



Ricerca di Sistema elettrico

Miglioramento del sistema ODC per il monitoraggio della combustione e sviluppo del S/W di acquisizione dati

*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

E. Giulietti, C. Stringola, S. Cassani, L. Pagliari, E. Giacomazzi, R. Lo Presti, A. Piegari, M. L. Grilli (ENEA)
S. Chiocchini (Università di Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili

Obiettivo: Monitoraggio della combustione ed identificazione delle instabilità

Responsabile del Progetto: Dott.ssa F.R. Picchia, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE ALLE PROBLEMATICHE ATTUALI DELLA POLITICA ENERGETICA.....	5
1.1 LE ATTIVITÀ SVOLTE DALL'ENEA.....	5
2 DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SVOLTA	6
2.1 LA TECNICA ODC	6
2.2 INSERIMENTO DEL FILTRO VARIABILE NELLA CATENA DI MISURA.....	9
2.3 L'IMPIANTO COMET-HP	15
2.4 MESSA IN PRESSIONE DELLA CAMERA DI COMBUSTIONE	17
2.5 DESCRIZIONE DEL BRUCIATORE SIEMENS-ANSALDO INTERNO A COMET-HP	18
2.6 DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE E DELLA CATENA DI MISURA	20
2.7 DESCRIZIONE SINTETICA DEL SOFTWARE SVILUPPATO PER LA TECNICA ODC.....	23
3 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	25
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	25
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	26

Sommario

Il monitoraggio continuo, robusto e affidabile della combustione, l'identificazione in tempo reale dei fenomeni precursori di instabilità, ed il controllo della dinamica di combustione, 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 durante l'esercizio. Di conseguenza risulta fondamentale mettere a punto sensori robusti ed affidabili in grado di rilevare le instabilità in tempo reale. Per questo motivo l'attività dell'ENEA si è rivolta al 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.

Durante questa annualità di ricerca è stato ulteriormente sviluppato il sistema ODC, per aumentare le sue capacità di identificazione in tempo reale dei fenomeni precursori di instabilità e per portarlo a lavorare in condizioni di rilevanza industriale. Nelle precedenti annualità il sistema ODC era già stato testato sull'impianto COMET-HP dell'ENEA (che monta un bruciatore V64.3A della Siemens-Ansaldo) evidenziando le sue potenzialità nel monitorare rapide transizioni a regimi instabili. L'attività della presente annualità è consistita nell'ulteriore sviluppo dello strumento per superare un suo limite operativo, critico su impianti reali, messo in evidenza da alcune prove (effettuate al di fuori dell'Accordo di Programma) su un impianto di generazione di potenza della rete nazionale, messo a disposizione da ANSALDO ENERGIA ed ENIPOWER. In particolare, il limite evidenziato da superare consiste nella capacità del sensore di leggere l'energia radiante emessa dalla fiamma in ogni condizione di carico della macchina: il segnale può essere troppo basso in condizioni di bassa potenza, o eccessivo (saturazione del sensore) in caso di elevata potenza. Inoltre, nella presente annualità è stato anche ulteriormente sviluppato lo strumento software che controlla il sensore ODC e che permette anche l'analisi in tempo reale dei segnali acquisiti, con l'obiettivo di controllare la dinamica della combustione.

Per quanto riguarda l'estensione della capacità del sistema a leggere in presenza di forti variazioni di potenza della macchina, la soluzione adottata consiste nell'implementazione di una serie di filtri ottici di attenuazione montati su una ruota girevole automaticamente controllata dal software ODC per garantire un rapporto segnale/rumore ottimale. Inoltre, è stato anche affrontato e risolto il problema di alloggiare la testa ottica dell'ODC in un ambiente ad alta pressione (nelle prove sull'impianto ENIPOWER era stata usata una testa ottica di ANSALDO già certificata a 20 bar): la soluzione adottata per la testa ottica si è dimostrata meccanicamente e otticamente resistente nei test statici effettuati in laboratorio a 30 bar e con carichi termici di circa 500 °C. Tutto il sistema è stato infine testato sull'impianto COMET-HP esercito a 5 bar: la sonda ha resistito all'ambiente aggressivo del combustore, dimostrando di poter lavorare bene durante i test dinamici; lo stato del combustore è stato monitorato senza problemi, non rilevando alcuna instabilità termo-acustica (neppure evidenziate dai trasduttori di pressione).

1 Introduzione alle problematiche attuali della politica energetica

È indubbio che le tecnologie CCS (*Carbon Capture Storage*) concorrono alla riduzione delle emissioni dei gas serra degli impianti di generazione da fossile, ma le tecnologie CCS considerate mature non sono ancora state applicate su larga scala.

L'implementazione delle CCS è particolarmente problematica per gli impianti TurboGas, sia a ciclo semplice che combinato, a causa della bassa concentrazione della CO₂ nei gas di scarico.

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 NG e di syngas idrogenati, derivanti non a caso 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.

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). È facilmente prevedibile che le fonti energetiche convenzionali tenderanno a conservare il loro ruolo predominante anche per i prossimi decenni. E infatti la discontinuità e la scarsa concentrazione di potenza delle fonti rinnovabili, come l'energia eolica, non permettono ora, come in un prossimo futuro, di fronteggiare la crescente domanda mondiale di energia elettrica.

1.1 Le attività svolte dall'ENEA

Assunto che il principale obiettivo della politica energetica Europea è quello di aumentare la produzione di energia da fonte rinnovabile, occorre affrontare il problema della stabilità della rete elettrica dovuto alla natura intermittente e imprevedibile di tali fonti. È già un dato di fatto che le fluttuazioni di potenza del contributo rinnovabile di generazione di energia devono essere compensate con macchine turbogas, che hanno dunque assunto, e ancor di più assumeranno nel prossimo futuro, il ruolo di impianti di back-up. Le crescenti richieste di variazioni di carico (sia in salita che in discesa) sempre più rapide su tali macchine comportano maggiori rischi di incorrere in instabilità termo-acustiche.

L'insorgere di tali instabilità durante condizioni di esercizio a carico variabile (cioè flessibile) dipende fortemente dalla macchina utilizzata (e in particolare dal tipo di combustore, con maggiori problemi in quelli anulari) e dalla condizione di lavoro (avvio a liquido, base-load, picco). La maggiore tendenza alle instabilità termo-acustiche non è solo dovuta alla maggiore richiesta di flessibilità di carico, ma anche a quella di flessibilità di combustibile; tuttavia, questo secondo aspetto non è critico per gli utilizzatori adesso, ma lo sarà in futuro: le basse percentuali (< 5%) di idrogeno attualmente immesse nella rete di distribuzione del gas non danno problemi, o sono stati risolti con modifiche agli attuali sistemi di controllo della dinamica di

combustione. Di fatto il monitoraggio continuo, robusto e affidabile della combustione, l'identificazione in tempo reale dei fenomeni precursori di instabilità, e il controllo della dinamica di combustione, sono temi molto importanti per i produttori e utilizzatori di turbogas.

Data l'importanza dell'argomento, è strategico migliorare e rendere più robusto il monitoraggio della combustione nei turbogas, in modo da ottenere un indice affidabile dei fenomeni precursori di tali instabilità. Questa ricerca deve necessariamente essere svolta in condizioni simili a quelle di impianto, prima fra tutte a pressioni maggiori di quella atmosferica.

Durante questa annualità di ricerca l'ENEA ha impegnato parte della sua attività a migliorare la catena di misura associata ad un sensore ottico ODC per il monitoraggio della combustione, in modo tale che si dimostri robusto ed affidabile in combustori con condizioni sempre più simili a quelli delle macchine reali. Ciò ha richiesto di risolvere il problema della capacità di campionare l'energia radiante della fiamma in modo adeguato, evitando cioè la saturazione del sensore o l'eccessiva attenuazione ottica del segnale in ingresso: la criticità di questo argomento deriva dal fatto che nelle macchine reali, operate da spente fino a pieno carico, l'energia radiante in gioco varia notevolmente. Per aumentare l'affidabilità del sistema ODC in ambito industriale, uno dei problemi maggiori da risolvere è quindi quello dell'attenuazione controllata dell'energia radiante proveniente dal combustore. A tale scopo, l'ENEA ha utilizzato un supporto con una serie di filtri grigi con diversa percentuale di attenuazione su un largo range spettrale e dotato di un sistema motorizzato controllato dal software LabVIEW dell'ODC.

2 Descrizione dell'attività svolta

2.1 La tecnica ODC

La metodologia diagnostica sviluppata in ENEA ([1],[2],[3]) 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 sensore ottico che è investito dall'energia radiante emessa dalla fiamma, lungo ogni direzione racchiusa entro il suo angolo visuale, rileva istantaneamente in maniera sovrapposta le intensità dei singoli contributi distribuiti su diverse lunghezze d'onda λ . L'energia radiante raccolta dal sensore si deve intendere non solo circoscritta ad un "cono di vista" nello spazio, ossia di propagazione generato dal filtraggio direzionale del dominio osservato, ma anche integrata sulla banda passante [nel range di lunghezze d'onda λ_1, λ_2] del dispositivo ricevente costituito dal fotodiode.

Il sistema ha un basso livello di intrusività, necessita di accessi ottici con diametro dell'ordine dei millimetri, 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 o di trattamento termico.

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, caratteristiche necessarie per realizzare un efficiente sistema di controllo che permetta 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*) (**Fig. 1**) [4], e che il segnale di luminosità può quindi essere usato nella diagnostica delle instabilità di combustione ([5], [6], [7]).

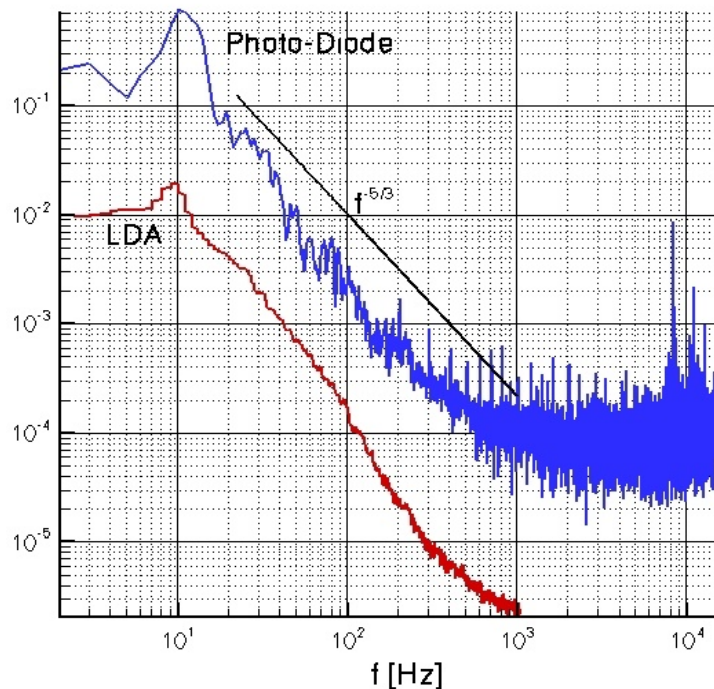


Fig. 1: Confronto LDA e ODC: spettro di energia cinetica (LDA) e spettro di energia radiante (ODC, Photo-Diode).

I vantaggi che si hanno nell'utilizzare questa nuova 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 (**Fig. 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. Questa caratteristica è di notevole importanza in quanto le fluttuazioni ottiche (integrate nello spazio dell'angolo di vista della sonda e nel range di sensibilità ottica del sensore), non interagendo tra di loro, garantiscono l'integrità dell'informazione contenuta. La trasduzione da segnale ottico a segnale elettrico viene effettuata da un sensore ottico APD (*Avalanche PhotoDiode*). Questa procedura permette un elevato grado di conservazione del contenuto informativo del segnale, perché le fenomenologie di interesse 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.

Il segnale acquisito 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). L'uso della fibra ottica permette di contenere l'intrusività (accesso ottico dell'ordine di grandezza del diametro della fibra usata, ad esempio 5 mm).

Il sensore ottico APD attualmente in uso presenta una sensibilità alla radiazione ottica che si estende nel range di lunghezze d'onda $200 \div 1000$ nm (ossia dall'ultravioletto UV al vicino infrarosso NIR).



Fig. 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 ($50 \text{ kHz} \div 1 \text{ MHz}$). 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 [8]. La tecnologia 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 tecnologia ODC è possibile implementare configurazioni delle sonde per ottenere informazioni particolari sullo stato dinamico del processo di combustione in atto ([2],[9]).

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 [7] e delle eventuali indesiderate pulsazioni della formazione di specie chimiche radicaliche.

La catena di misura utilizzata dalla tecnica ODC sul TVC comprende (**Fig. 3**):

- 1) **Sonda ottica ODC in zaffiro** con rivestimento esterno in allumina
- 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) 200-1000 nm.
- 3) **Supporto/attenuatore con porta-filtri variabile**. Esso permette l’alloggiamento di filtri e il collegamento con le fibre ottiche tramite attacco SMA905. I **filtri ottici grigi** (neutri) e i **filtri passa basso** sono fondamentali per controllare la qualità (o meglio l’ampiezza) del segnale ottico campionato, e 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 e la deriva del segnale causata dall’emissione spontanea del refrattario riscaldato presente all’interno della camera di combustione che emette in maniera significativa sopra ad una lunghezza d’onda di circa 500 nm.
- 4) **Sensore ottico APD ed elettronica di amplificazione**
 - a) **Caratteristiche del sensore ottico APD:**
 - spectral response range (λ) = 200 to 1000 nm
 - diameter of effective active area (ϕ) = 3.0 mm
 - b) **Caratteristiche dell’elettronica di amplificazione in cui è montato il sensore ottico:**
 - frequency bandwidth (cut-off frequency, f_c) = DC÷100 kHz
 - Noise equivalent power (NEP, at $f=100 \text{ kHz}$ and $\lambda = 800 \text{ nm}$) = $0.02 \text{ pW/Hz}^{1/2}$

Il sistema è collegato tramite cavo BNC alla scheda di acquisizione riportata precedentemente.

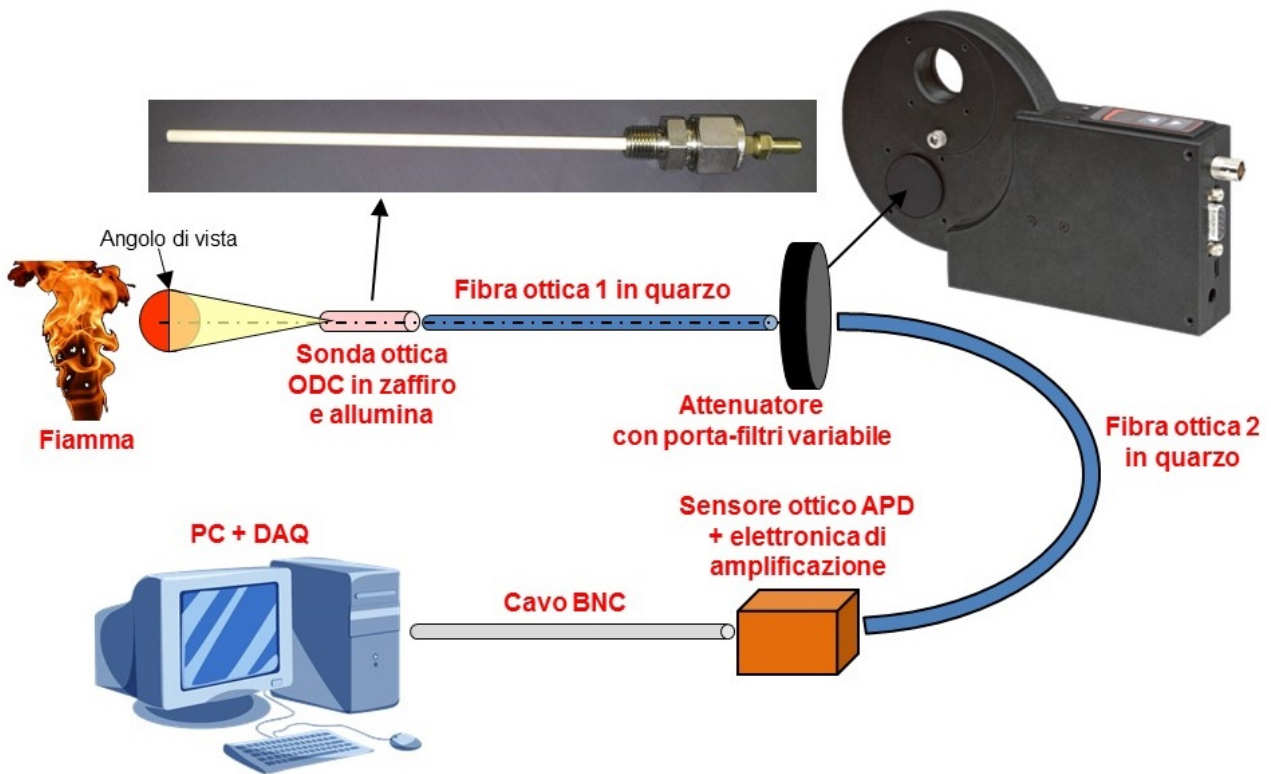


Fig. 3: Schema della catena di misura per la tecnica ODC.

Le dinamiche della fiamma vengono catturate riuscendo a captare la chemiluminescenza dei radicali OH^* ($\sim 306 \text{ nm}$), CH^* ($\sim 431 \text{ nm}$), C_2^* ($\sim 516 \text{ nm}$), H_2CO^* ($\sim 340 \text{ nm}$) e H_2O ($\sim 616 \text{ nm}$), che si concentra ed assume maggiore intensità nel campo di lunghezze d'onda compreso tra $\sim 280 \text{ nm}$ e $\sim 600 \text{ nm}$.

2.2 Inserimento del filtro variabile nella catena di misura

Durante l'esercizio di impianti industriali reali il carico termico presenta una forte variabilità durante l'arco della giornata, e quindi varia molto la portata del combustibile e di conseguenza l'energia radiante emessa spontaneamente dalla fiamma del combustore. Utilizzando un filtro ottico a "optical density" (OD) fissa si corre il rischio che il sensore ottico in alcune condizioni particolari possa saturare oppure presentare una eccessiva attenuazione con un conseguente segnale troppo basso per essere rilevato.

Per aumentare le capacità di identificazione in tempo reale dei fenomeni precursori di instabilità del sistema ODC, e per aumentare la sua affidabilità di operatività in ambito industriale, uno dei problemi maggiori affrontati è stato quello di ottenere una attenuazione controllata dell'energia radiante proveniente dal combustore. A tale scopo, l'ENEA ha utilizzato un supporto con una serie di filtri grigi aventi diversa "optical density" e quindi diversa percentuale di attenuazione su un largo range spettrale. Tale ruota di filtri è dotata di un sistema motorizzato controllato direttamente dal software LabVIEW dell'ODC e che quindi può essere regolato automaticamente dal software che sta monitorando on-line il segnale ottico proveniente dalla camera di combustione.

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 come mostrato in Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 e Fig. 7.



Fig. 4: Contenitore ATEX all'interno del quale è posizionato il sistema ODC con la ruota porta-filtri.

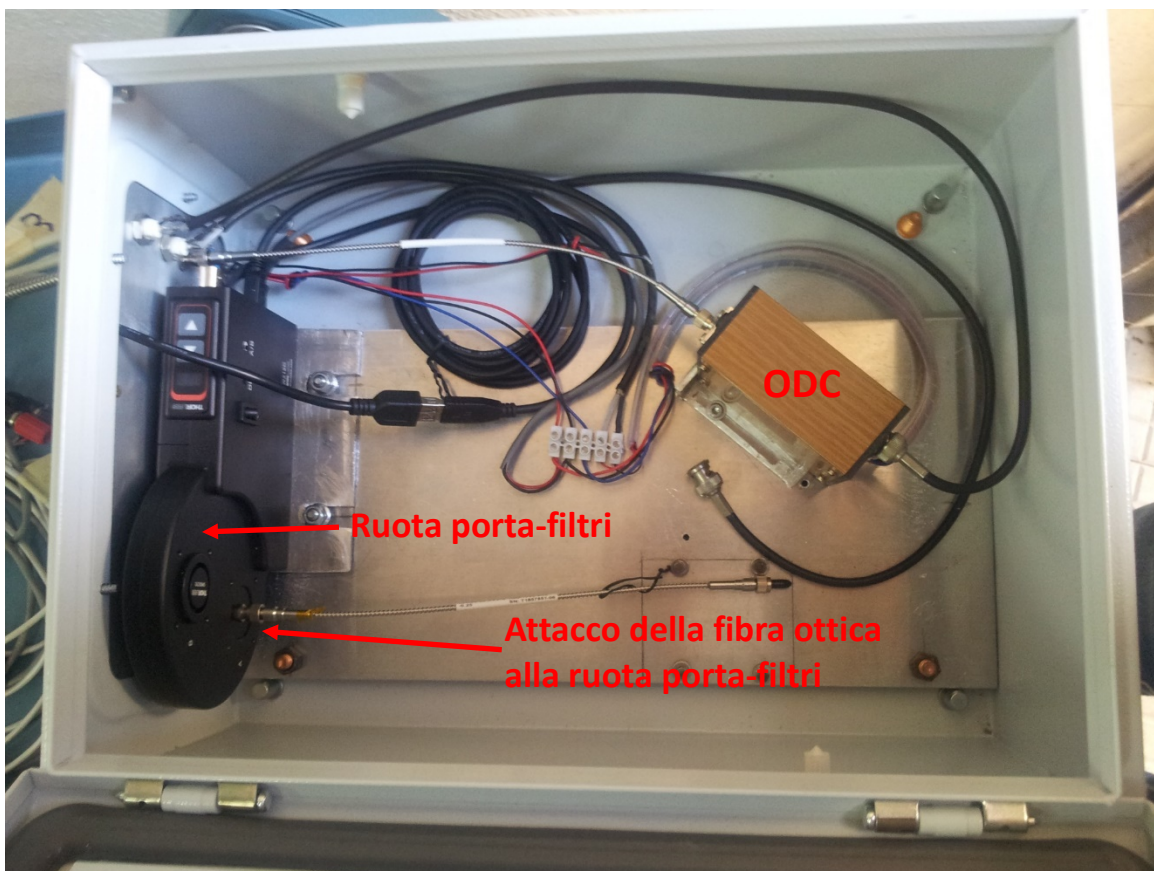


Fig. 5: Immagine del contenuto della scatola ATEX in cui sono evidenti il posizionamento del sistema ODC, della ruota porta-filtri e dell'attacco della fibra ottica che collega la ruota con l'ODC.

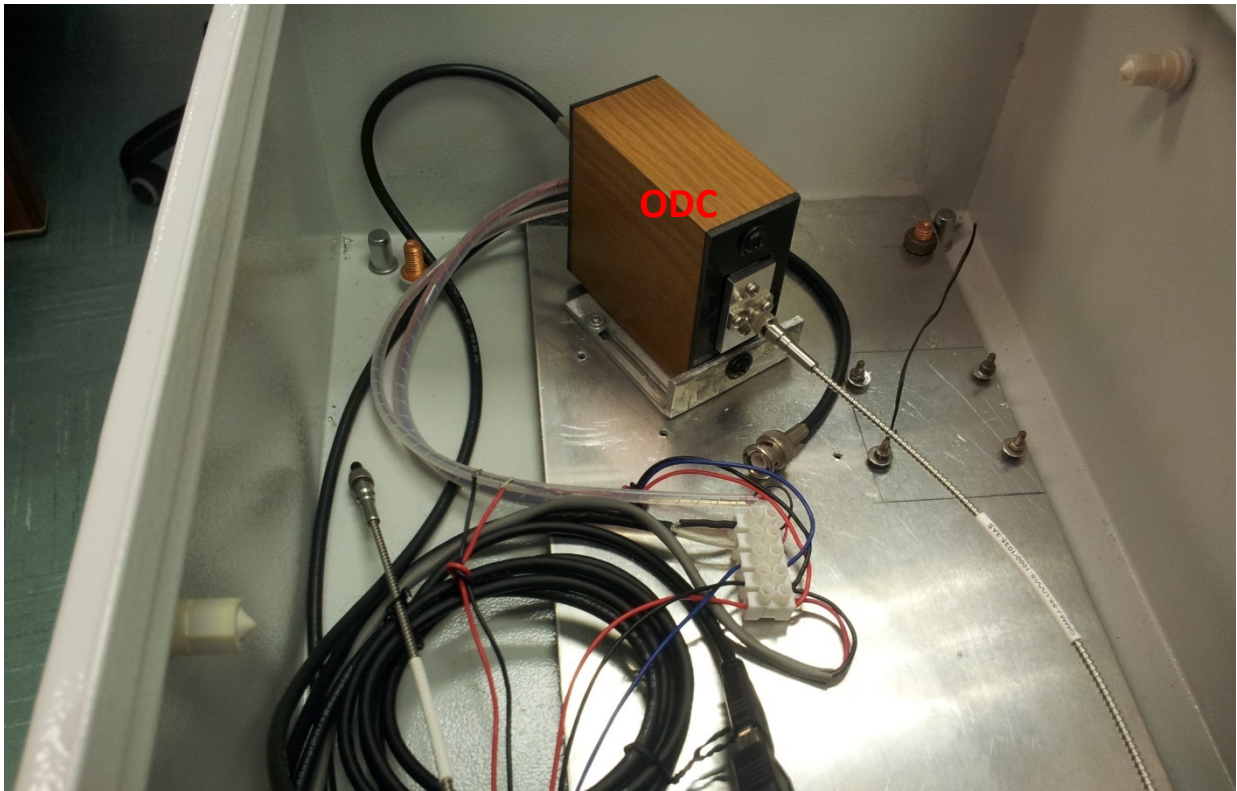


Fig. 6: Immagine del sensore ottico ODC posizionato all'interno della scatola ATEX.



Fig. 7: Immagine della ruota porta-filtri posizionata internamente alla scatola ATEX.

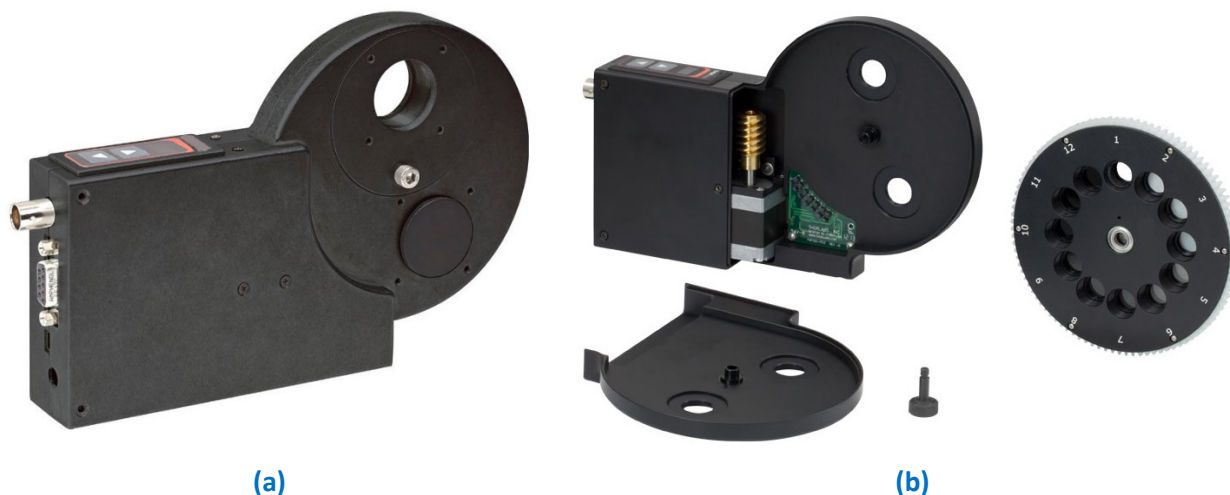


Fig. 8: Immagine della ruota porta-filtri come appare esternamente (a) e come è realizzata internamente (b).

In particolare all'interno della ruota porta-filtri (**Fig. 8**) sono stati inseriti 11 filtri grigi aventi optical density diversa (**Tab. 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. L'attenuazione può essere causata dall'assorbimento ma anche dalla riflessione, dallo scattering e altri processi fisici. La radiazione che non viene trasmessa rappresenta il livello di attenuazione.

Tab. 1: Elenco dei filtri inseriti nella ruota porta-filtri.

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%

Uno studio preliminare è stato effettuato per individuare la tipologia di filtri più adatta a tale applicazione. Essendo il range di lunghezze d'onda di interesse molto ampio, e non essendoci particolari indicazioni sul livello di radiazione riflessa e sull'assorbimento dei filtri stessi ma solo sull'attenuazione totale, si è optato

per l'utilizzo di filtri realizzati con strati metallici su un substrato trasparente. In particolare si è visto che con sottili strati di Nichel depositati su substrati di quarzo si poteva ottenere una risposta spettrale abbastanza piatta (uniforme in lunghezza d'onda) e un livello di attenuazione facilmente controllabile.

Un esempio di simulazione della risposta spettrale di uno strato di Nichel di 5 nm e di 30 nm, in trasmissione, riflessione e assorbimento è riportato rispettivamente in Fig. 9. Nei due casi mostrati, la trasmittanza media è di circa il 55% nel primo caso e di circa il 5% nel secondo, quindi l'attenuazione (radiazione non trasmessa) sarà del 45% e del 95% in media.

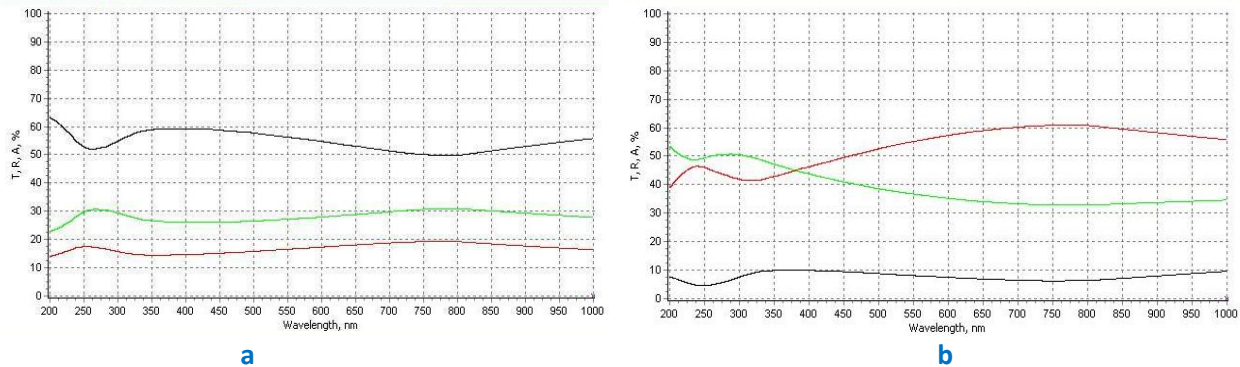


Fig. 9: Trasmissione spettrale (curva nera), riflessione (rossa) e assorbimento (verde) di uno strato di Nichel di spessore 5 nm in a) e 30 nm in b), su substrato di quarzo.

La trasmissione spettrale misurata su un filtro neutro realizzato in ENEA è mostrata in Fig. 10a e appare simile alla simulazione di Fig. 9a. Alcune differenze possono essere dovute all'indice di rifrazione del Nichel che può differire da quello teorico. La realizzazione in laboratorio di alcuni filtri ha consentito di valutarne anche la stabilità nel tempo come mostrato in Fig. 10b.

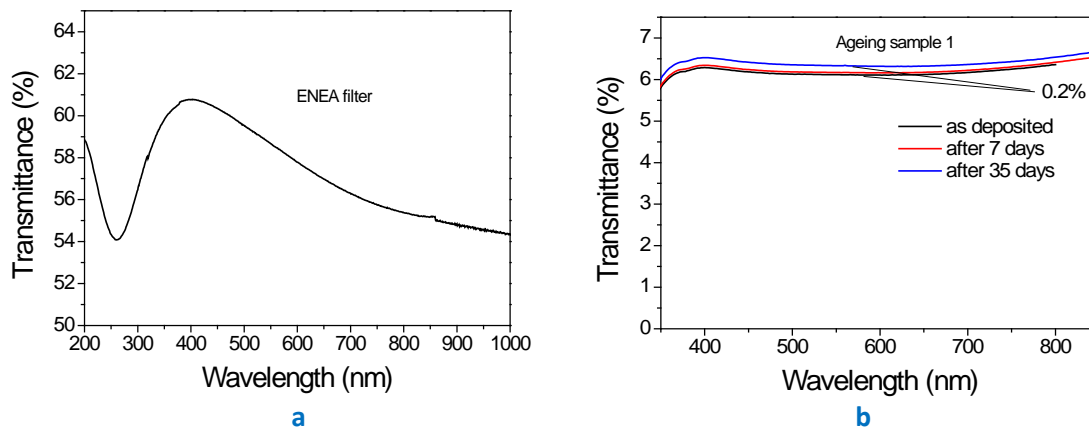


Fig. 10: a) Trasmittanza misurata su un filtro di Nichel a bassa attenuazione, b) variazione della trasmittanza di un filtro di Nichel con elevata attenuazione dopo una settimana e dopo un mese dalla realizzazione.

I filtri di Nichel montati sulla ruota (Tab.1) sono stati misurati in laboratorio per verificarne la risposta spettrale. Le misure effettuate con uno spettrofotometro Perkin-Elmer Lambda 1000, sono riportate in Fig. 11, per alcuni filtri.

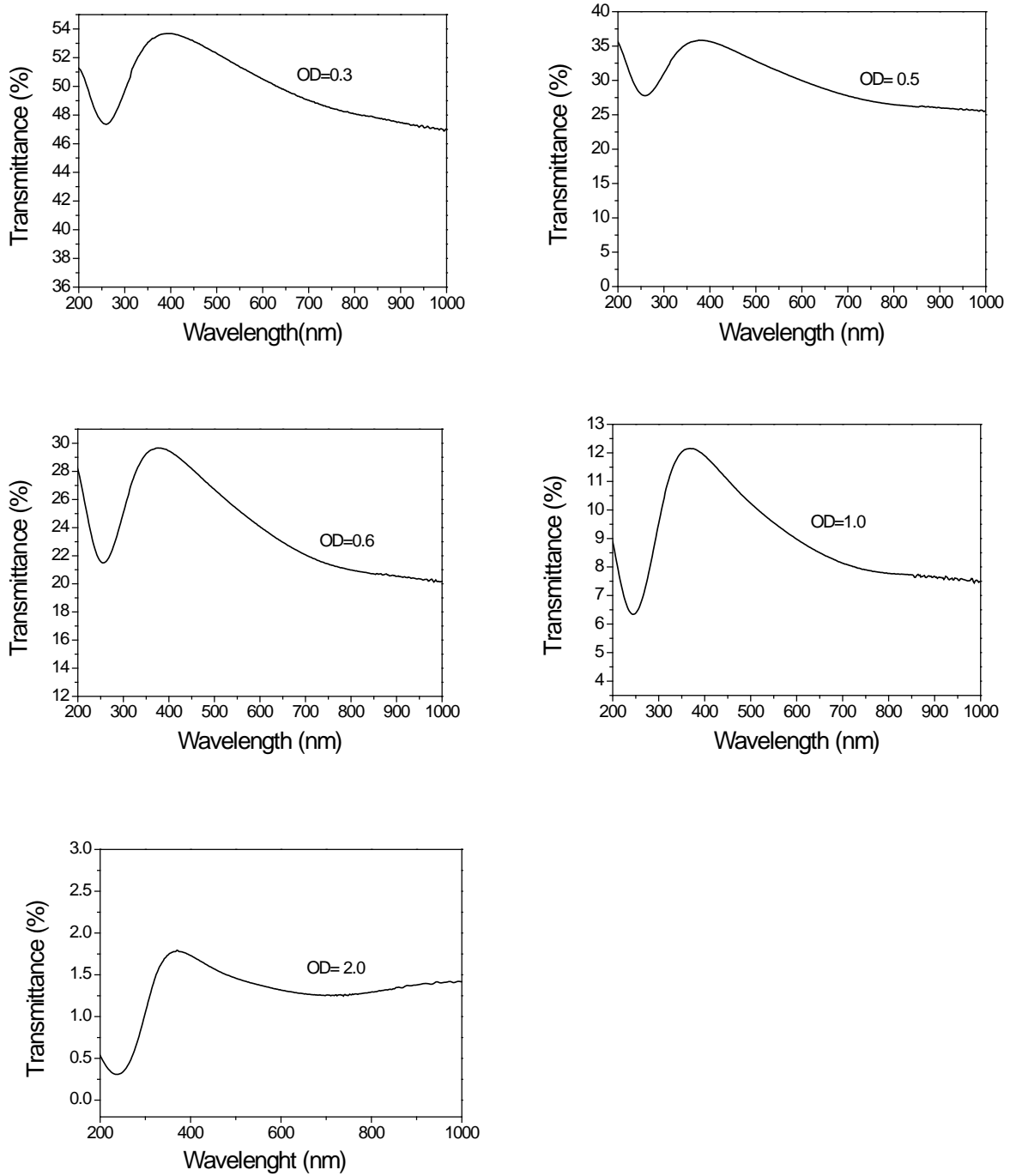


Fig. 11: Trasmittanza misurata su cinque filtri della Tabella 1

Come si può vedere dai grafici, le variazioni di trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda sono contenute in piccole percentuali, cioè i filtri sono sostanzialmente neutri. Un successivo sviluppo potrà prevedere la realizzazione di filtri passabanda.

2.3 L'impianto COMET-HP

COMET-HP (*COMbustion Experimental Tests in High Pressure conditions*) (**Fig. 12**) è un impianto sperimentale per prove di combustione in bruciatori e camere di combustione per Turbine a Gas. L'impianto opera in condizioni di similitudine, a pressione massima di 7 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.

L'impianto è ubicato in adiacenza della Hall tecnologica dell'edificio F-40 del C.R. ENEA Casaccia.

La "sezione di prova" è collocata all'interno di un bunker in cemento armato, ventilato e con tetto cedevole, in modo che l'impianto operi sostanzialmente in ambiente confinato ed inaccessibile al personale quando il processo combustivo è attivo.

All'esterno del bunker sono situati gli skid di controllo (**Fig. 13**) e regolazione dell'aria comburente e del gas naturale.

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").



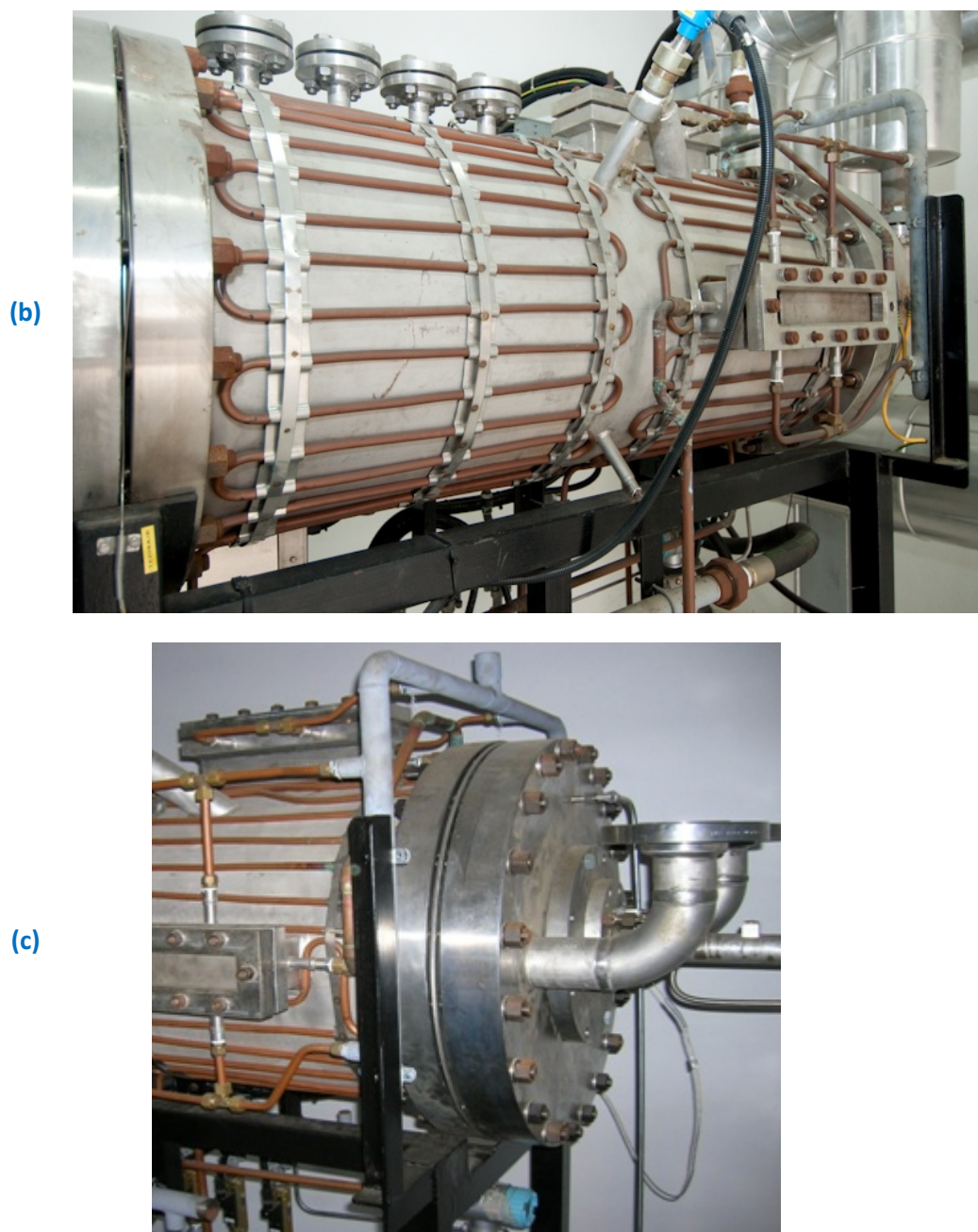


Fig. 12: Visione d'insieme dell'impianto COMET-HP.



Fig. 13: Skid di controllo e regolazione dell'aria comburente e del gas naturale.

2.4 *Messa in pressione della camera di combustione*

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 tre macchine capaci di produrre circa 700 Nm³/h di aria alla pressione di circa 7 bar.

Al fine di regolare e stabilizzare le portate del gas metano e dell'aria con l'impianto COMET-HP operante a pressione ambiente ($p = 1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa}$) si è installato sulle relative linee due riduttori di pressione (regolatori/stabilizzatori) in grado di regolare da 1 a 7 bar le pressioni di cui sopra.

Per realizzare invece diverse condizioni operative e mettendo l'impianto COMET-HP in pressione, è stata utilizzata una strozzatura lungo il flusso dell'impianto.

La strozzatura (o laminazione) dei fumi viene effettuata mediante un orifizio (flangia, [11]) che realizza un efflusso critico, ossia una condizione di choking (che si realizza se il rapporto tra le pressioni supera il valore di 0.52828) e quindi di onda d'urto nella gola a causa dell'elevato ΔP . La soluzione è stata preferita al posto di una "valvola di regolazione" unicamente per ragioni di costo e per l'affidabilità del componente. Per contro, questa soluzione impone alcune limitazioni sulle condizioni sperimentali. In particolare, data la dimensione dell'orifizio, si stabilisce un legame tra portata, temperatura e pressione nella sezione di prova. Al fine di rendere più flessibile l'esercizio dell'impianto si è previsto di ([11],[12]):

1. realizzare una sezione di laminazione componibile in modo da consentire di inserire diversi orifizi con diversi diametri (35, 47, 72 mm) in corrispondenza dei tre livelli di pressione:
 - 1 MPa = **10 bar** (nel caso di orifizio del diametro da 35 mm)
 - 0.5 MPa = **5 bar** (nel caso di orifizio del diametro da 47 mm)
 - 0.2 MPa = **2 bar** (nel caso di orifizio del diametro da 72 mm)
2. consentire il funzionamento a pressione atmosferica (0.1 MPa) rimuovendo completamente la sezione di strozzatura (o laminazione). In questo caso la regolazione viene realizzata mediante una valvola a farfalla.

Per la sostituzione di un orifizio occorre scollegare i due raccordi dell'acqua di attemperamento, smontare la flangia raffreddata [12], togliere il disco di materiale isolante, sfilare l'orifizio, montarne uno di diametro più piccolo per eseguire prove a pressione maggiore, o più grande per pressioni inferiori e poi rimontare il disco isolante, la flangia raffreddata e collegare l'acqua di attemperamento.

Per svolgere le prime prove in pressione della strumentazione si è deciso di far operare l'impianto ad una pressione di **5 bar**. Sono state effettuate molte prove con diverse portate di aria primaria, aria secondaria, gas pilota e gas primario: le condizioni di instabilità termo-acustiche non sono mai state raggiunte (non rilevate né dai trasduttori di pressione, né dal sistema ottico ODC). Anche se le condizioni instabili non sono state raggiunte a questo livello di pressione, le prove sull'impianto COMET-HP hanno dimostrato l'operatività e la robustezza del sistema realizzato in condizioni dinamiche.

2.5 *Descrizione del bruciatore Siemens-Ansaldo interno a COMET-HP*

Nelle macchine che operano in combustione, il fluido è generalmente turbolento. Nella combustione turbolenta non-premiscelata le reazioni chimiche sono essenzialmente limitate dal tasso di dissipazione scalare con cui i reagenti diffondono. La combustione turbolenta premiscelata permette invece di superare questo limite, poiché combustibile ed ossidante entrano nella camera di combustione in una condizione già miscelata, così che la reazione può aver luogo alquanto rapidamente. Perciò la combustione turbolenta premiscelata consente una reazione più veloce o, equivalentemente, camere di combustione più compatte, e quindi leggere. Tuttavia, nella combustione premiscelata risulta difficile controllare la stabilità della combustione in quanto non vi è un punto preferenziale di ancoraggio della fiamma (a differenza di quanto avviene nel caso non premiscelato, in cui la fiamma si ancora nel luogo a composizione stechiometrica). La combustione premiscelata è sempre più oggetto di crescente interesse per quanto riguarda le Turbine a Gas, poiché consente di contenere le emissioni di NO_x .

Il combustore V64.3A (**Fig. 14**) presenta una configurazione mista, in cui sono presenti entrambe le modalità di fiamma. In particolare, ogni combustore presenta una lancia centrale che alimenta la fiamma diffusiva pilota circondata dal vorticolatore diagonale da cui fluisce il flusso premiscelato.

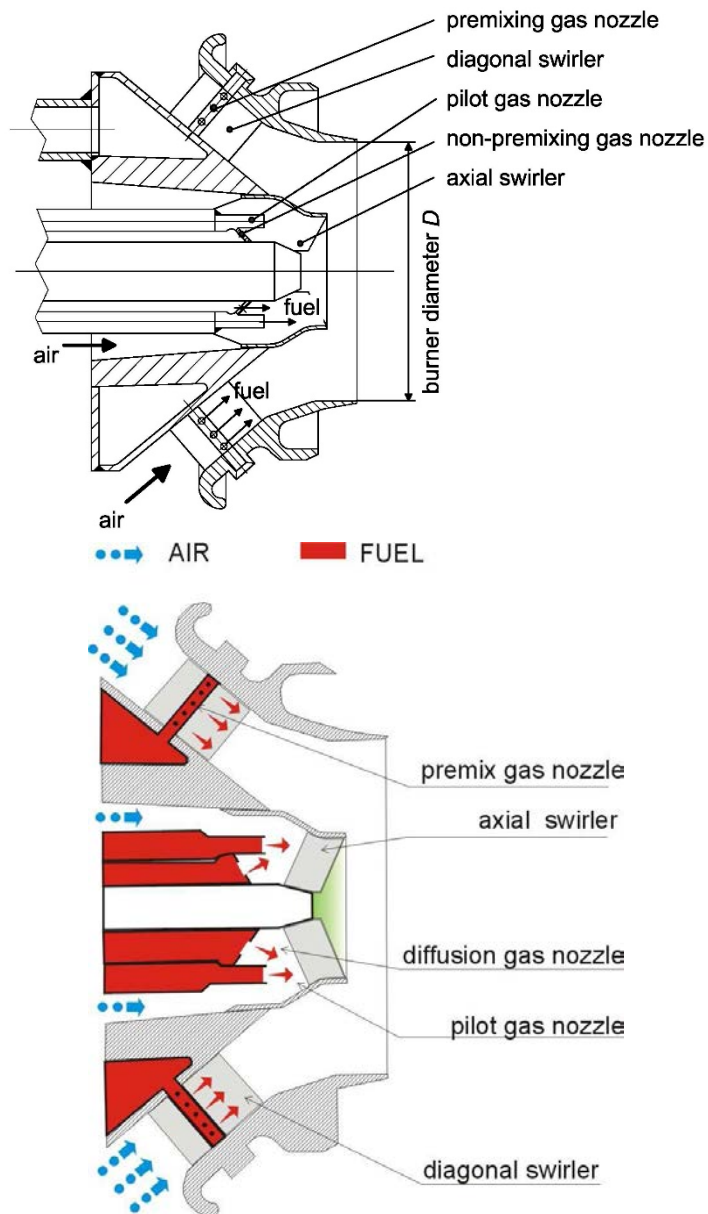


Fig. 14: Schema di un bruciatore Siemens-Ansaldo V64.3A.

2.6 Descrizione dell'apparato sperimentale e della catena di misura

Si è provveduto ad equipaggiare l'impianto COMET-HP con la seguente sensoristica: due trasduttori di pressione Kulite (**Fig. 15**, **Fig. 16**, **Fig. 17**) la cui pressione nominale è 5 bar, un sensore ottico ODC (**Fig. 18**) avente un fotodiodo APD operante nel range di lunghezze d'onda 200-1000 nm.

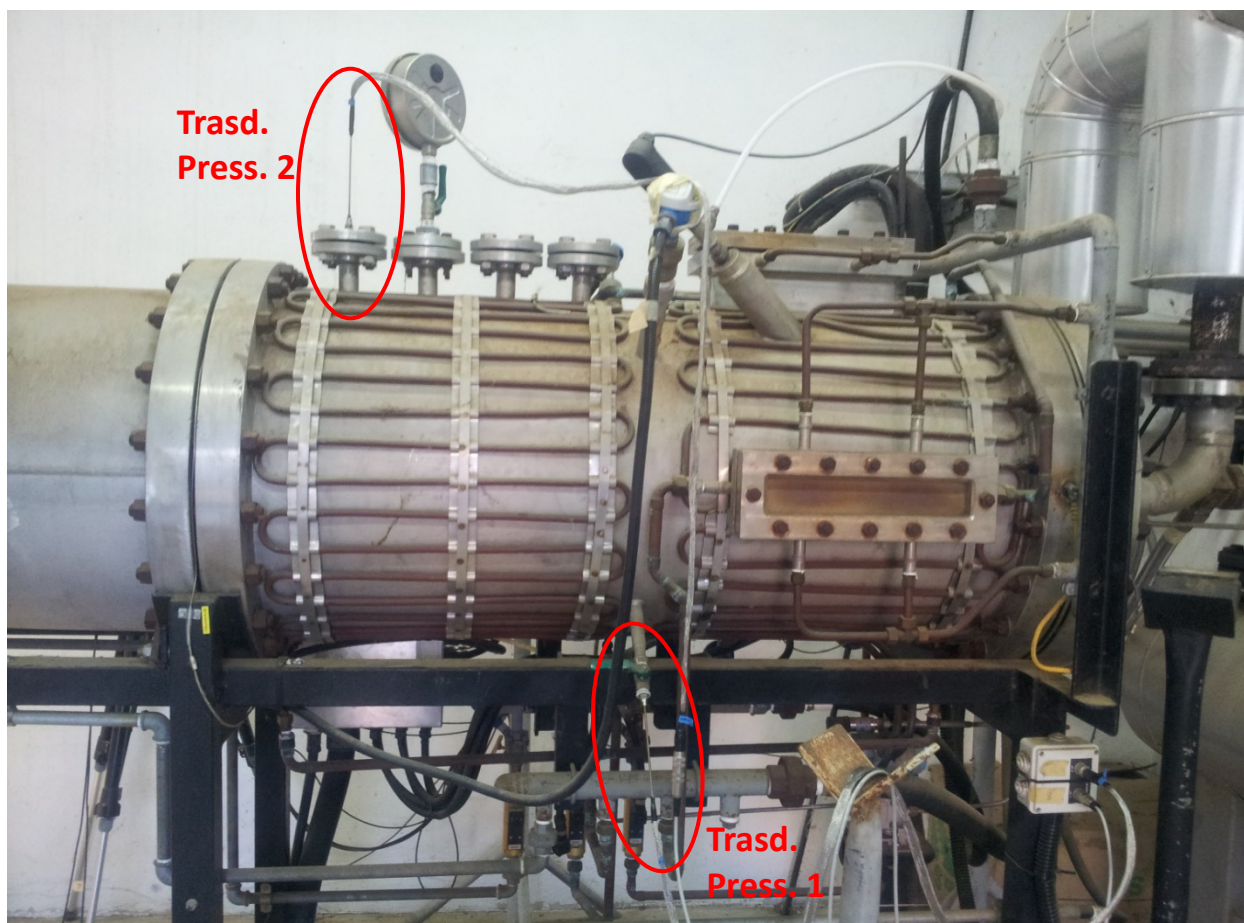


Fig. 15: Camera di combustione dell'impianto COMET-HP in cui sono stati collegati due trasduttori di pressione.

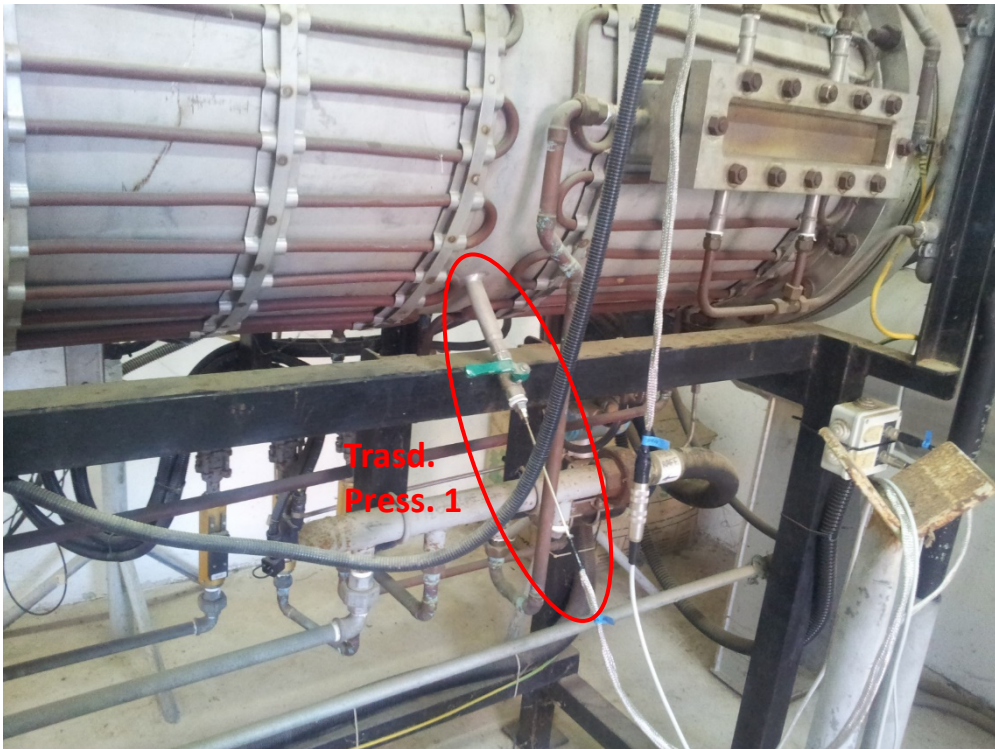


Fig. 16: Particolare del collegamento del trasduttore di pressione 1.



Fig. 17: Particolare del collegamento del trasduttore di pressione 2.

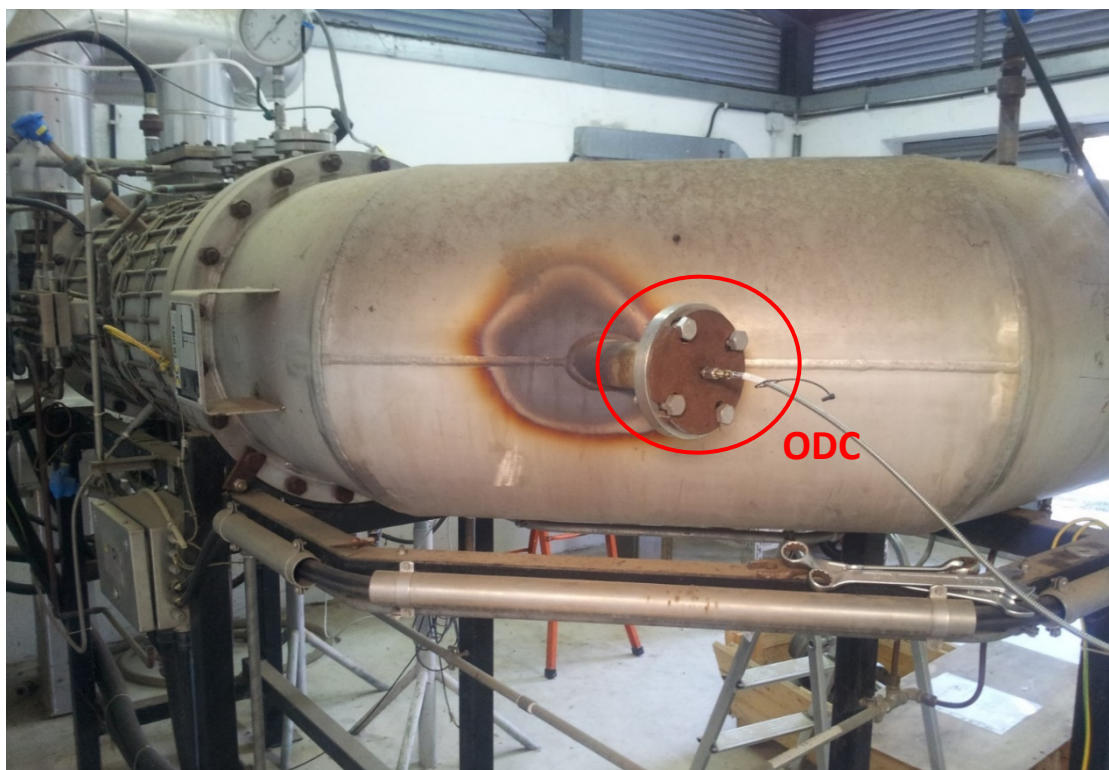


Fig. 18: Particolare del collegamento della testa ottica ODC alla flangia frontale.

Con l’impianto COMET provvisto dell’equipaggiamento sensoristico il cui schema è mostrato in Fig. 19, funzionante ad una pressione di 5 bar e rifornito d’aria preriscaldata alla temperatura di 280 °C, muovendo da uno stato di esercizio regolare e stabile, si è cercato di indurre volutamente l’instabilità variando per gradi le portate d’aria e metano (e quindi il rapporto di equivalenza). Non si è riusciti a raggiungere tale condizione sperimentale perché il combustore non ha mai raggiunto un regime di instabilità termo-acustica.

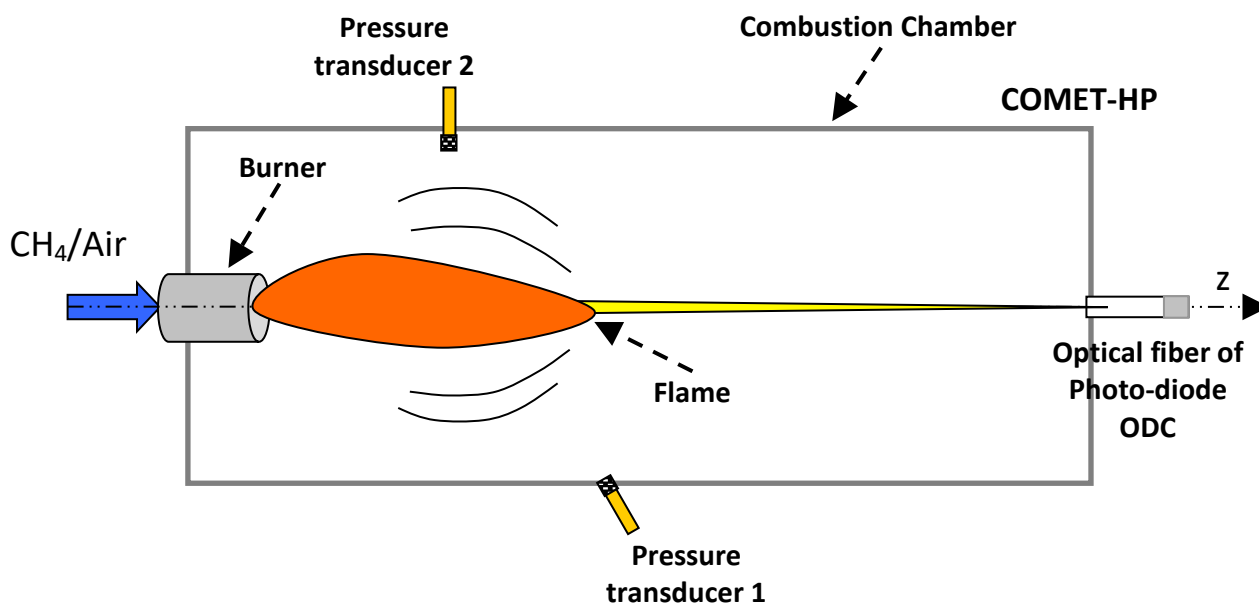


Fig. 19: Schema del set-up utilizzato per lo studio del bruciatore V64.3A esaminato in questo lavoro e inserito nell’impianto COMET-HP. Dal suo schema è possibile osservare il posizionamento di una sonda ODC e di due trasduttori di pressione Kulite.

2.7 Descrizione sintetica del software sviluppato per la tecnica ODC

In base all'esperienza ENEA nel campo dell'acquisizione dati e delle instabilità termo-acustiche, si sono poi sviluppati due diversi software:

A) Software di acquisizione

I segnali (derivanti dagli ODC oppure dai trasduttori di pressione, per un totale di 4 canali) possono essere **acquisiti** mediante un Software di acquisizione sviluppato in LabVIEW dall'ENEA che permette di visualizzare i segnali on-line.

Dall'interfaccia è possibile scegliere di visualizzare:

- i 4 segnali in acquisizione (con alcuni indicatori relativi alla bontà della dinamica in acquisizione e della possibile saturazione) visualizzabili in Volt oppure in bar;
- Auto- Correlazioni e Cross-Correlazioni tra i vari canali;
- Auto-Spettri e Cross-Spettri tra i vari canali;
- Indici di instabilità vari (tra i quali l'Indice di Rayleigh);
- Waterfall per l'analisi della deriva in frequenza.

B) Software di post-processing e test

I segnali (derivanti dagli ODC oppure dai trasduttori di pressione, per un totale di 4 canali) possono essere successivamente **post-processati** mediante un Software sviluppato in LabVIEW dall'ENEA.

Dall'interfaccia è possibile scegliere di avere:

- la visualizzazione dei 4 canali acquisiti o generati;
- la possibilità di esportare i canali in formato .txt;
- il controllo della qualità della dinamica dei segnali;
- Denoising dei segnali mediante tecnica della media mobile, del raggruppamento oppure della tecnica Wavelet;
- il calcolo dell'OASPL (Overall Sound Pressure Level in dB);
- Auto- Correlazioni e Cross-Correlazioni tra i vari canali;
- Auto-Spettri e Cross-Spettri tra i vari canali;
- gli andamenti delle scale degli Spettri;
- il Cepstrum di un canale (è la trasformata di Fourier del logaritmo della trasformata di Fourier del segnale, e serve ad analizzare le velocità di cambiamento del contenuto spettrale di un segnale);
- gli Spettrogrammi (sono l'andamento delle trasformate FFT nel tempo; sono la modalità con cui viene rappresentata l'energia di un segnale nel piano tempo-frequenza/scala);
- gli Scalogrammi della tecnica Wavelet (è il modulo quadrato dei coefficienti della CWT, ossia della Trasformata Wavelet Continua). L'energia del segnale viene mappata nel piano tempo-frequenza/scala.
- Waterfall per l'analisi della deriva in frequenza.

Per acquisire i dati in maniera continua ed in modalità non presidiata si è aggiornato il sistema (hardware/software) con le seguenti caratteristiche:

- avvio automatico del PC alla presenza di rete elettrica e quindi riavvio automatico in caso di mancanza di corrente e ritorno;

- logon automatico ed avvio automatico (e quindi senza la necessità dell'operatore) del software di acquisizione dati;
- implementazione degli "indici di instabilità" che consentono l'individuazione degli stati incipienti di instabilità;
- la creazione di un file .log degli eventi significativi che consente una veloce rilettura dei file;
- auto-range dei canali acquisiti per evitare possibili problemi di saturazione della scheda DAQ ottimizzando la risoluzione bit/Volt;
- implementazione e gestione del guadagno automatico del sensore ottico APD;
- implementazione e gestione dell'attenuazione del segnale tramite il controllo di una ruota porta-filtri sulla quale sono montati filtri ottici grigi variabili (**Fig. 20**, riquadro di colore rosso);
- implementazione e gestione del cambio file con durate prestabilite.

Gli ultimi quattro punti sono opportunamente gestiti attraverso un file di configurazione precedentemente preparato.

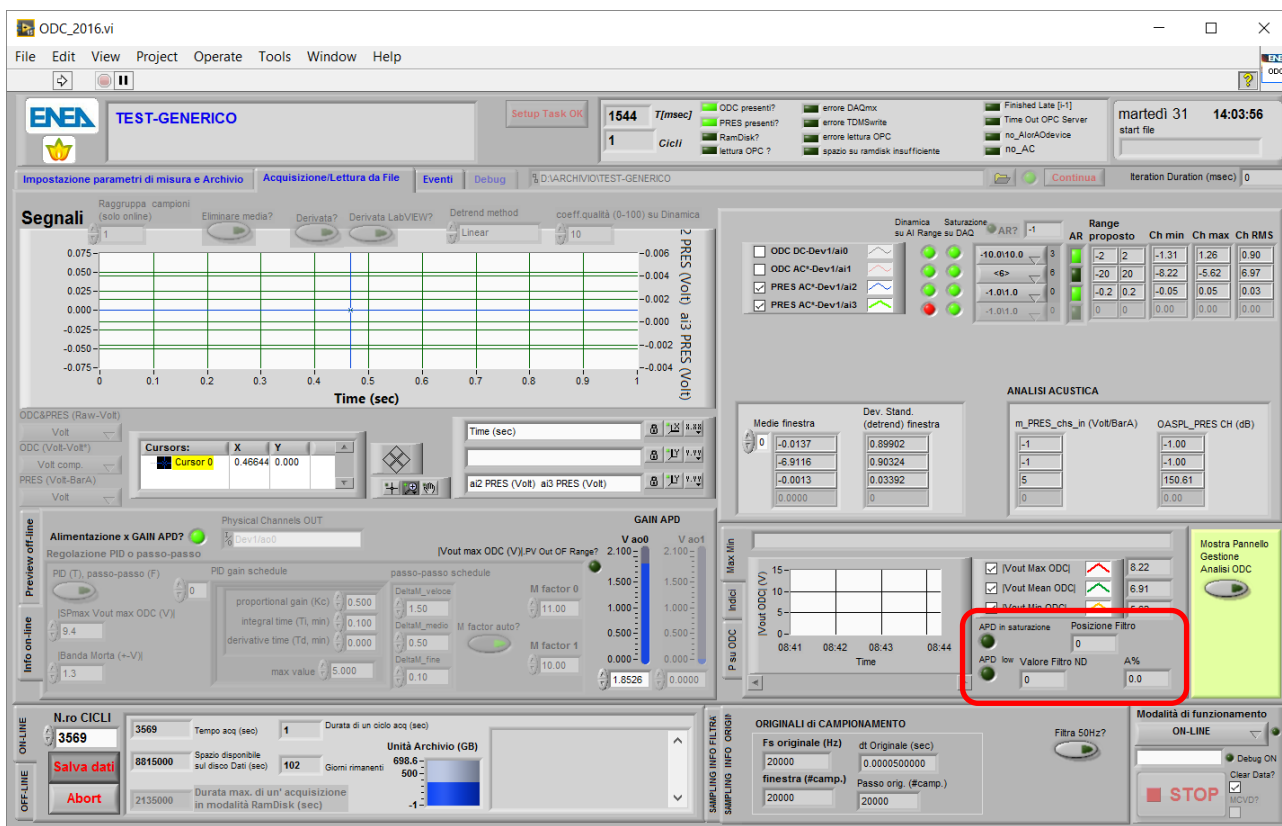


Fig. 20: Immagine del front-panel principale del software di acquisizione e controllo sviluppato in LabVIEW. In colore rosso si è evidenziata la parte di gestione del valore di posizionamento della ruota porta-filtri.

Il segnale ottico così campionato e rielaborato tramite tecniche di analisi del segnale sviluppate dall'ENEA permette:

- 1) di **conoscere le frequenze di eccitazione** della fiamma e quindi le frequenze che all'interno della camera di combustione potrebbero causare il fenomeno di *humming*.
- 2) di **individuare indici adimensionali** che permettano la predizione di tali fenomeni e possano essere usati come segnale per attuatori (normalmente per il cambiamento della portata del combustibile) e quindi metodi di smorzamento dei fenomeni stessi.
- 3) di studiare un metodo **per incrementare la stabilità e la flessibilità dei bruciatori tradizionali** per TurboGas.

3 Conclusioni e sviluppi futuri

Durante l'attività di ricerca è stata apportata una importante modifica alla catena di misura della tecnica di misura denominata ODC sviluppata dall'ENEA e basata sull'analisi della radiazione emessa dalla fiamma per lo studio delle eventuali instabilità fluidodinamiche e termiche all'interno di un combustore. In particolare è stato ideato, progettato, realizzato e testato l'inserimento di una ruota porta-filtri che consente di aumentare l'affidabilità di tale tecnica in ambito industriale.

Per definire un criterio di instabilità più generale, l'ENEA cercherà nella prossima annualità di ricerca di correlare le fluttuazioni del rilascio di calore con quelle di temperatura (associabili alla parte infrarossa del segnale di energia radiante) tramite l'utilizzo contemporaneo di un sensore ottico nel campo dell'UV-VIS-NIR (200-1000 nm) ed uno specifico per IR (900-2570 nm) che ha acquistato durante questa prima fase. Per mezzo di una fibra ottica collegata da una parte ai due sensori UV e IR e dall'altra alla stessa sonda ottica ODC si potrà campionare il segnale proveniente dalla fiamma interna alla camera di combustione, e quindi le sue dinamiche di combustione.

Al tempo stesso ENEA progetterà un filtro passa-banda operante nel range 250-1000 nanometri e con banda passante nel range 250-550 nanometri per focalizzare meglio l'attenzione del sensore UV sulla dinamica dei principali radicali (OH, CH).

Si cercherà infine di esercire l'impianto COMET-HP ad una pressione maggiore di quella atmosferica in condizioni di instabilità termo-acustica, monitorando lo stato termo-acustico sia con l'ODC che con i trasduttori di pressione. Se non si riuscisse, a causa di limiti impiantistici, a svolgere quest'ultimo punto si cercherà di applicare la tecnica ottica in impianti industriali esterni all'ENEA.

4 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. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Bruschi R., Grottadaurea M., Giulietti E., Giacomazzi E., "Optical Anemometry", 29th Italian Section Combustion Meeting, paper number 033, Pisa (Italy), 14-17 June 2006.

9. R. Bruschi, M. Grottadaurea, "Metodo e relativo dispositivo per la misura della velocità assiale dei gas combusti in sistemi turbogas", ENEA, ENE-SIST-IMP EDE05051.
10. T.C. Lieuwen and V. Yang, "Combustion Instabilities in Gas Turbines Engines", Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA Series, Volume 210, p. 288.
11. SACME S.p.a., "Impianto COMET HP - Specifica funzionale di impianto", sigla documento 9029-ST01.1, pag. 19, 14/07/2003.
12. SACME S.p.a., "Impianto COMET - Specifica di esercizio", sigla documento IT9029.00.00, pag. 5, 05/06/2008.

5 Abbreviazioni ed acronimi

APD	Avalanche PhotoDiode
CCS	Carbon Capture Storage
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage
CSD	Cross-Spectral density
DNS	Direct Numerical Simulation
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ENEA	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LBO	Lean Blow Out
LDA	Laser Doppler Anemometry
LES	Large Eddy Simulation
LNG	Liquefied Natural Gas
ND	Neutral Density
NG	Natural Gas
ODC	Optical Diagnostics of Combustion
PSD	Power Spectral Density
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
Syngas	Synthetic Gas, ossia gas di sintesi
TG	Turbine a Gas
VI	Virtual Instrument