



Ricerca di Sistema elettrico

# Instabilità e fuel-flexibility in miscele con H<sub>2</sub>: studio sperimentale applicato all'impianto ROMULUS

C. Stringola, E. Giulietti, S. Scaglione, D. Zola, G. Troiani, A. Gentili

## **Instabilità e fuel-flexibility in miscele con H2: studio sperimentale applicato all’impianto ROMULUS**

C. Stringola, E. Giulietti, S. Scaglione, D. Zola, G. Troiani, A. Gentili

Dicembre 2020

### **Report Ricerca di Sistema Elettrico**

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Progetto: Tema 1.2 – Sistemi di accumulo, compresi power to gas, e relative interfacce con le reti

Work package: “Power to Gas” (P2G)

Linea di attività: LA3.25: Integrazione P2G/sistemi generazione elettrica innovativi: fuel-flexibility – realizzazione e test sezione H2-AGATUR e sperimentazione ROMULUS

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Work package: Eugenio Giacomazzi, ENEA

## Indice

SOMMARIO .....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA O.D.C. ....	6
1.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO .....	6
1.2 COMPONENTI DEL SISTEMA .....	7
2 IL BRUCIATORE ROMULUS .....	8
2.1 SET-UP SPERIMENTALE .....	11
2.2 TEST-MATRIX.....	14
3 ANALISI DELLE CONDIZIONI DI INSTABILITÀ TRAMITE TECNICA O.D.C. ....	16
3.1 ANALISI PRELIMINARI .....	17
3.1.1 <i>Analisi preliminare del rumore emesso dalla cappa di aspirazione: <math>OO_{RUM}</math></i> .....	17
3.1.2 <i>Analisi preliminare del rumore emesso dalla fiamma pilota: <math>S_{pil}</math></i> .....	18
3.2 RISULTATI DELLE PROVE NELLE CONDIZIONI STABILI DELLA FIAMMA .....	19
3.2.1 <i>Miscela combustibile 100% CH<sub>4</sub> e 0% H<sub>2</sub>: <b>S0</b></i> .....	19
3.2.2 <i>Miscela combustibile 80% CH<sub>4</sub> e 20% H<sub>2</sub>: <b>S20</b></i> .....	20
3.2.3 <i>Miscela combustibile 60% CH<sub>4</sub> e 40% H<sub>2</sub>: <b>S40</b></i> .....	21
3.2.4 <i>Miscela combustibile 50% CH<sub>4</sub> e 50% H<sub>2</sub>: <b>S50</b></i> .....	22
3.3 RISULTATI DELLE PROVE NELLE CONDIZIONI INSTABILI DELLA FIAMMA.....	23
3.3.1 <i>Miscela combustibile 100% CH<sub>4</sub> e 0% H<sub>2</sub>: <b>I0</b></i> .....	23
3.3.2 <i>Miscela combustibile 80% CH<sub>4</sub> e 20% H<sub>2</sub>: <b>I20</b></i> .....	24
3.3.3 <i>Miscela combustibile 60% CH<sub>4</sub> e 40% H<sub>2</sub>: <b>I40</b></i> .....	25
3.3.4 <i>Miscela combustibile 50% CH<sub>4</sub> e 50% H<sub>2</sub>: <b>I50</b></i> .....	26
3.3.5 <i>Miscela combustibile 40% CH<sub>4</sub> e 60% H<sub>2</sub>: <b>I60</b></i> .....	27
3.4 TABELLE RIASSUNTIVE DELLE FREQUENZE RILEVATE .....	28
4 CONCLUSIONI.....	30
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	31
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....	33

## Sommario

Un'importante tematica delle attuali ricerche sull'efficienza degli impianti di produzione elettrica è la *flessibilità nell'uso di combustibili* non tradizionali (*fuel flexibility*), ed in particolare di miscele idrogenate, come ad esempio *syngas*<sup>1</sup> ricchi di H<sub>2</sub>. Durante questa seconda annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR\_19\_21) della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, in ENEA si è svolta una campagna sperimentale e teorica che riguarda lo studio della *fuel-flexibility*.

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, Power-to-Gas, 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.

Durante il precedente triennio del Piano Annuale di Realizzazione (PAR) presso il laboratorio IPSE di ENEA Casaccia è stato realizzato il bruciatore ROMULUS, che ha una scala da laboratorio (da 1 a 10 kW di potenza termica). È possibile alimentare tale bruciatore con una miscela di CH<sub>4</sub> (metano) e aria arricchita di H<sub>2</sub> (idrogeno) in percentuali variabili, con lo scopo di analizzare la variazione delle caratteristiche di combustione in vista dell'utilizzo di combustibili prodotti nell'ambito delle tecnologie Power-to-Gas.

Durante questa annualità sono state condotte varie attività sperimentali sul bruciatore ROMULUS il cui scopo è stato l'analisi delle possibili instabilità di combustione derivanti dalla variabilità di composizione del combustibile. L'indagine sperimentale ha utilizzato prima separatamente e poi contemporaneamente sistemi di diagnostica e di monitoraggio quali:

1. i microfoni;
2. l'O.D.C. (Optical Diagnostics of Combustion), tecnica ottica brevettata ENEA;
3. il D.O.E.S. (Detection of Oxygen by Emission Spectroscopy), tecnica alla quale è stato cambiato nome in G.A.M.E.S. (GAs Monitoring by Emission Spectroscopy) a motivo della sua più ampia analisi spettrale e quindi di specie chimiche rispetto alle quali era stato inizialmente ideato e realizzato. Il sistema DOES-GAMES è stato utilizzato per la misura di specie chimiche nei gas di scarico.

Attraverso la sperimentazione sul bruciatore ROMULUS, con miscele idrogenate per la caratterizzazione di fenomeni di instabilità termo-acustica, sono stati analizzati i regimi di instabilità e l'insorgenza delle instabilità termoacustiche.

---

<sup>1</sup> Con il termine *syngas* (termine che nasce dall'unione delle due parole *synthetic gas*, ossia *gas di sintesi*) si indica una miscela di gas, essenzialmente monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H<sub>2</sub>), con la presenza in quantità variabile anche di metano (CH<sub>4</sub>) e anidride carbonica (CO<sub>2</sub>).

Il *syngas* può essere prodotto in vari modi, ad esempio reforming del metano, gassificazione del carbone, oppure fermentazione anaerobica, da biomassa o da rifiuti solidi urbani.

## 1 Introduzione

Il Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR\_19\_21), della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale prevede tre diversi Work Package di progetto. In particolare, il Work Package che riguarda le attività di ricerca presenti in questo documento è il WP3, intitolato “Power to Gas” (P2G), perché le sue attività coprono le tecnologie della catena P2G e P2L (“Power to Liquid”), compresa la generazione elettrica flessibile da TurboGas (TG) come soluzione integrata per aumentare la sicurezza del sistema elettrico, per favorire la sua progressiva decarbonizzazione e la penetrazione delle energie rinnovabili.

L’obiettivo finale del WP3 è quindi quello di supportare l’infrastruttura di rete elettrica e garantire la diffusione delle energie rinnovabili, attraverso tre sotto-obiettivi:

1. sviluppare i sistemi di accumulo P2G finalizzati allo storage dell’eccesso di produzione da vRES, ossia dalle fonti di energia rinnovabile non programmabili;
2. sviluppare sistemi innovativi per la produzione di H<sub>2</sub> e la sua conversione a CH<sub>4</sub>;
3. studiare la fuel flexibility di impianti TurboGas.

L’aggiunta di idrogeno al gas naturale, (ad esempio il metano), altera in modo non trascurabile, non solo le proprietà di combustione della miscela ottenuta, (velocità di fiamma, ritardo di accensione, limiti di infiammabilità, caratteristiche termo-diffusive, temperature massime raggiunte e NO<sub>x</sub> prodotti), ma anche la topologia del fronte di fiamma, la sua stabilizzazione e dinamica. In particolare, si prevede che l’uso di miscele idrogenate nelle moderne Turbine a Gas aumenti il rischio di fenomeni di instabilità termo-acustica, dannosi per l’operatività della Turbina stessa.

L’attività svolta e descritta in questo documento tecnico riguarda la **Linea di Attività (LA) n.25** intitolata “Integrazione P2G/sistemi generazione elettrica innovativi: fuel-flexibility – realizzazione e test sezione H2-AGATUR e sperimentazione ROMULUS”.

Il bruciatore ROMULUS, alimentato con CH<sub>4</sub> puro e sotto opportune condizioni di funzionamento, è in grado di operare in regime di instabilità termoacustica. In tale regime, l’accoppiamento di fluttuazioni di pressione e rilascio di calore genera una concentrazione dell’emissione sonora attorno ad una o più frequenze particolari. In questa modalità il funzionamento del bruciatore diventa critico: le frequenze di oscillazione possono accoppiarsi con quelle proprie del combustore ed eventualmente andare in risonanza, con evidenti danni al dispositivo/impianto. Inoltre, un eventuale accoppiamento delle fluttuazioni di pressione con quelle del rilascio di calore, possono portare il fronte di fiamma ad essere estremamente “stressato” ed eventualmente presentare fenomeni di spegnimento localizzati, fino ad arrivare all’estinzione globale della fiamma. Questi regimi di combustione, oltre ad essere dannosi dal punto di vista strutturale, comportano una combustione non omogenea con aumenti delle concentrazioni di incombusti rilasciati nell’atmosfera.

L’influenza dell’H<sub>2</sub> (idrogeno) su tali comportamenti e la ricerca di precursori dell’instabilità che consentano di predire con sufficiente anticipo l’insorgenza di tale instabilità attraverso la definizione di alcuni indicatori facilmente misurabili, sono attualmente oggetto di studio nella comunità scientifica della combustione ed oggetto della presente attività.

Dato il potenziale aumento del rischio di instabilità di combustione, è importante monitorare in tempo reale ciò che avviene all’interno delle camere di combustione, e identificare, con un certo anticipo, i precursori delle instabilità, in modo da adottare opportune procedure di controllo. In passato l’ENEA ha depositato diversi brevetti sulla tecnica **O.D.C. (Optical Diagnostics of Combustion)** ([1], [2], [3]) che si basa sull’analisi del segnale della chemiluminescenza prodotta dal fronte di fiamma, ossia sull’analisi del segnale delle emissioni ottiche delle fiamme, ed è rivolta allo studio e all’identificazione dei fenomeni precursori di instabilità termoacustica basandosi su segnali ottici nel campo del visibile UV/NIR. Tale tecnica ottica, che è stata inizialmente sperimentata e giustificata dal punto di vista teorico del proprio funzionamento nel campo del visibile (VIS) ([4], [5], [6]) dell’emissione ottica prodotta dal fronte di fiamma, durante le attività di ricerca dei Piani Annuali di Realizzazione PAR2015 e PAR2016 ([7] e [8]) è stata migliorata sia dal punto di vista teorico che sperimentale andando a considerare i campi UV e NIR dell’emissione radiante prodotta dalle fiamme ([9], [10], [11]).

Oltre al monitoraggio in tempo reale della stabilità delle fiamme, è importante anche monitorare i gas combustibili in modo che si possa seguire online il processo di combustione e di conseguenza l'efficienza della combustione stessa. Durante il precedente triennio di ricerca, l'ENEA ha sviluppato un sistema avanzato di monitoraggio delle specie chimiche nei gas combustibili di scarico denominato **D.O.E.S.** (*Detection of Oxygen by Emission Spectroscopy*) [12-19]. Il significato dell'acronimo indica che, in origine, lo sviluppo dello strumento riguardava il monitoraggio dell'ossigeno in impianti di ossi-combustione senza fronte di fiamma. Lo sviluppo del sistema ha portato a un'estensione delle sue possibilità, consentendo il monitoraggio, almeno in teoria, di altre specie presenti nei gas di post combustione. Per tale motivo il sistema ha assunto il nome di **GA.M.E.S.** (*GAs Monitoring by Emission Spectroscopy*).

Il sistema GA.M.E.S. utilizza la spettroscopia ottica di emissione nell'intervallo spettrale che va dall'ultravioletto (UV) al vicino infrarosso (NIR). La spettroscopia ottica in emissione permette di individuare gli elementi atomici e molecolari presenti in una miscela di gas mediante l'innesco di un plasma confinato in una regione spaziale e acquisendo lo spettro emesso.

## 1 Descrizione del sistema O.D.C.

### 1.1 Principio di funzionamento

Il sistema ottico O.D.C. (*Optical Diagnostics of Combustion*) è uno strumento volto al monitoraggio in tempo reale della combustione in bruciatori convenzionali e per Turbine a Gas, tramite software di gestione (sviluppato interamente in casa) in ambiente LabVIEW della National Instruments. Tale tecnica ottica permette di individuare un *indice di stabilità* più generale di quello classico di Rayleigh e quello di Chu per una migliore identificazione in tempo reale di fenomeni precursori di instabilità ([8], [9], [10], [11]).

La metodologia diagnostica ODC (*Optical Diagnostics of Combustion*) 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).

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* 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.

## 1.2 Componenti del sistema

Il processo viene osservato attraverso le emissioni ottiche prodotte dalle fenomenologie implicate. La trasduzione da segnale ottico a segnale elettrico integrato viene effettuata da due sensori ottici, ognuno dei quali ha una propria linea:

- a) la linea **UV-VIS** (UltraViolet-Visible) operante nel range **150-550 nm**, tramite un sensore di tipo GaP (*Gallium Phosphide*) della THORLABS;
- b) la linea **NIR** (Near InfraRed) operante prevalentemente nel range **900-2.570 nm**, tramite un sensore **Amplified InGaAs** (*Indium Gallium Arsenide*) della THORLABS.

a) **Sensore ottico di tipo GaP (*Gallium Phosphide*) PDA25K2 della THORLABS operante nel range UV-VIS**

1. **Caratteristiche del sensore ottico GaP:**

- spectral response range ( $\lambda$ ) = 150 to 550 nm (peak wavelength = 440 nm)
- active area = 2.2 mm x 2.2 mm (4.8 mm<sup>2</sup>)

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 (no free, but according gain adjustment)  
= 9500, 1300, 1000, 260, 80, 28, 8.5, 2.6 kHz
- maximum output = +10 V



Figura 1. Immagine del sensore ottico PDA25K2 della THORLABS per il range UV-VIS.

Questo sensore ottico è utilizzato per captare la *chemiluminescenza* dei radicali OH\* (~306 nm), CH\* (~431 nm), C<sub>2</sub>\* (~516 nm) e H<sub>2</sub>CO\* (~340 nm), che assumono maggiore importanza e intensità nel campo di lunghezze d'onda compreso tra ~300 nm e ~500 nm, e quindi le dinamiche della fiamma relative alle fluttuazioni del *rilascio di calore*.

b) **Sensore ottico di tipo InGaAs (*Indium Gallium Arsenide*) PDA10DT-EC della THORLABS operante nel range NIR**

1. **Caratteristiche del sensore ottico Amplified InGaAs Detector:**

- spectral response range ( $\lambda$ ) = 900 to 2.570 nm
- diameter of effective active area ( $\phi$ ) = 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 (free, but according gain adjustment)  
= 0.5, 1, 5, 10, 20, 100, 500, 1000 kHz
- maximum output = +10 V



**Figura 2.** Immagine del sensore ottico PDA10DT-EC della THORLABS per il range NIR.

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

Un *indice di instabilità sperimentale* può essere il risultato dei segnali ottici provenienti dalle due diverse linee UV-VIS e NIR, e quindi dai due diversi sensori ottici.

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).

## 2 Il bruciatore ROMULUS

Il bruciatore ROMULUS è un bruciatore del tipo *slot burner* (oppure *slotted burner*) di piccola scala (circa 10 kW di potenza termica) a pressione ambientale la cui fiamma premiscelata principale è realizzata tramite una miscela di metano ( $\text{CH}_4$ ), idrogeno ( $\text{H}_2$ ) e aria, mentre la fiamma pilota, che tende a stabilizzare la fiamma, è una miscela di propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) e aria.

Tale bruciatore è stato oggetto sia di ricerca sperimentale ([20], [21], [8] pp. 21-33, [22]) che numerica ([23] e [24]) nei precedenti Piani Triennali di Realizzazione (PAR), sia utilizzando una camera di combustione piccola [21] che di maggiori dimensioni [22].

Per raggiungere regimi di funzionamento del bruciatore che fossero il più possibile estesi in termini di numero di Reynolds ( $\text{Re}$ ) è stata realizzata una fiamma pilota diffusiva al propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) mediante il passaggio della miscela attraverso un setto ad elevata porosità (muffler, di dimensioni 10 x 10 x 40 mm), e successivamente attraverso un convergente ed un'altra piastra forata posta in uscita ([20], p. 12;

**Figura 3).**

In

**Figura 3** è visibile la sezione di uscita della miscela reagente di forma rettangolare compresa tra le due fiamme pilota. Le fiamme pilota sono realizzate con matrici di fori (diametro pari a 1.3 mm) che creano una superficie uniforme a temperatura elevata, maggiore di quella di ignizione del combustibile.

Le due fiamme pilota (visibili ad esempio in **Figura 4**), poste ai lati della fiamma principale, rendono possibile stabilizzare una fiamma turbolenta fino a un numero di Reynolds dell'ordine di 10.000 cui corrispondono velocità medie di efflusso di 40-50 m/s. Hanno inoltre il compito di creare un ambiente ricco di  $\text{CO}_2$ , simile a quello presente nei sistemi EGR.

Il getto della miscela di combustibile  $\text{CH}_4+\text{H}_2$  e di aria fluisce ad un numero di Reynolds dell'ordine di 10.000 a cui corrisponde una velocità media di circa 15-18 m/s attraverso un canale rettangolare posto al centro della parte inferiore della camera di combustione. Il canale di immissione del combustibile ha sezione rettangolare di dimensioni di 0.003 m x 0.01 m (ossia la sezione del bruciatore è  $3 \times 10 \text{ mm}^2$ ), ed è circondato da due piastre forate attraverso le quali vengono iniettati i gas caldi costituiti dai prodotti di combustione di una fiamma laminare stechiometrica di  $\text{C}_3\text{H}_8$  (propano).

La geometria della sezione della camera di combustione è stata costruita in quarzo per permettere un accesso ottico alla fiamma consentendo di effettuare:

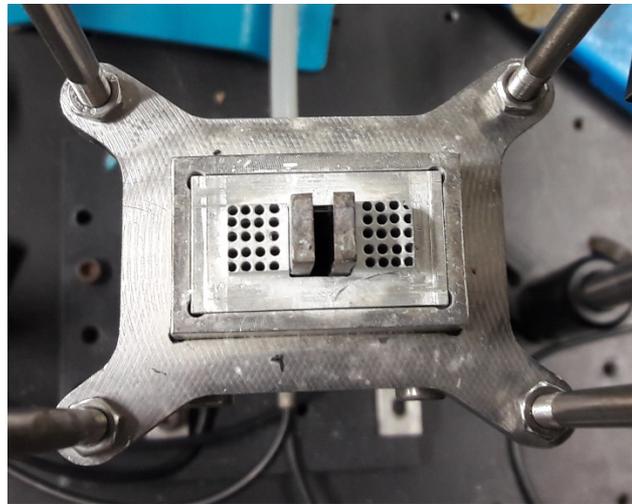
- misure di instabilità tramite la tecnica O.D.C.;
- misure di velocità tramite la PIV (Particle Image Velocimetry);
- misure di concentrazione di specie radicaliche (in particolare OH e CH) tramite la LIF (Laser Induced Fluorescence);
- misura della temperatura tramite la CARS (Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy) essendo le pareti trasparenti alle radiazioni ultraviolette.

La camera di combustione in quarzo ha la forma di un parallelepipedo ed è stata realizzata in due diverse dimensioni:

- piccole dimensioni (0.01 m x 0.027 m x 0.1 m; **Figura 5a**);
- grandi dimensioni (0.03 m x 0.06 m x 0.25 m; **Figura 5b**) costruita per evitare che le particelle di innescante (allumina), necessarie alla tecnica PIV per la misura della velocità, si depositino sulle pareti.

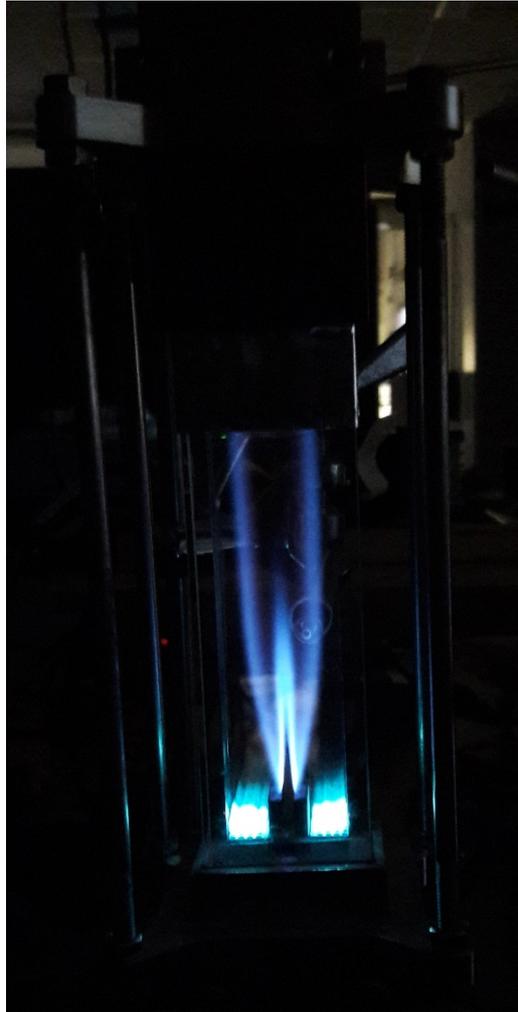


(a)



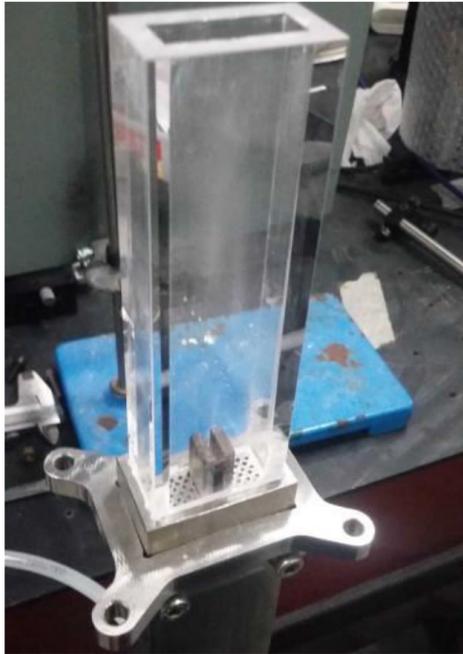
(b)

**Figura 3.** Immagini della sezione di uscita del bruciatore ROMULUS vista di lato (a) e vista dall'alto (b).

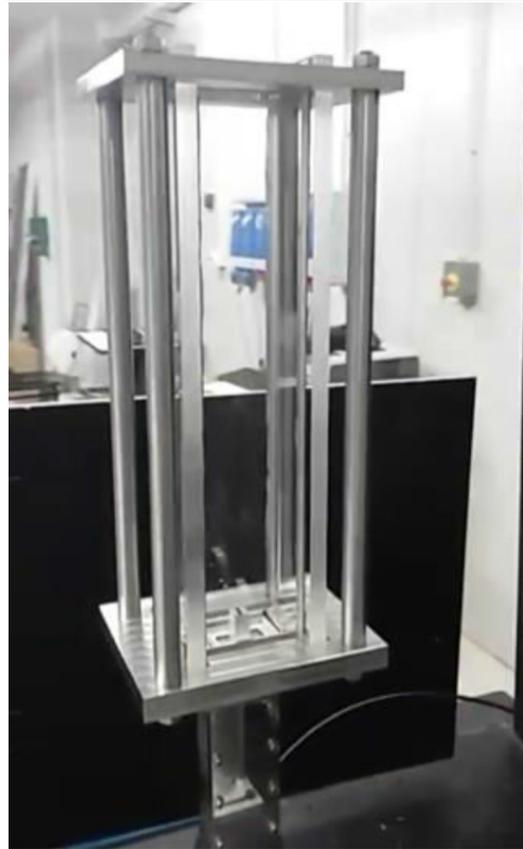


**Figura 4.** Immagine di una fiamma premiscelata per una miscela di 50% CH<sub>4</sub> e 50% H<sub>2</sub> in condizione stabile ( $Re_{princ} = 2.854$  e  $\Phi_{princ} = 1$ ) nel bruciatore ROMULUS.

Da misure precedentemente effettuate tramite la tecnica ottica CARS [21], è noto che le temperature all'interno del flusso reagente vanno da un minimo di 300 K, che rappresentano una zona di minima concentrazione di OH e quindi presenza di reagenti freschi e ancora incombusti, fino a valori pari a 2.158 K nella zona dei prodotti di combustione e di fiamma.



(a)



(b)

**Figura 5.** Immagini della camera di combustione con pareti in quarzo e di dimensioni ridotte (a) e di dimensioni maggiori (b).

## 2.1 Set-up sperimentale

Lo studio oggetto di questa sperimentazione ha consistito nel caratterizzare la fiamma, nello studio della fuel flexibility, nel monitoraggio in tempo reale della stabilità delle fiamme ottenute bruciando miscele di gas naturale con l'aggiunta variabile di idrogeno, e nel monitoraggio dei gas combusti in modo che da poter seguire online il processo di combustione e di conseguenza l'efficienza della combustione stessa. Si è provveduto a posizionare (**Figura 6 e Figura 7**):

- una *fibra ottica biforcuta* operante nel range di lunghezze d'onda 200-2.100 nm e capace di trasmettere i segnali di energia radiante a due *sistemi ODC*. Il segnale ottico proveniente dalla fibra ottica biforcuta viene infatti suddiviso in due linee:
  1. la **linea UV-VIS** va a finire in un primo sensore ottico (**ODC1**) che campiona il segnale nel range UV-VIS 150-550 nm (si è impostato un Gain=70 dB e un BW = 2.600 Hz);
  2. la **linea NIR** va a finire in un secondo sensore ottico (**ODC2**) che campiona il segnale nel range NIR 900-2.570 nm (si è impostato un Gain=60 dB e un BW = 10.000 Hz).
- un *microfono (PRES)* che è posizionato vicino all'uscita dei gas. È un microfono della Microtech Gefell GMBH da 1/4" type M360, opera in un range tra 20 Hz e 20 kHz (nel campo di Sound Pressure Level tra 35-130 dB), ha un coefficiente di calibrazione (sensività) di 1270 Volt/bar, e può lavorare in un ambiente che ha un range di temperatura tra -10°C e + 50°C.
- un manicotto necessario allo spillamento dei gas di scarico (fumi) all'uscita del bruciatore per la tecnica **D.O.E.S.-GA.M.E.S.**

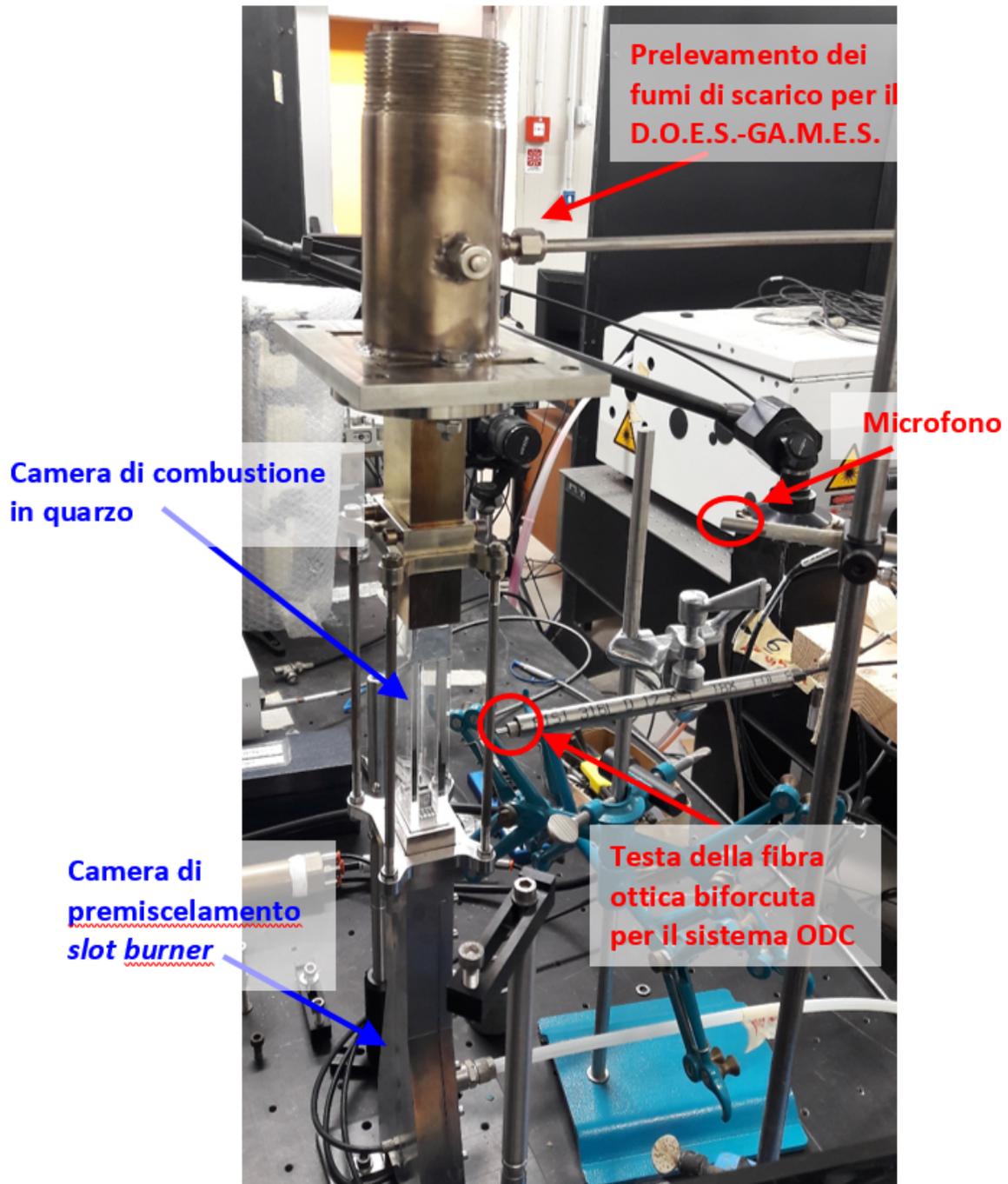


Figura 6: Immagine del set-up sperimentale utilizzato durante le diverse prove effettuate.

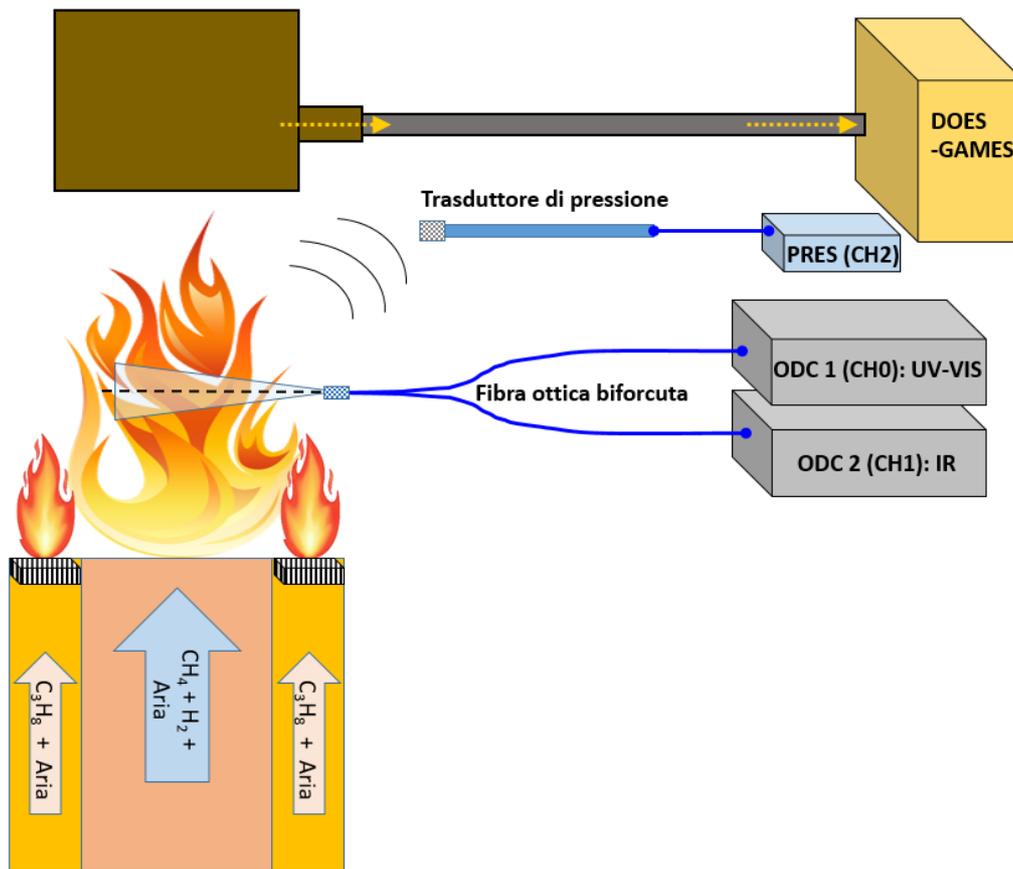


Figura 7: Schema del set-up utilizzato durante le prove effettuate.

L'uscita del microfono 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  $p_0=20 \mu\text{Pa}^2$ . 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:

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

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

## 2.2 Test-matrix

Nelle seguenti tabelle si riportano le test-matrix delle condizioni preliminari per identificare i rumori di background (**Tabella 1**), le diverse condizioni stabili (**Tabella 2**) e quelle instabili (**Tabella 3**) a parità del numero di Reynolds  $Re_{princ} = 2.850$  e del rapporto di equivalenza  $\Phi_{princ}=1$  della fiamma principale per le quali si è condotta una campagna sperimentale utilizzando contemporaneamente la tecnica O.D.C., la tecnica D.O.E.S.-GA.M.E.S. e un microfono (**Figura 6** e **Figura 7**).

**Tabella 1.** Test-matrix delle **condizioni preliminari** effettuate per analizzare il rumore di background.

CONDIZIONE	Fiamma <b>PILOTA</b> a <b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b> (propano)		Fiamma <b>PRINCIPALE</b> a <b>CH<sub>4</sub></b> (metano)		Fiamma <b>PRINCIPALE</b> aggiunta di <b>H<sub>2</sub></b>
	Q <sub>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></sub> (g/s)	Q <sub>Aria_pilota</sub> (g/s)	Q <sub>CH<sub>4</sub></sub> (g/s)	Q <sub>Aria_princ</sub> (g/s)	Q <sub>H<sub>2</sub></sub> (g/s) %H <sub>2</sub> , %CH <sub>4</sub>
<b>00_RUM</b>	0	0	0	0	0
<b>S<sub>PIL</sub></b>	0.0085	0.13	0	0	0

**Tabella 2.** Test-matrix delle **condizioni STABILI** effettuate al variare della % volumetrica dell'idrogeno (H<sub>2</sub>), e quindi della portata di metano (Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>) della fiamma principale, nelle condizioni di  $Re_{princ}=2.850$  e  $\Phi_{princ}=1$ .

CONDIZIONE	Fiamma <b>PILOTA</b> a <b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b> (propano)		Fiamma <b>PRINCIPALE</b> a <b>CH<sub>4</sub></b> (metano)		Fiamma <b>PRINCIPALE</b> aggiunta di <b>H<sub>2</sub></b>
	Q <sub>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></sub> (g/s)	Q <sub>Aria_pilota</sub> (g/s)	Q <sub>CH<sub>4</sub></sub> (g/s)	Q <sub>Aria_princ</sub> (g/s)	Q <sub>H<sub>2</sub></sub> (g/s) %H <sub>2</sub> , %CH <sub>4</sub>
<b>S<sub>0</sub></b>	<b>0.011</b>	0.15	<b>0.018</b>	0.32	0 <b>0% H<sub>2</sub>,</b> 100% CH <sub>4</sub>
<b>S<sub>20</sub></b>	<b>0.011</b>	0.15	<b>0.017</b>	0.32	0.00055 <b>20% H<sub>2</sub>,</b> 80% CH <sub>4</sub>
<b>S<sub>40</sub></b>	<b>0.011</b>	0.15	<b>0.016</b>	0.32	0.0013 <b>40% H<sub>2</sub>,</b> 60% CH <sub>4</sub>
<b>S<sub>50</sub></b>	<b>0.011</b>	0.15	<b>0.015</b>	0.32	0.0019 <b>50% H<sub>2</sub>,</b> 50% CH <sub>4</sub>
<b>S<sub>60</sub></b>	<b>0.011</b>	0.15	<b>0.014</b>	0.32	0.0025 <b>60% H<sub>2</sub>,</b> 40% CH <sub>4</sub>

**Tabella 3.** Test-matrix delle **condizioni INSTABILI** effettuate al variare della % volumetrica dell'idrogeno ( $H_2$ ), e quindi della portata di metano ( $Q_{CH_4}$ ) della fiamma principale, nelle condizioni di  $Re_{princ}=2850$  e  $\Phi_{princ}=1$ .

CONDIZIONE	Fiamma <b>PILOTA</b> a <b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b> (propano)		Fiamma <b>PRINCIPALE</b> a <b>CH<sub>4</sub></b> (metano)		Fiamma <b>PRINCIPALE</b> aggiunta di <b>H<sub>2</sub></b>
	$Q_{C_3H_8}$ (g/s)	$Q_{Aria\_pilota}$ (g/s)	$Q_{CH_4}$ (g/s)	$Q_{Aria\_princ}$ (g/s)	$Q_{H_2}$ (g/s) %H <sub>2</sub> , %CH <sub>4</sub>
<b>I0</b>	<b>0.015</b>	0.23	<b>0.018</b>	0.32	0 <b>0% H<sub>2</sub>,</b> 100% CH <sub>4</sub>
<b>I20</b>	<b>0.015</b>	0.23	<b>0.017</b>	0.32	0.00055 <b>20% H<sub>2</sub>,</b> 80% CH <sub>4</sub>
<b>I40</b>	<b>0.015</b>	0.23	<b>0.016</b>	0.32	0.0013 <b>40% H<sub>2</sub>,</b> 60% CH <sub>4</sub>
<b>I50</b>	<b>0.015</b>	0.23	<b>0.015</b>	0.32	0.0019 <b>50% H<sub>2</sub>,</b> 50% CH <sub>4</sub>
<b>I60</b>	<b>0.015</b>	0.23	<b>0.014</b>	0.32	0.0025 <b>60% H<sub>2</sub>,</b> 40% CH <sub>4</sub>

### 3 Analisi delle condizioni di instabilità tramite tecnica O.D.C.

Per quanto riguarda la configurazione della camera di maggiori dimensioni (**Figura 5b**), l'analisi con microfoni effettuata in una precedente campagna sperimentale ha rilevato l'assenza di tonali specifiche e quindi di regime di "combustion instability" [21]. Le motivazioni risiedono nel fatto che il combustore di maggiori dimensioni (**Figura 5b**) è stato progettato per non avere, a freddo (senza la presenza di fiamma), tonali specifiche che avrebbero potuto influire sull'efficienza della linea di alimentazione e determinare così una portata in massa fluttuante.

La situazione cambia radicalmente qualora si inserisce la camera in quarzo di minori dimensioni (**Figura 5a**). Si vengono a creare in questo modo due volumi molto piccoli in corrispondenza delle due fiamme pilota che, per alcune portate specifiche di miscela reagente ( $\text{CH}_4$ +aria per la fiamma principale;  $\text{C}_3\text{H}_8$ +aria per le fiamme pilota), presentano un picco nell'emissività acustica centrato intorno ai 2 KHz [21].

Anche in un altro lavoro precedente svolto [22] si è fatto osservare come le forzanti termoacustiche abbiano origine proprio dalle fiamme pilota che sono poste ai lati del bruciatore principale e il cui compito è, da un lato ancorare la fiamma all'uscita del getto e dall'altro creare un ambiente nella camera di combustione ricco di anidride carbonica ed inerti ad alta temperatura, tipico dei sistemi EGR.

Le ampiezze di banda dei sensori utilizzati in questo setup sperimentale durante la campagna di misura sono i seguenti:

- il **microfono (PRES)** opera in un range tra 20 Hz e **20.000 Hz**;
- la **linea UV-VIS** (che opera nel range 150-550 nm) utilizza un sensore ottico (**ODC1**) che campiona il segnale avendo impostato il Gain massimo di 70 dB e un filtro BW = **2.600 Hz**;
- la **linea NIR** (che opera nel range 900-2.570 nm) utilizza un sensore ottico (**ODC2**) che campiona il segnale avendo impostato un Gain=60 dB e un filtro BW = **10.000 Hz**.

Per il sensore ottico UV-VIS (ODC1) è stato impostato il valore di Gain massimo (=70 dB) perché durante le prove preliminari si è riscontrato un segnale molto basso, anche se questa scelta ha ridotto la banda passante (BW) a 2.600 Hz a differenza di quella a 10.000 Hz del sensore ottico NIR (ODC2). Nonostante si sia impostato il valore di massimo guadagno, il segnale del sensore ottico ODC1 risulta comunque essere basso e quindi a volte poco significativo.

La *frequenza di campionamento* impostata durante questa campagna sperimentale è di  $f_s=40$  kHz, con un *raggruppamento* di campioni = 2, e quindi ogni finestra di acquisizione di 1 secondo ha un numero di campioni di 20 ks, e gli spettri acustici e ottici dell'analisi del segnale avranno un'ampiezza in frequenza di 10 kHz. La risoluzione in frequenza negli spettri ottici e acustici è di  $\pm 1$  Hz.

La prima cosa da notare, come è ovvio che sia, tutti gli spettri in condizioni stabili risultano avere ampiezze molto inferiori rispetto alle analoghe condizioni in regime instabile, infatti gli OASPL sono più bassi. Per questo motivo e per poter meglio apprezzare l'eventuale presenza di picchi, si è deciso di plottare gli spettri in condizioni stabili e instabili con scale diverse nel Modulo ( $X_{rms}^2/\text{Hz}$ ).

Specificiamo qui all'inizio di questo paragrafo che i valori delle frequenze che saranno scritte in "grassetto" ("**bold**") equivalgono ai valori con i picchi maggiori.

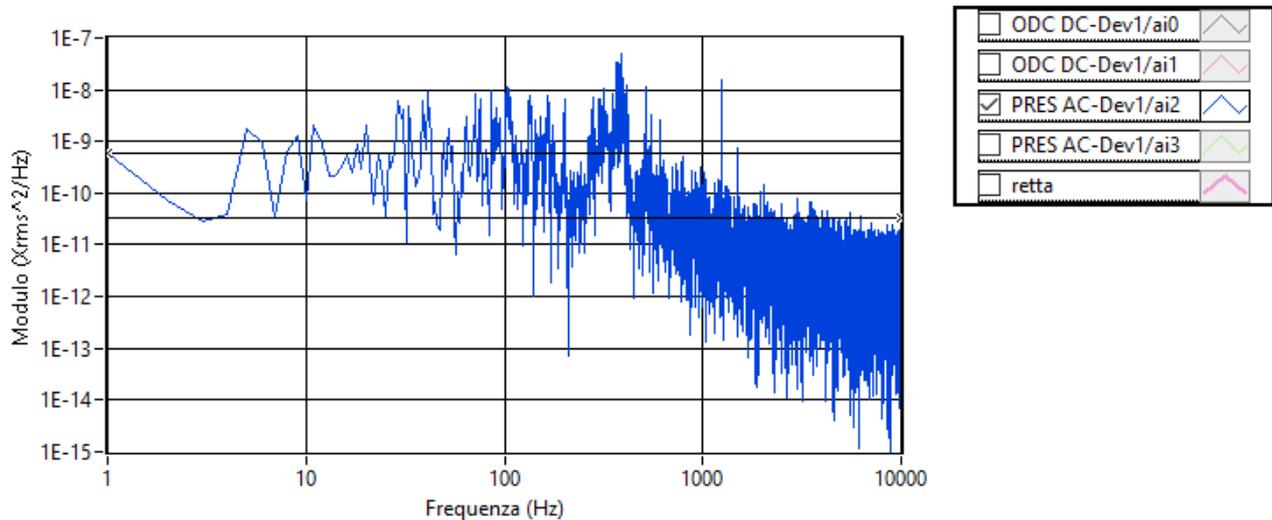
### 3.1 Analisi preliminari

#### 3.1.1 Analisi preliminare del rumore emesso dalla cappa di aspirazione: 00\_RUM

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 (OASPL) di circa 72 dB, e presenta dei picchi alle frequenze di 30, **103**, 135, 162, 300, **396**, 1.250 e 1.500 Hz (**Figura 8**).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, **Tabella 4**.

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)



**Figura 8:** PSD del segnale **PRES** del microfono per la condizione STABILE **00\_RUM** in **Tabella 1**.

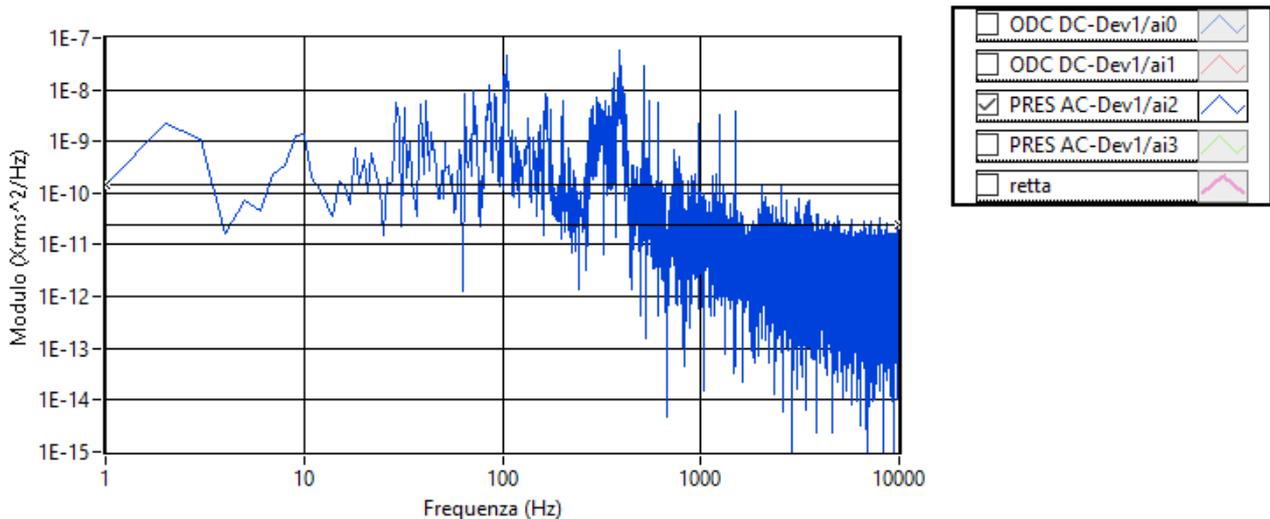
### 3.1.2 Analisi preliminare del rumore emesso dalla fiamma pilota: $S_{pil}$

Nella fase preliminare si è pensato di caratterizzare anche il rumore acustico emesso dalla sola fiamma pilota. Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione **PRES** sono  $f=30, 40, 65, 70, 86, 103, 135, 166, 201, 300, 386, 514, 547, 607, 971, 1.250, 1.500$  (**Figura 9**) ed emette un rumore (OASPL) di circa 72 dB.
- Il sensore **ODC1** operante nel range UV-VIS rileva solo un piccolo picco a 168 Hz (**Figura 10**), e risulta essere abbastanza insensibile alla dinamica del flusso.
- Il sensore **ODC2** operante nel campo NIR rileva le frequenze di  $f= 189, 377$  (la seconda armonica) e 566 Hz (la terza armonica) (**Figura 10**).

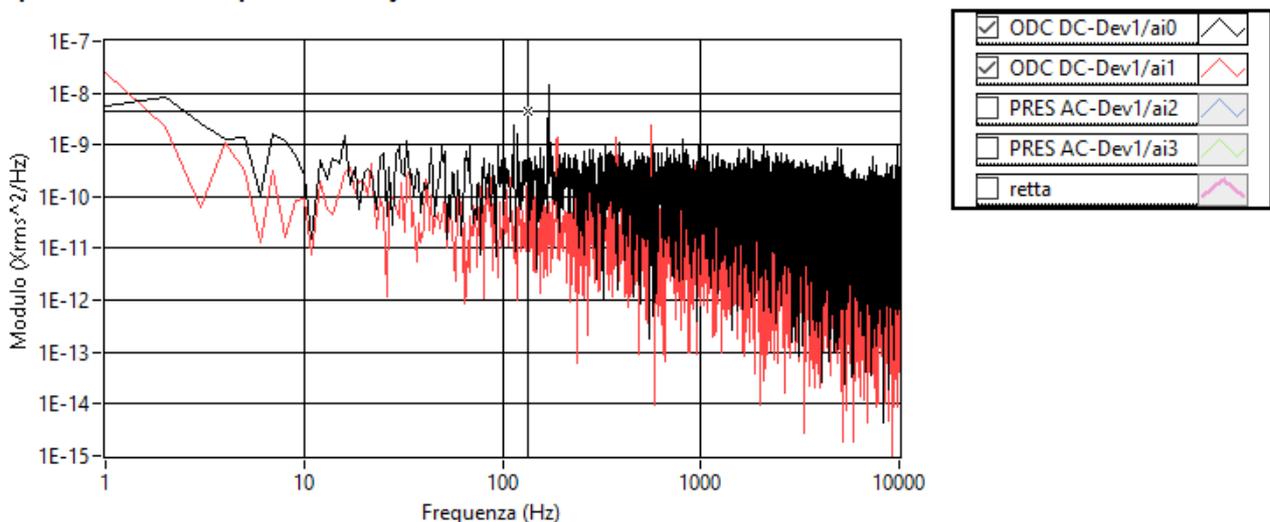
Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, **Tabella 4**.

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)



**Figura 9:** PSD del segnale **PRES** del microfono per la condizione STABILE  $S_{pil}$  in **Tabella 1**.

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)



**Figura 10:** PSD del segnale **PRES** del microfono per la condizione STABILE  $S_{pil}$  in **Tabella 1**.

### 3.2 Risultati delle prove nelle condizioni stabili della fiamma

Qui di seguito si riportano gli spettri (PSD) del segnale di pressione (PRES) e dei due segnali ottici (ODC1 e ODC2) nel caso di fiamme stabili e poco rumorose.

#### 3.2.1 Miscela combustibile 100% CH<sub>4</sub> e 0% H<sub>2</sub>: S0

##### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

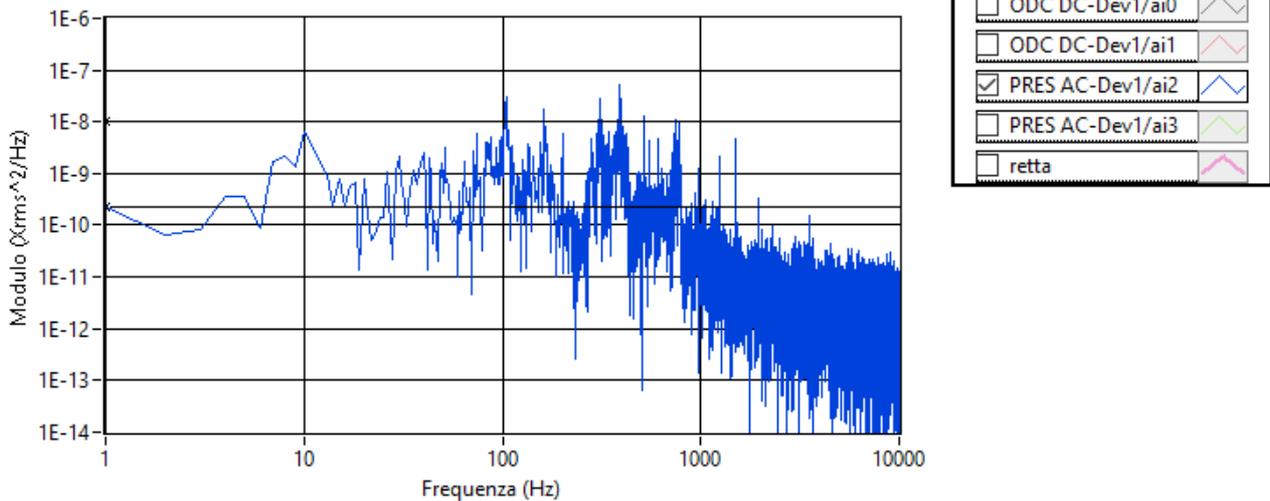


Figura 11: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione STABILE S0 in Tabella 2.

##### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

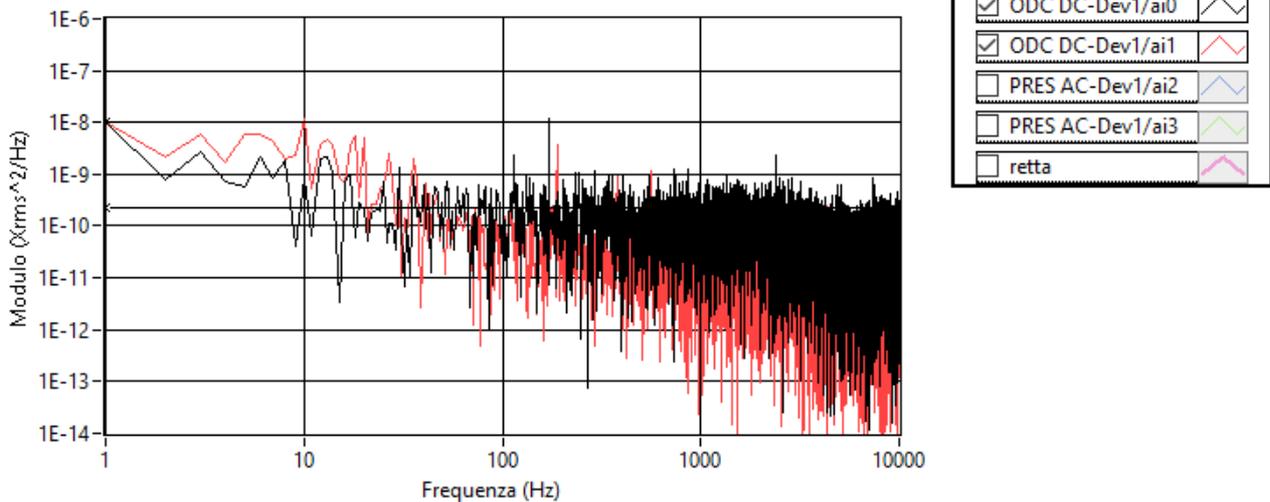


Figura 12: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione STABILE S0 in Tabella 2.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono  $f=105, 163, 311, 386, 528, 754, 968, 1250, 1500$  Hz (Figura 11). Il microfono PRES misura una OASPL di 72.4 dB.
- Il sensore ODC1 operante nel range UV-VIS rileva un unico e piccolo picco a 172 Hz, ma per il resto risulta essere insensibile alla dinamica del flusso (Figura 12).
- Il sensore ODC2 operante nel campo NIR rileva tre piccole frequenze a  $f= 189, 378$  e 567 Hz (Figura 12).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, Tabella 5.

3.2.2 Miscela combustibile 80% CH4 e 20% H2: S20

**Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)**

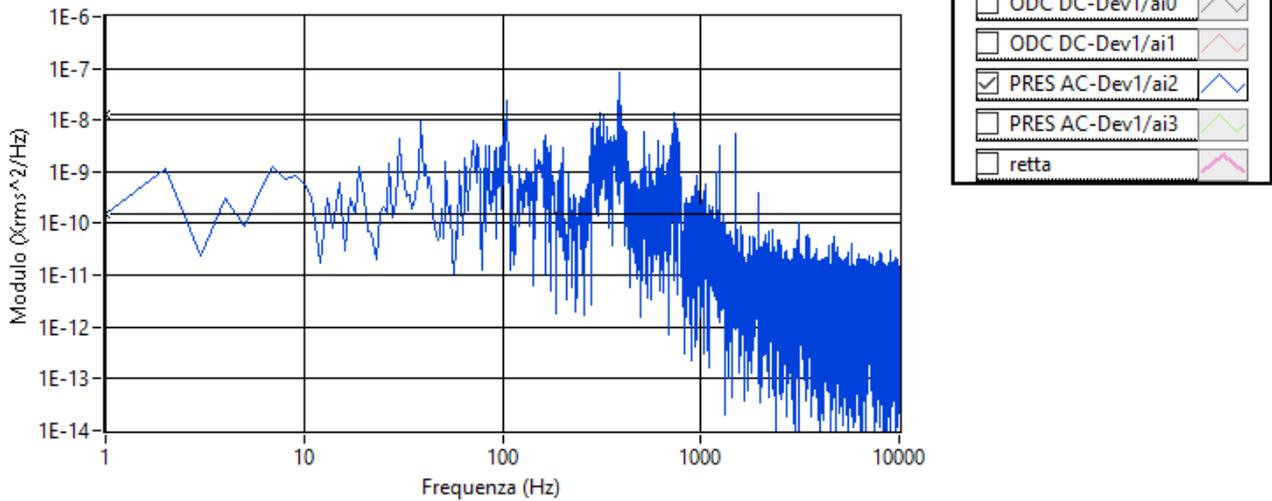


Figura 13: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione STABILE S20 in Tabella 2.

**Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)**

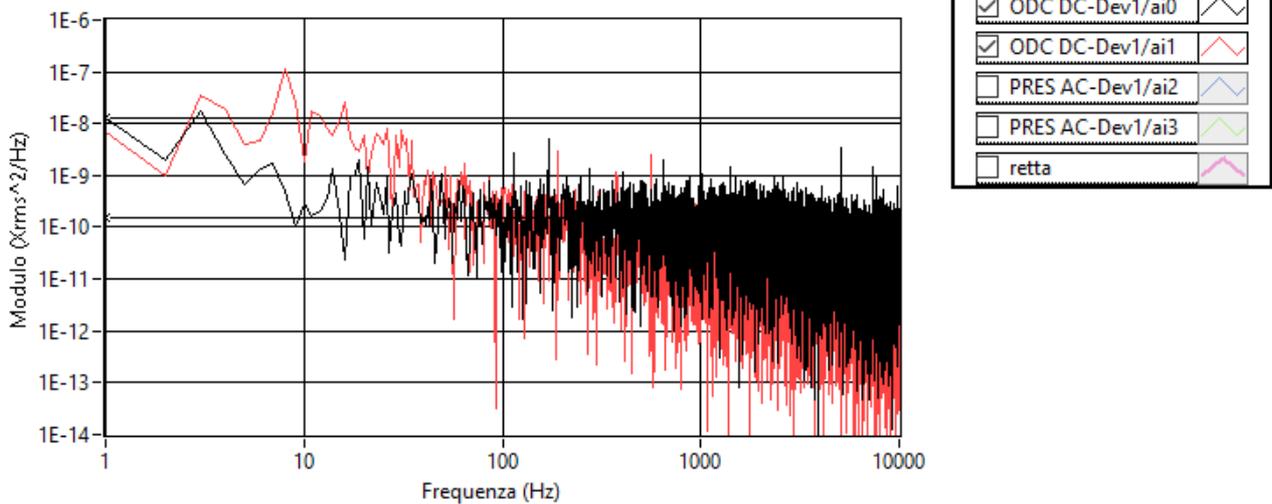


Figura 14: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione STABILE S20 in Tabella 2.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono f= 39, 106, 165, 201, 289, 388, 513, 734, 1250, 1500 Hz (Figura 13). Il microfono PRES misura una OASPL di 72.4 dB.
- Il sensore ODC1 operante nel range UV-VIS rileva due piccoli picchi a 115 e 172 Hz, ma per il resto risulta essere insensibile alla dinamica del flusso (Figura 14).
- Il sensore ODC2 operante nel campo NIR rileva le seguenti frequenze a f= 8, 192, 380 e 564 Hz (Figura 14).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, Tabella 5.

### 3.2.3 Miscela combustibile 60% CH<sub>4</sub> e 40% H<sub>2</sub>: S40

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

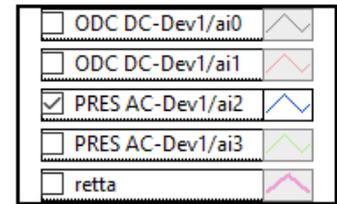
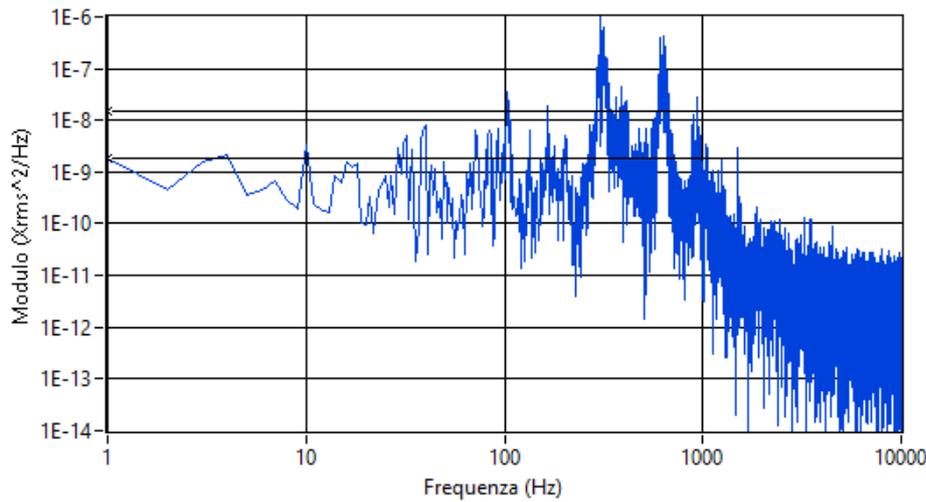


Figura 15: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione STABILE S40 in Tabella 2.

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

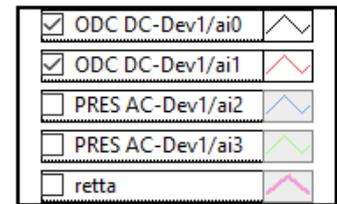
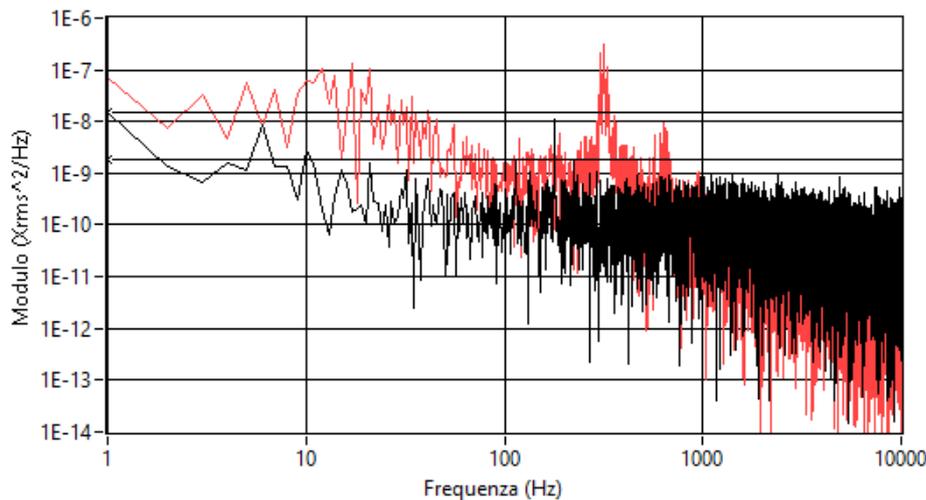


Figura 16: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione STABILE S40 in Tabella 2.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono  $f = 40, 103, 135$  (la stessa frequenza è rilevata nella condizione preliminare 00\_RUM, e quindi probabilmente causata dal rumore emesso dalla cappa di aspirazione),  $166, 206, 307, 387, 630, 944, 1500$  Hz (Figura 15). Il microfono PRES misura una OASPL di 84 dB.
- Il sensore ODC1 operante nel range UV-VIS rileva due piccoli picchi a 6 e 180 Hz, ma per il resto risulta essere insensibile alla dinamica del flusso (Figura 16).
- Il sensore ODC2 operante nel campo NIR rileva le seguenti frequenze a  $f = 315$  e 630 Hz (Figura 16).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, Tabella 5.

3.2.4 Miscela combustibile 50% CH4 e 50% H2: S50

**Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)**

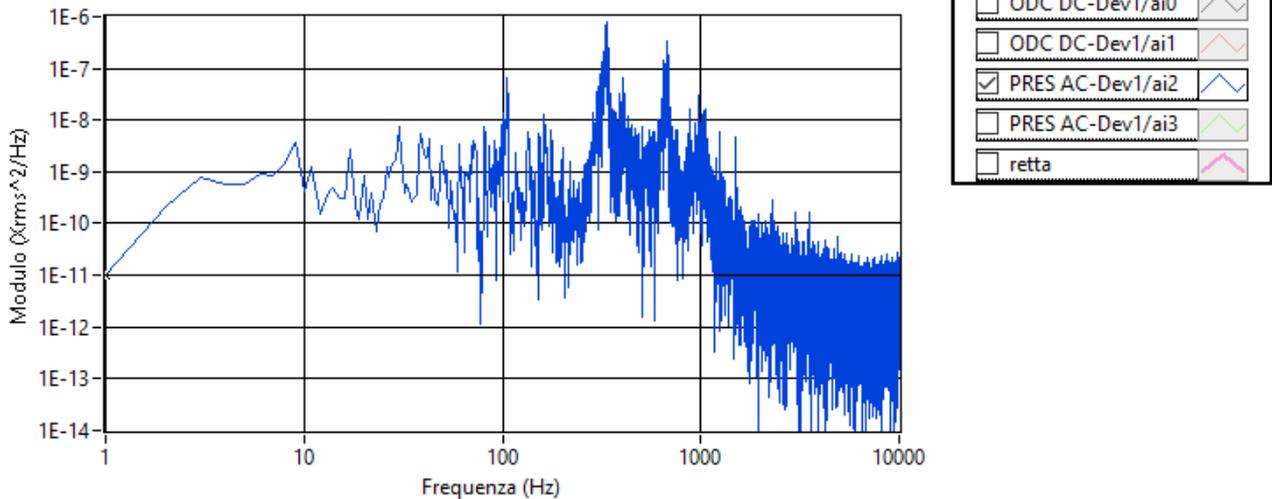


Figura 17: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione STABILE S50 in Tabella 2.

**Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)**

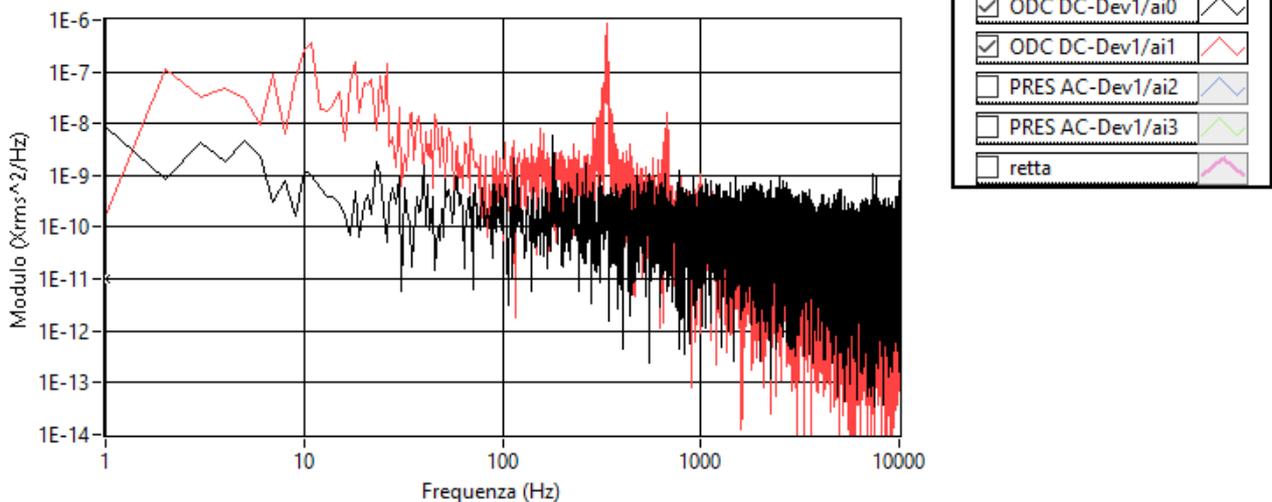


Figura 18: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione STABILE S50 in Tabella 2.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono  $f = 106, 328, 405, 673, 972, 1250, 1500$  Hz (Figura 17). Il microfono PRES misura una OASPL di 82.5 dB.
- Il sensore ODC1 operante nel range UV-VIS rileva un solo picco a 180 Hz, ma per il resto risulta essere insensibile alla dinamica del flusso (Figura 18).
- Il sensore ODC2 operante nel campo NIR rileva le seguenti frequenze a  $f = 11, 18, 26, 335, 673$  Hz (Figura 18).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, Tabella 5.

### 3.3 Risultati delle prove nelle condizioni instabili della fiamma

Qui di seguito si riportano gli spettri (PSD) del segnale di pressione (PRES) e dei due segnali ottici (ODC1 e ODC2) nel caso di fiamme instabili e rumorose.

#### 3.3.1 Miscela combustibile 100% CH<sub>4</sub> e 0% H<sub>2</sub>: I0

##### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

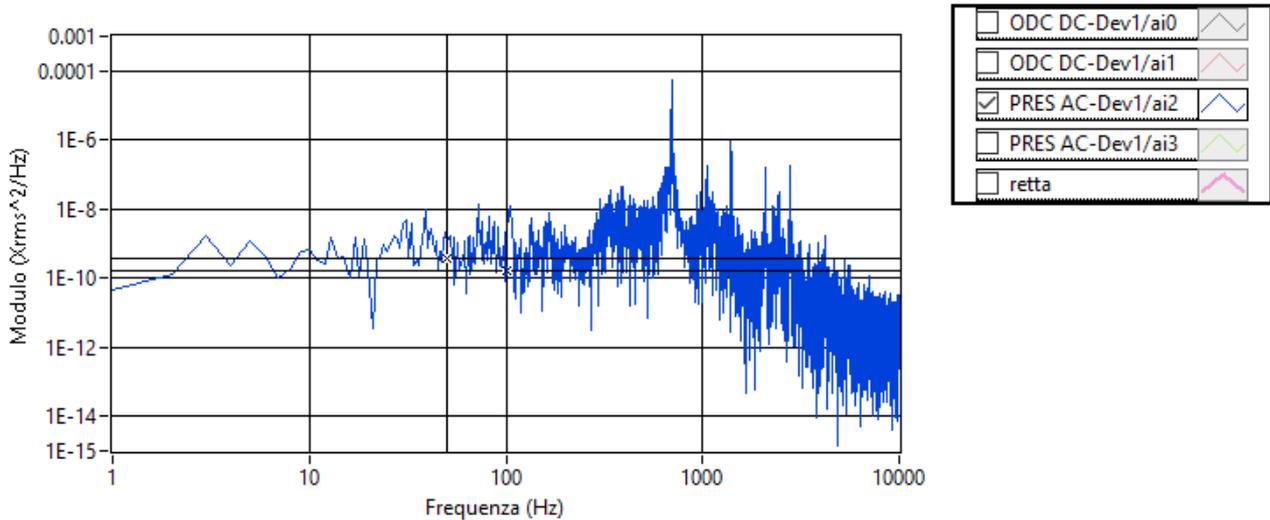


Figura 19: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione INSTABILE I0 in Tabella 3.

##### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

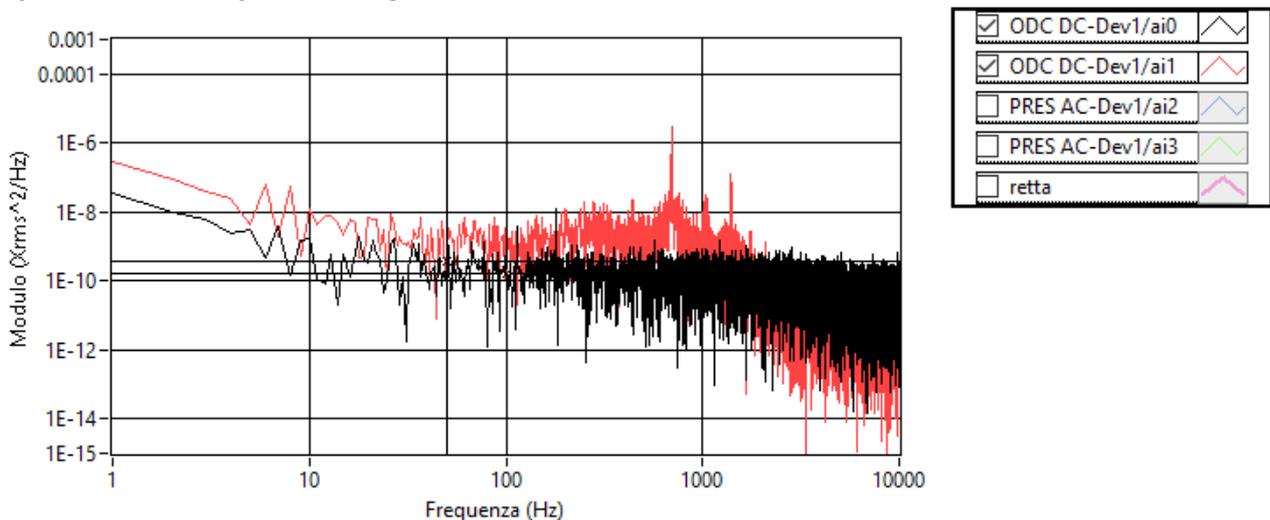


Figura 20: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione INSTABILE I0 in Tabella 3.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono  $f = 700, 1058, 1390, 2093, 2426, 2794$  Hz (Figura 19). Il microfono PRES misura una OASPL di 95 dB.
- Il sensore ODC1 operante nel range UV-VIS rileva due piccoli picchi a  $f = 114$  e  $180$  Hz (Figura 20).
- Il sensore ODC2 operante nel campo NIR rileva tre picchi a frequenza di  $f = 700, 1037, 1390$  Hz (Figura 20).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, Tabella 6.

3.3.2 Miscela combustibile 80% CH4 e 20% H2: I20

**Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)**

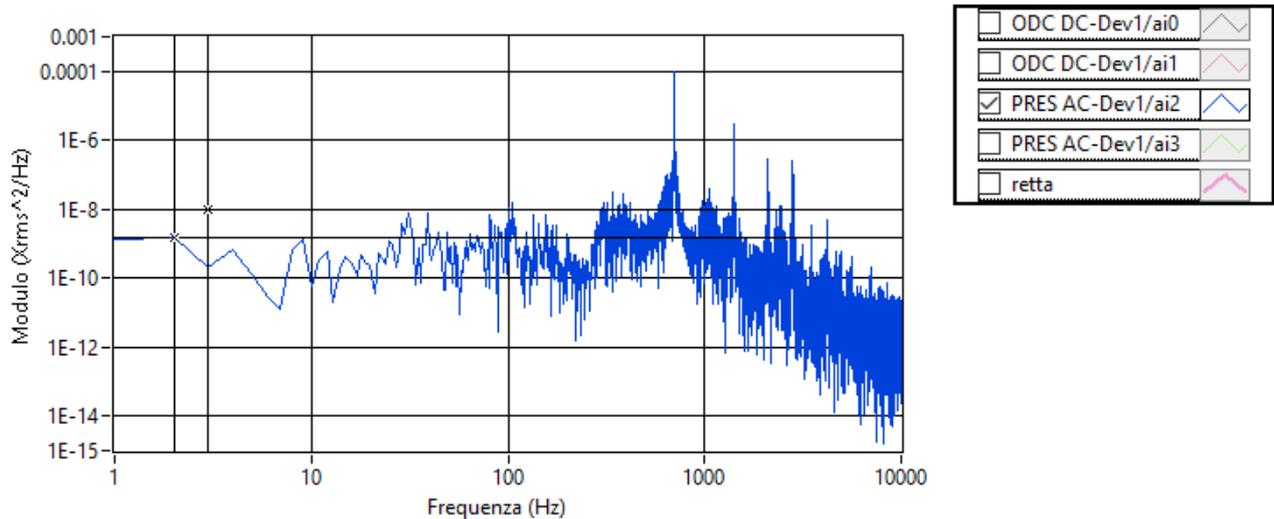


Figura 21: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione INSTABILE I20 in Tabella 3.

**Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)**

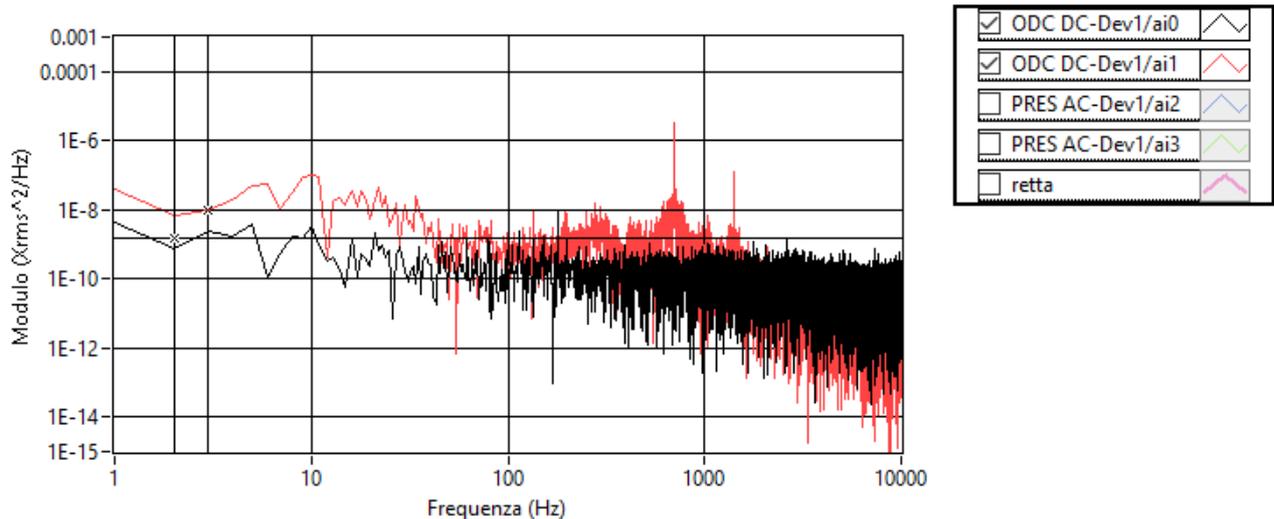


Figura 22: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione INSTABILE I20 in Tabella 3.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono  $f = 702, 1405, 2103, 2805$  Hz (Figura 21). Il microfono PRES misura una OASPL di 94.6 dB.
- Il sensore ODC1 operante nel range UV-VIS rileva un solo piccolo picco a  $f = 180$  Hz (Figura 22).
- Il sensore ODC2 operante nel campo NIR rileva due picchi a frequenza di  $f = 702, 1405$  Hz (Figura 22).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, Tabella 6.

### 3.3.3 Miscela combustibile 60% CH<sub>4</sub> e 40% H<sub>2</sub>: I40

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

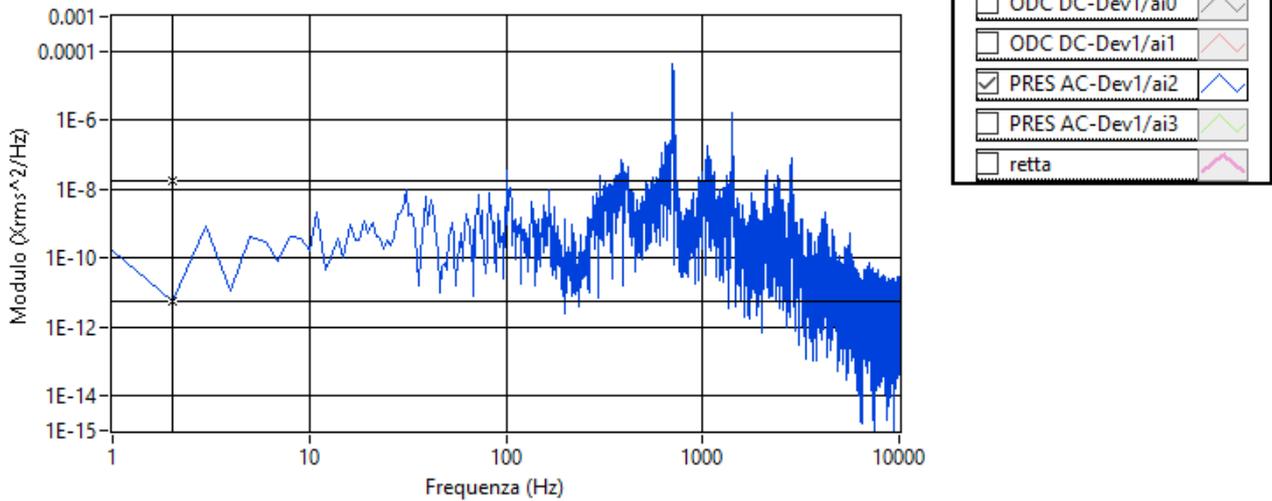


Figura 23: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione INSTABILE I40 in Tabella 3.

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

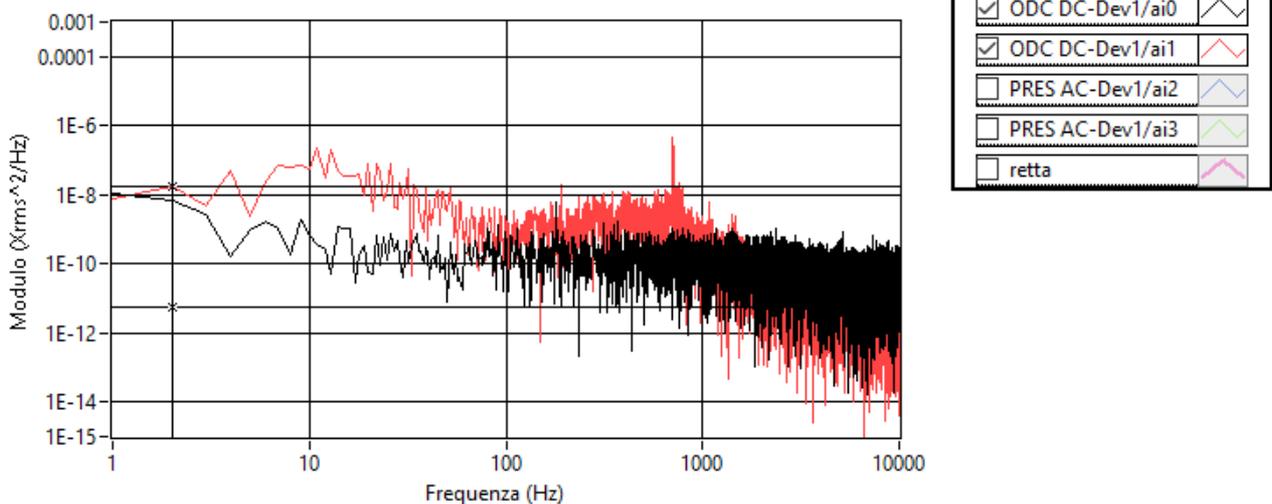


Figura 24: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione INSTABILE I40 in Tabella 3.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono  $f = 389, 708, 1059, 1413$  e  $2816$  Hz (Figura 23). Il microfono PRES misura una OASPL di 94.6 dB.
- Il sensore ODC1 operante nel range UV-VIS rileva un solo piccolo picco a  $f = 180$  Hz (Figura 24).
- Il sensore ODC2 operante nel campo NIR rileva un solo picco a  $f = 705$  Hz (Figura 24).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, Tabella 6.

3.3.4 Miscela combustibile 50% CH4 e 50% H2: I50

**Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)**

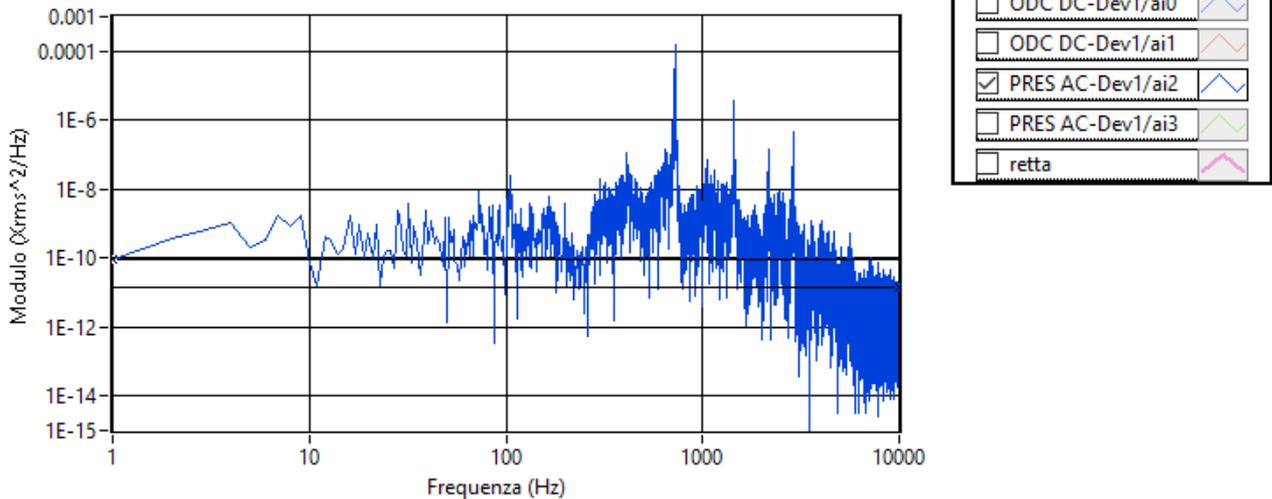


Figura 25: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione INSTABILE I50 in Tabella 3.

**Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)**

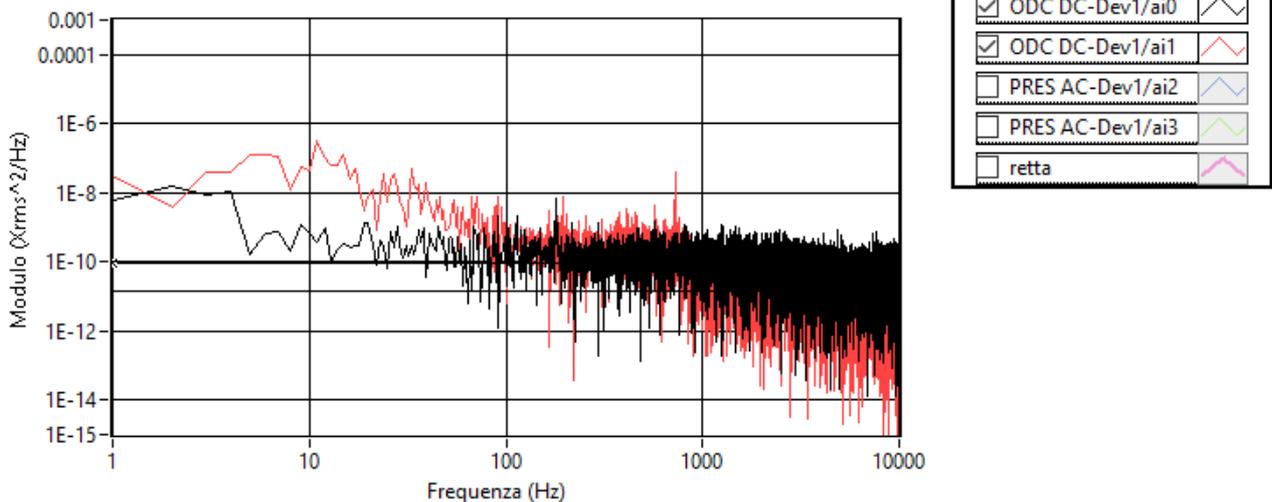


Figura 26: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione INSTABILE I50 in Tabella 3.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono f= 103, 410, **723**, **1.440**, 2.175 e 2.920 Hz (**Figura 25**). Il microfono PRES misura una OASPL di 95.8 dB.
- Il sensore **ODC1** operante nel range UV-VIS non rileva picchi (**Figura 26**).
- Il sensore **ODC2** operante nel campo NIR rileva un solo picco a f= 723 Hz (**Figura 26**).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, **Tabella 6**.

### 3.3.5 Miscela combustibile 40% CH<sub>4</sub> e 60% H<sub>2</sub>: I60

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

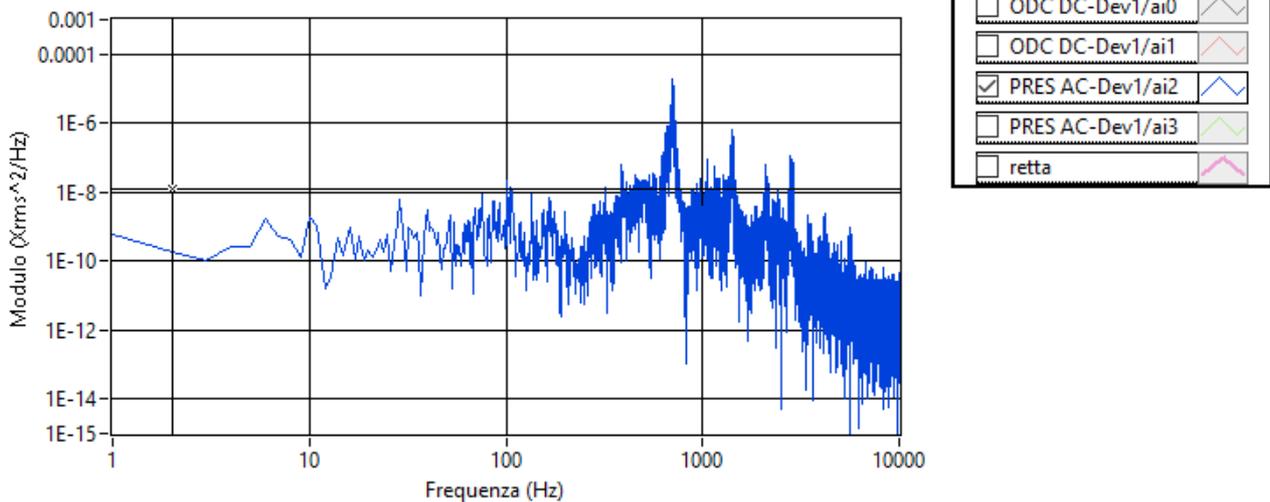


Figura 27: PSD del segnale PRES del microfono per la condizione INSTABILE I60 in Tabella 3.

#### Ampiezza della Power Spectral Density (PSD)

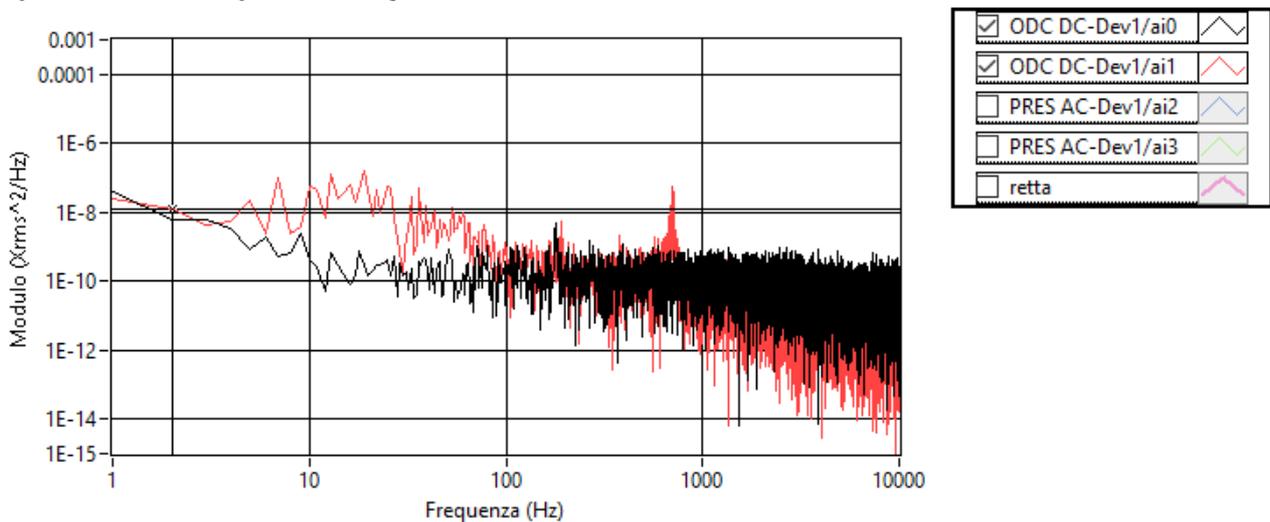


Figura 28: PSD dei segnali ottici ODC1 (range UV-VIS) e ODC2 (range NIR) per la condizione INSTABILE I60 in Tabella 3.

Si può affermare che:

- Le frequenze rilevate dal sensore di pressione PRES sono  $f = 703, 1412, 2089, 2850$  Hz (Figura 27). Il microfono PRES misura una OASPL di 94.8 dB.
- Il sensore ODC1 operante nel range UV-VIS rileva un piccolo picco a 180 Hz (Figura 28).
- Il sensore ODC2 operante nel campo NIR rileva un solo picco a  $f = 704$  Hz (Figura 28).

Tali valori sono stati riportati all'interno della tabella riassuntiva delle frequenze rilevate, Tabella 6.

### 3.4 Tabelle riassuntive delle frequenze rilevate

Qui di seguito si riportano due tabelle nelle quali sono state riassunte in maniera schematica le frequenze rilevate per quanto riguarda le condizioni preliminari (**Tabella 4**), le condizioni STABILI (**Tabella 5**) e quelle INSTABILI (**Tabella 6**).

Per facilitarne la lettura si è pensato di suddividere il campo della frequenza in tre range di interesse: 0-500 Hz e 500-2.500 Hz, 2.500-10.000 Hz.

**Tabella 4.** Frequenze rilevate per le condizioni preliminari in Tabella 1.

CONDIZIONE	0 – 500 Hz			500 – 2.500 Hz			2.500 – 10.000 Hz		
	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES
<b>00_RUM</b>			30, <b>103</b> , 135, 162, 300, <b>396</b>			1.250, 1.500			/
<b>SPIL</b>	168	189, 377, 566	30, 40, 65, 70, 86, <b>103</b> , 135, <b>166</b> , <b>201</b> , 300, <b>386</b>	/	/	<b>514</b> , 547, 607, 971, 1.250, 1.500		/	/

**Tabella 5.** Frequenze rilevate per le varie **condizioni STABILI** della Test-matrix in **Tabella 2**  
per le varie condizioni di  $Re_{princ}=2.850$  e  $\Phi_{princ}=1$ .

CONDIZIONE	0 – 500 Hz			500 – 2.500 Hz			2.500 – 10.000 Hz		
	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES
<b>S0</b>	172	189, 378	<b>105, 163, 311, 386</b>	/	567	528, 754, 968, 1.250, 1.500		/	
<b>S20</b>	115, 172	8, 192, 380	39, <b>106, 165, 201, 289, 388</b>	/	564	513, <b>734,</b> 1.250, 1.500		/	
<b>S40</b>	6, 180	<b>315</b>	40, <b>103, 135, 166, 206, 307, 387</b>	/	<b>630</b>	<b>630,</b> 944, 1.500		/	
<b>S50</b>	180	11, 18, 26, <b>335</b>	<b>106, 328, 405</b>	/	<b>673</b>	<b>673, 972,</b> 1.250, 1.500		/	

**Tabella 6.** Frequenze rilevate per le varie **condizioni INSTABILI** della Test-matrix in **Tabella 3** per le varie condizioni di  $Re_{princ}=2.850$  e  $\Phi_{princ}=1$ .

CONDIZIONE	0 – 500 Hz			500 – 2.500 Hz			2.500 – 10.000 Hz		
	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES	ODC1 (UV)	ODC2 (NIR)	PRES
<b>I0</b>	114, 180	/	/	/	700, 1037, 1390	700, 1.058, 1.390, 2.093, 2.426		/	2.794
<b>I20</b>	180	/	/	/	702, 1405	702, 1405, 2.103		/	2.805
<b>I40</b>	180	/	389	/	705	708, 1.059, 1.413		/	2.816
<b>I50</b>	/	/	103, 410	/	723	723, 1.440, 2.175		/	2.920
<b>I60</b>	180	/	/	/	704	703, 1.412, 2.089		/	2.850

## 4 Conclusioni

L'attività svolta durante questa annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 ha permesso di analizzare i regimi di instabilità e l'insorgenza delle instabilità termoacustiche.

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 acquisita dal sensore UV-VIS dell'ODC1, e l'altra dal sensore NIR dell'ODC2.

Il sensore ottico che ha operato nel range UV-VIS ristretto a lunghezze d'onda tra 150-550 nm è risultato essere insensibile alle variazioni di funzionamento del bruciatore stesso e l'ampiezza del segnale spesso si confondeva con il rumore del segnale. La motivazione di ciò va ricercata nel fatto che il bruciatore ROMULUS è un bruciatore di piccola potenza (scala da laboratorio) e presenta una combustione che produce poche specie radicaliche OH e CH.

## 5 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. E. Giulietti, C. Stringola, E. Giacomazzi, M. Nobili, *“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, Springer Berlin/Heidelberg, vol.44, Issue 4, pp.557-564, April 2008.
5. E. Giulietti, *“Combustion instabilities in gas turbine burners: new diagnostic methodology”*, PhD thesis, XXII Ciclo, University of Roma TRE, 2011.
6. E. Giacomazzi, E. Giulietti, C. Stringola, S. Cassani, L. Pagliari, S. Chiocchini, *“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.
7. 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 Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, PAR2015, Classificazione: Report RdS/PAR2015/237, Ottobre 2016.
8. E. Giulietti, C. Stringola, E. Giacomazzi, M.L. Grilli, A. Piegari, *“Identificazione di Fenomeni Precursori di Instabilità Termo-Acustiche con il Sistema ODC basato su Segnali UV/NIR”*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, PAR2016, Classificazione: Report RdS/PAR2016/186, Settembre 2017.
9. S. Chiocchini, *“Chaotic and Linear Statistics Analysis in Thermo-acoustic Combustion Instabilities Detection”*, PhD thesis, XXIX Ciclo, University of Roma TRE, 2017.
10. C. Stringola, E. Giulietti, *“Descrizione sintetica del sistema ODC, e relativa User Interface, per l’Identificazione di Instabilità Termo-Acustiche basato su segnali UV e NIR”*, Rapporto tecnico ENEA, Classificazione DTE-PCU: PCU/019/2018/IL, 8 Ottobre 2018.
11. C. Stringola, E. Giulietti, E. Giacomazzi, C. Romano, S. Picchi, S. Chiocchini, *“Identificazione di Instabilità Termo-Acustiche con il Sistema ODC basato su Segnali UV/NIR nel Combustore Blue Rig BHGE”*, Rapporto interno ENEA, PCU/018/2018/ER, 8 Ottobre 2018.
12. S. Scaglione e D. Zola, *“Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell’ossigeno nei prodotti di combustione in regime MILD”*, Settembre 2014, Report RdS/PAR2013/300.
13. S. Scaglione e D. Zola, *“Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell’ossigeno nei prodotti di ossi-combustione”*, Settembre 2015, Report RdS/PAR2014/247.
14. S. Scaglione e D. Zola, *“Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell’ossigeno nei prodotti di ossi-combustione”*, Settembre 2016, Report RdS/PAR2015/256.

15. S. Scaglione, D. Zola e R. Chierchia, *“Sviluppo di uno strumento per il monitoraggio dell’ossigeno nei prodotti di combustione mediante spettroscopia ottica in emissione”*, Settembre 2017, Report RdS/PAR2016/187.
16. S. Scaglione, D. Zola e R. Chierchia, *“Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell’ossigeno nei prodotti di ossi-combustione”*, Settembre 2018, Report RdS/PAR2017/199.
17. S. Scaglione, C. Stringola, D. Zola, E. Giulietti, R. Chierchia, R. Lo Presti, *“Sviluppo del sistema di automazione dello strumento D.O.E.S.”*, Dicembre 2018, Report RdS/PAR2018/053.
18. C. Stringola, E. Giulietti, A. Gentili, S. Scaglione, D. Zola, *“Automatizzazione dei singoli sottosistemi di acquisizione e controllo del sistema DOES”*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR\_19\_21), PTR2019, Classificazione: Report RdS/PTR2019/131, Dicembre 2019.
19. S. Scaglione, D. Zola, A. Gentili, C. Stringola, E. Giulietti, *“Analisi preliminare dei tempi di ritardo del sistema DOES”*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR\_19\_21), PTR2019, Classificazione: Report Report RdS/PTR2019/132, Dicembre 2019.
20. R. Camussi, T. Pagliaroli, L. Burghignoli, G. Troiani, *“Analisi numerica e sperimentale dell’instabilità in bruciatori di ultima generazione: studi sulla combustione in cicli EGR per turbogas”*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, PAR2015, Classificazione: Report RdS/PAR2015/234, Settembre 2016.
21. G. Troiani, M. Marrocco, T. Pagliaroli, R. Camussi, *“Analisi della dinamica di combustione su un bruciatore in scala da laboratorio in forte eccesso di anidride carbonica”*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, PAR2016, Classificazione: Report RdS/PAR2016/179, Settembre 2017.
22. G. Troiani, M. Marrocco, T. Pagliaroli, R. Camussi, *“Analisi della dinamica di combustione su un bruciatore in scala da laboratorio in forte eccesso di anidride carbonica”*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, PAR2017, Classificazione: Report RdS/PAR2017/191, Settembre 2018.
23. D. Cecere, E. Giacomazzi, N. Arcidiacono, F.R. Picchia, *“Large Eddy Simulation of a Stoichiometric Premixed CH<sub>4</sub>/Air Confined Slot Flame”*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, PAR2016, Classificazione: Report RdS/PAR2016/180, Settembre 2017.
24. D. Cecere, E. Giacomazzi, N. Arcidiacono, F.R. Picchia, *“Simulazione Numerica Diretta del Bruciatore ROMULUS per lo Studio della Combustione CH<sub>4</sub>/Aria in Ambiente Ricco di CO<sub>2</sub>”*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, PAR2017, Classificazione: Report RdS/PAR2017/192, Settembre 2018.

## 6 Abbreviazioni ed acronimi

Φ	rapporto di equivalenza
APD	Avalanche PhotoDiode
BW	bandwidth (Hz)
CARS	Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy
CCS	Carbon Capture Storage
CCD	Charge Coupled Device
DI	digital input
DO	digital output
D.O.E.S.	Detection of Oxygen by Emission Spectroscopy
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ENEA	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
GA.M.E.S.	GAs Monitoring by Emission Spectroscopy
IPSE	Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi per l'Energia
IR	Infrared
LA	Linea di Attività
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LIF	Laser Induced Fluorescence
MFC	Mass Flow Controller
MN	Matching Network
MTG	MicroTurbina
NG	Natural Gas
NIR	Near InfraRed
ODC	Optical Diagnostics of Combustion
OASPL	Overall Sound Pressure Level
OES	Optical Emission Spectroscopy
P2G	Power to Gas
P2L	Power to Liquid
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PIV	Particle Image Velocimetry
PTR	Piano Triennale di Realizzazione
RF	radio frequenza
Re	numero di Reynolds
Syngas	Synthetic Gas, ossia gas di sintesi
SPL	Sound Pressure Level
TG	Turbine a Gas
TRL	Technology Readiness Level, Livello di Maturità Tecnologica
UV	Ultra Violet, optical range (10 nm – 400 nm)
VIS	Visible radiation, optical range (400-700 nm)
WP	Work Packages