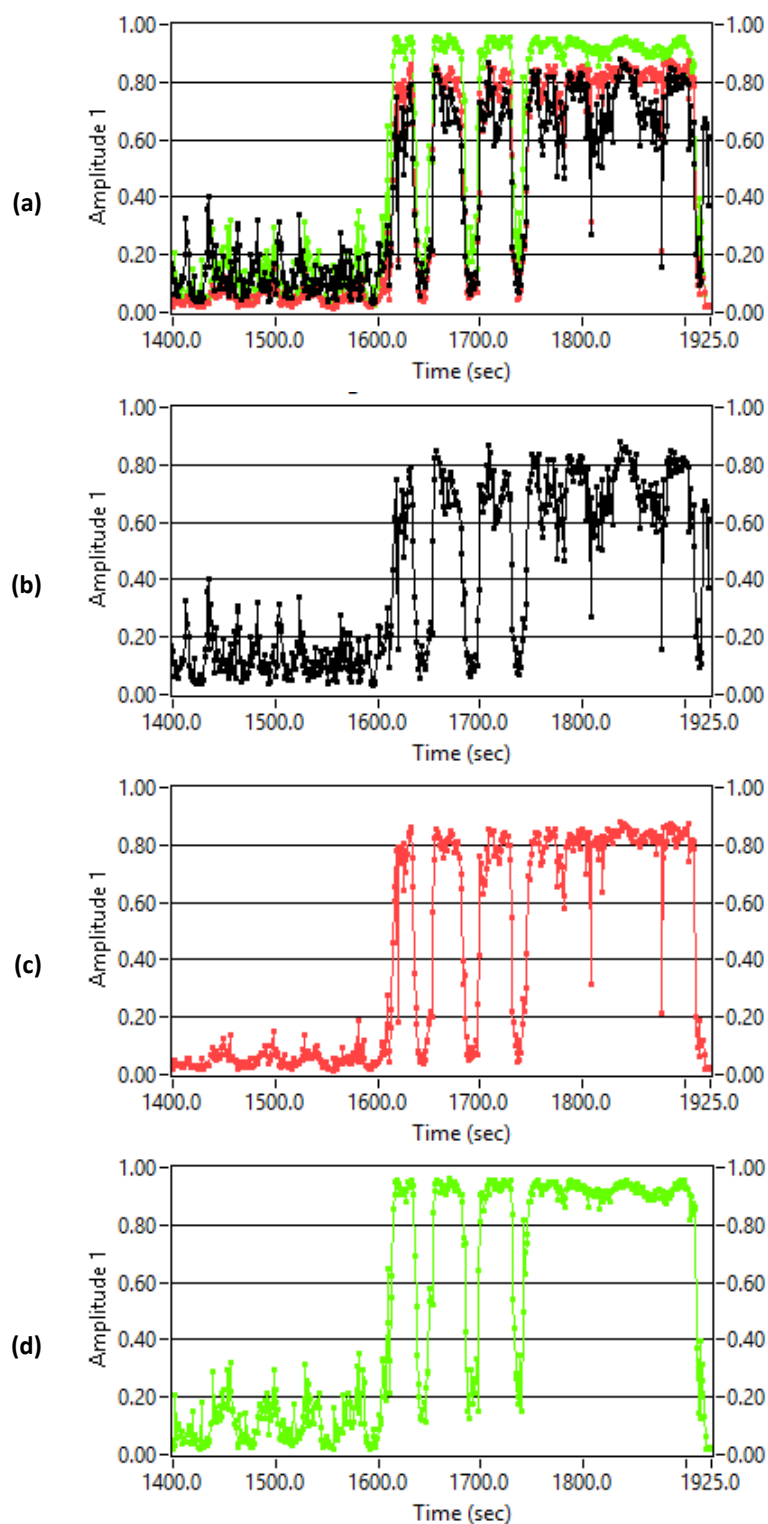


Figura 47: Andamento dell'indice di instabilità dipendente dalla Cross-correlazione (a) tra gli istanti 1.400 e 1.925 sec dell'acquisizione. La curva nera (b) è relativa alla Cross-correlazione tra ODC1 (UV-VIS) e ODC2 (NIR); la curva rossa (c) è relativa alla Cross-correlazione tra ODC1 (UV-VIS) e il trasduttore di pressione PRES1; la curva verde (d) è relativa alla Cross-correlazione tra ODC2 (NIR) e il trasduttore di pressione PRES1.

12 Conclusioni

Per definire un criterio di instabilità più generale, si è cercato di correlare le fluttuazioni del *rilascio di calore* (associabili alla parte UV-VIS del segnale di energia radiante) con quelle di *temperatura* (associabili alla parte IR del segnale di energia radiante) tramite l'utilizzo contemporaneo di un sensore ottico operante nel campo dell'UV-VIS-NIR (200-1000 nm) ed uno specifico operante nel campo NIR (900-2570 nm).

Dalla sonda ottica in zaffiro il segnale ottico proveniente dalla fiamma interna alla camera di combustione, e quindi le sue dinamiche di combustione, è stato splittato in due parti tramite una fibra ottica biforcuta: una parte è stata inviata al sensore UV-VIS dell'ODC1, e un'altra al sensore NIR dell'ODC2.

Per focalizzare meglio l'attenzione del sensore UV-VIS sulla dinamica dei principali radicali OH e CH che, come noto, delimitano il fronte di fiamma per una fiamma premiscelata metano-aria o gas naturale-aria, sono stati progettati, realizzati e integrati dei filtri passa-banda nel range 300-550 nm, e operanti in tutto il range 290-1000 nm.

Il sistema è stato sperimentato presso la facility dell'impianto ROMULUS in cui il sensore ottico che ha operato nel range UV-VIS ristretto a lunghezze d'onda tra 300-550 nm è risultato essere insensibile alle variazioni di funzionamento del bruciatore stesso e l'ampiezza del segnale si confondeva con il rumore del segnale. La motivazione di ciò va ricercata probabilmente nel fatto che la fiamma prodotta dal bruciatore ROMULUS ha una combustione che produce poche specie radicaliche OH e CH, infatti il fronte di fiamma ad occhio nudo risultava poco percettibile. Da ciò segue che il bruciatore ROMULUS non è stato adatto a testare completamente la tecnica ODC; il test completo si è potuto effettuare utilizzando l'impianto COMET-HP, in cui entrambi i sensori ottici (UV-VIS e NIR) sono risultati sensibili al segnale luminoso, consentendo l'analisi dei dati derivanti da regimi di combustione instabile e permettendo il confronto tra i vari indici da utilizzare per il monitoraggio on-line. Da questa prima indagine sembra che l'*indice di instabilità dipendente dalla Cross-correlazione* sia il più adatto al monitoraggio di impianti in scala reale.

In conclusione, lo sviluppo del sistema ODC nell'annualità è consistito nell'integrazione nel sistema di un sensore per l'infrarosso ed un filtro passa-banda per monitorare l'emissione dei radicali OH e CH: con queste aggiunte, l'ODC è attualmente in grado di seguire la dinamica del fronte di fiamma (rilascio di calore) e della temperatura. Arricchendo queste misure con la dinamica della pressione, campionata normalmente con trasduttori di pressione, è stato possibile analizzare diversi indici di instabilità, arrivando a definire un possibile criterio di instabilità più generale di quello di Rayleigh. Il sistema è stato finora utilizzato sulle infrastrutture sperimentali ENEA (COMET-HP e ROMULUS), ma mancano ancora test su combustori industrialmente più rilevanti ed in particolare in pressione, per dimostrare la capacità del sistema di lavorare in continua su impianti reali. A tale proposito, NUOVO PIGNONE (GE) di Firenze ha mostrato un grande interesse nei confronti del sistema ODC, e si è resa disponibile ad ospitare la sonda ODC su due dei loro impianti sperimentali, di cui uno a 15-20 bar. Tale attività consentirà ad ENEA di provare il sistema ODC nella sua ultima configurazione su combustori in condizioni di rilevanza industriale e di instabilità termo-acustiche necessari per la validazione dell'auspicato criterio di instabilità. Tale attività, che verrà svolta al di fuori del progetto, comporterà alcune ottimizzazioni che sono state individuate nel corso dell'attività svolta nell'annualità come:

1. la sostituzione del sensore UV-VIS e relativo filtro UV con un sensore di tipo GaP (Gallium Phosphide) operante nel range 150-550 nm;
2. la sostituzione della fibra biforcuta, delle relative prolunghe e degli adattatori di collegamento (che causano una forte attenuazione del segnale) con una sola fibra di lunghezza idonea e avente la zona biforcuta in prossimità dei sensori ODC. La nuova fibra biforcuta deve avere le caratteristiche di bundle che ne aumenta l'affidabilità meccanica, ed ogni ramo deve essere ottimizzato per i due differenti range UV-VIS e NIR;
3. la realizzazione di collegamenti Industrial-grade per la connessione e la gestione delle ruote portafiltri in ambiente industriali fortemente perturbati da campi elettromagnetici;

4. il porting dell'applicazione sviluppata del software di gestione e analisi on-line su piattaforma industriale Compact-RIO della National Instruments.

I risultati di tali test ed i dati monitorati, potranno essere utilizzati per effettuare analisi di tipo caotiche per individuare un ulteriore indice di instabilità.

13 Riferimenti bibliografici

1. R. Bruschi, C. Stringola, V. Casasanta, E. Giacomazzi, D. Coratella, and M. Caruggi, "Sistema di rivelazione e diagnosi di stato di combustione e relativo procedimento, applicabile in particolare a combustori", Italian Patent RM2004A000157, 29 marzo 2004.
2. R. Bruschi, M. Grottadaurea, E. Giacomazzi, S. Giammartini, E. Giulietti, C. Stringola and V. Casasanta, "Metodo e relativo dispositivo per la misura della velocità assiale dei gas combusti", Italian Patent RM2006A000159, 22 marzo 2006.
3. Giulietti E., Stringola C., Giacomazzi E., Nobili M., "Sistema per la Diagnosi dello Stato di combustione all'interno di Combustori", Italian Patent RM2014A000118, 11 marzo 2014.
4. E. Giulietti, C. Stringola, S. Cassani, L. Pagliari, E. Giacomazzi, S. Chiocchini, R. Lo Presti, A. Piegari, M.L. Grilli, "Miglioramento del sistema ODC per il monitoraggio della combustione e sviluppo del S/W di acquisizione dati", Accordo di Programma MSE-ENEA, Report Ricerca di Sistema Elettrico, RdS/PAR2015/237, Ottobre 2016.
5. E. Giacomazzi, G. Troiani, E. Giulietti, R. Bruschi, "Effect of Turbulence on Flame Radiative Emission", Experiments in Fluids, vol.44 (2008), issue 4, pp.557-564.
6. Bruschi R., Giacomazzi E., Giulietti E., Stringola C., Nobili M., Pagliaroli T., Giammartini S., "An optical technique for the identification and tracking of combustion instabilities", Seventh Mediterranean Combustion Symposium, MCS-11, Cagliari (Italy), 11-15 September, 2011.
7. Bruschi R., Giacomazzi E., Giulietti E., Pagliaroli T., Stringola C., Nobili M., "Optical Investigation of Thermo-Acoustic instabilities in turbulent flames", 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference), Roma (Italy), 21-23 May 2007.
8. Giacomazzi E., Giulietti E., Stringola C., Cassani S., Pagliari L., Chiocchini S., "Combustion Monitoring in Gas Turbines and enhanced stability at very lean conditions", ASME International Gas Turbine Institute, ASME TURBO Expo 2014 (Turbine Technical Conference and Exposition), Dusseldorf (Germany), June 16-20, 2014.
9. Bruschi R., Grottadaurea M., Giulietti E., Giacomazzi E., "Optical Anemometry", 29th Italian Section Combustion Meeting, paper number 033, Pisa (Italy), 14-17 June 2006.
10. Giulietti E., "Thermoacoustic instabilities in Gas Turbine burners: new diagnostic methodology", PhD thesis, University of Roma TRE, february 2011.
11. Chu B.T., Acta Mechanica, pp. 215-234, 1965.
12. Nicoud F. and Poinso T., "Thermoacoustic instabilities: Should the Rayleigh criterion be extended to include entropy changes?", Combustion and Flames, vol. 142, pp.153-159, 2005.
13. Samaniego J.M., Mantel T., "Fundamental Mechanisms in Premixed Turbulent Flame Propagation via Flame-Vortex Interactions Part I: Experiment", Combustion and Flame, vol. 118, pp. 537-556, 1999.
14. Samaniego J.M., Egolfopoulos F.N., Bowman C.T., "CO₂* Chemiluminescence in premixed flames", Combustion Science and Technology, vol. 109, Issue 1, pp. 183-203, 1995.

15. Lieuwen T.C. and Yang V., "Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modelling", AIAA-book, Progress in Astronautics and Aeronautics Series, Volume 210, 2005.
16. Palies P., Durox D., Schuller T., Candel S., "The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames", Combustion and Flame, Vol.157, pp.1698–1717, 2010.
17. Planck M., "The Theory of Heat Radiation", 2nd edition, Dover, New York, 1959.
18. Eckbreth A.C., "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species", 2nd edition Combustion Science and Technology Book Series, Gordon and Breach Publishers, 1996.
19. Tourin R.H. and Krakow B., "Applicability of Infrared Emission and absorption spectra to determination of hot gas temperature profiles", Applied Optics, Vol. 4, Issue 2, pp. 237-242, February 1965.
20. Gianinoni I., "Non-intrusive IR sensor for real time direct measurement of turbine inlet temperature", VKI Lecture Series 2009-06, High temperature pressure sensors for gas turbine applications, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, May 11-14 2009.

13 Abbreviazioni ed acronimi

APD	Avalanche PhotoDiode
CCS	Carbon Capture Storage
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ENEA	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
FFT	Fast Fourier Transform
IR	InfraRed optical range (700 nm – 1 mm)
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LNG	Liquefied Natural Gas
ND	Neutral Density
NG	Natural Gas
NIR	Near InfraRed optical range (700 – 2.500 nm)
ODC	Optical Diagnostics of Combustion
OASPL	Overall Sound Pressure Level
PSD	Power Spectral Density
Syngas	Synthetic Gas, ossia gas di sintesi
SPL	Sound Pressure Level
TG	Turbine a Gas
UV	UltraViolet optical range (10 nm – 400 nm)
VIS	Visible optical range (400-700 nm)