



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione aeroacustica di un bruciatore non convenzionale di tipo Trapped Vortex

E. Giulietti, C. Stringola, R. Camussi, A. Di Marco

CARATTERIZZAZIONE AEROACUSTICA DI UN BRUCIATORE NON CONVENZIONALE DI TIPO TRAPPED VORTEX

E. Giulietti, C. Stringola (ENEA)

R. Camussi, A. Di Marco (Università degli Studi Roma TRE)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto B2: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

Obiettivo C: Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione e di ossi-combustione

Punto C.2: Sviluppo, progettazione e test di bruciatori per turbine a gas

Responsabile del Progetto: Stefano Giammartini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte direttamente da ENEA e all'interno dell'Accordo di collaborazione
"Caratterizzazione aeroacustica di un bruciatore non convenzionale di tipo Trapped Vortex"

Responsabile scientifico ENEA: Emanuele Giulietti

Responsabile scientifico Università degli Studi Roma TRE: Roberto Camussi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DEL BRUCIATORE TVC MEDIANTE SIMULAZIONE NUMERICA FEM.....	11
2.2 CARATTERIZZAZIONE AEROACUSTICA DEL BRUCIATORE TVC A FREDDO ED IN CONDIZIONI REATTIVE.....	15
2.2.1 <i>Set-up sperimentale</i>	15
2.2.2 <i>Matrice delle prove</i>	25
PROVE A FREDDO	25
PROVE A CALDO	26
2.2.3 <i>Risultati prove a freddo</i>	27
EFFETTO VARIAZIONE ARIA PRIMARIA	27
EFFETTO VARIAZIONE ARIA SECONDARIA	28
EFFETTO VARIAZIONE DISTRIBUZIONE ARIA PRIMARIA/SECONDARIA A PARITÀ DI ARIA TOTALE	29
EFFETTO VARIAZIONE TEMPERATURA DI PRERISCALDAMENTO DELL'ARIA	31
2.2.4 <i>Risultati prove a caldo</i>	33
EFFETTO VARIAZIONE RAPPORTO DI EQUIVALENZA TOTALE	33
EFFETTO VARIAZIONE ARIA PRIMARIA	37
EFFETTO VARIAZIONE ARIA SECONDARIA	40
EFFETTO VARIAZIONE DISTRIBUZIONE ARIA PRIMARIA/SECONDARIA A PARITÀ DI ARIA TOTALE	43
EFFETTO VARIAZIONE TEMPERATURA DI PRERISCALDAMENTO DELL'ARIA	45
2.2.5 <i>Confronto prove a freddo – prove a caldo</i>	49
2.2.6 <i>Test con ODC</i>	51
EFFETTO VARIAZIONE RAPPORTO DI EQUIVALENZA TOTALE	52
EFFETTI VARIAZIONE ARIA PRIMARIA	53
EFFETTO VARIAZIONE ARIA SECONDARIA	54
EFFETTO VARIAZIONE TEMPERATURA DI PRERISCALDAMENTO DELL'ARIA	55
CONFRONTI SPETTRI ODC E PRESSIONE A PARETE	57
3 CONCLUSIONI.....	61
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	62
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	63

Sommario

Il presente documento contiene la descrizione delle attività svolte da ENEA e Università degli Studi di Roma TRE nell'ambito di un accordo di collaborazione con l'ENEA.

L'obiettivo prefissato si è concretizzato nello sviluppo e finalizzazione di una serie di simulazioni numeriche con un codice di calcolo commerciale volte all'individuazione dei modi acustici del bruciatore TVC (ETVB-mod1) e di una serie di campagne sperimentali caratterizzanti l'aeroacustica e la dinamica del bruciatore a freddo e in condizioni reattive.

Essendo le attività di ENEA e Università strettamente integrate, si è preferito emettere un unico report riepilogativo dell'intera attività, evitando continui rimandi ad altro documento tecnico. Tuttavia, pur nella citata integrazione, al fine di meglio discriminare i rispettivi ruoli, si osserva quanto segue:

- il **set-up sperimentale**, (introduzione al paragrafo 2 e paragrafo 2.2.1) inteso come predisposizione hardware dell'impianto, modifiche allo stesso e sviluppo del S/W di gestione è stato integralmente realizzato da ENEA
- la **caratterizzazione acustica del bruciatore TVC mediante simulazione numerica FEM** (paragrafo 2.1) è stata condotta autonomamente dall'Università;
- la **matrice delle prove** e la conduzione delle stesse sono state definite e condotte in collaborazione tra ENEA e Università;
- i **test di aeroacustica a freddo e a caldo** (paragrafi 2.2.3 – 2.2.5) sono stati condotti autonomamente dall'Università;
- i **test con ODC** (paragrafo 2.2.6) sono stati condotti autonomamente dall'ENEA.

Il comportamento acustico di un modulo del TVC è stato analizzato numericamente utilizzando un modello 3D agli elementi finiti che ha consentito la determinazione dei modi acustici propri. Il primo modo acustico, essendo quello maggiormente energetico e quindi fortemente indesiderato perché causa di innesco di instabilità termoacustiche, è stato analizzato approfonditamente. Lo studio ha portato all'introduzione di una relazione analitica in grado di predirne la frequenza tenendo in considerazione lo sviluppo del primo modo nel dominio esterno.

Il comportamento aeroacustico del TVC a freddo ed in condizioni reattive, è stato determinato sperimentalmente attraverso una serie di campagne di misura effettuate sull'impianto disponibile presso l'ENEA. In una prima fase si è verificato il set-up sperimentale esistente e si è cercato di apportare opportuni miglioramenti proponendo nuove soluzioni sulla base di recenti studi di letteratura. Successivamente dopo aver pianificato una test matrix in collaborazione con il personale ENEA, si è proceduto all'acquisizione dei dati in varie condizioni di funzionamento ed al loro post-processing.

Particolarmente critiche sono risultate le misure delle fluttuazioni di pressione a parete, per le quali si è usato un opportuno trasduttore, essendo necessario un sistema di misura in grado di resistere alle alte temperature. La pressione acustica è stata monitorata anche attraverso dei microfoni posizionati all'esterno del modello. In questo modo è stato possibile distinguere le componenti modali delle fluttuazioni di pressione a parete dalle fluttuazioni di natura idrodinamica. Inoltre, per avere informazioni statistiche sull'andamento delle velocità ed aver modo di correlarle con le pressioni, sono state condotte alcune prove preliminari utilizzando due sensori ODC, un trasduttore di pressione collegato alla parete ed un microfono esterno.

Le campagne di misura sono state finalizzate alla ricerca ed alla caratterizzazione delle condizioni di transizione e di innesco delle instabilità termoacustiche del combustore. Sono stati variati i valori di portata di aria primaria, portata di aria secondaria, portata di gas metano e temperatura dell'aria in ingresso, per consentire di parametrizzare i risultati in termini di potenza termica e rapporto di equivalenza. Dal confronto tra le fluttuazioni di pressione rilevate a parete e all'esterno sono stati individuati dei picchi in frequenza dovuti ad effetti di natura acustica ed in particolare legati al primo modo di risonanza della

geometria. I valori della frequenza associata al picco più energetico sono risultati in buon accordo con la predizione del modello analitico-numerico ottenuto nella fase preliminare. Il confronto tra spettri di velocità e dati di pressione a parete ha consentito di separare, in termini di contenuto in frequenza, i contributi idrodinamici ed aeroacustici delle fluttuazioni di pressione a parete e di individuare delle condizioni di innesco di fenomeni periodici che possono essere considerati dei precursori delle instabilità termoacustiche.

1 Introduzione

Il *Trapped Vortex Combustor* (TVC) è un combustore di relativa nuova concezione sfruttabile nei motori con Turbine a Gas, potenzialmente in grado di risolvere la crescente domanda di alta efficienza, basse emissioni e basse perdite di carico. Gli intrinseci vantaggi alla base della sua concezione lo rendono competitivo rispetto ai combustori tradizionali. Inoltre la tecnologia Trapped Vortex è in grado di realizzare condizioni di combustione MILD (*Moderate and Intense Low oxygen Dilution*).

La principale differenza tra TVC e combustori tradizionali per Turbine a Gas risiede nelle modalità di stabilizzazione della fiamma. Negli ultimi, la fiamma è stabilizzata attraverso la formazione di un flusso toroidale nella zona primaria dovuto all'interazione tra l'aria entrante ed il flusso di combustibile. Prima di entrare nella camera di combustione all'aria viene conferita una componente di velocità tangenziale attraverso degli swirler. Nel TVC il mescolamento avviene all'interno di una cavità opportunamente progettata dove aria e combustibile vengono iniettate con continuità garantendo una combustione stabile e sostenuta.

Basse perdite di carico sono garantite dal fatto che il flusso principale nella turbina a gas procede indisturbato senza interferenze causate dalla presenza di flussi trasversali.

Le performance del TVC sono influenzate dalle capacità di mescolamento aria-combustibile all'interno della cavità. La presenza di ricircolazione dei prodotti della combustione all'interno della cavità aiuta a bruciare un significativo quantitativo di combustibile in condizioni di miscela ricca, mantenendo il flusso principale povero. Queste condizioni sono necessarie per ottenere basse emissioni di NO_x. Una distribuzione omogenea dei prodotti della combustione è anche importante per ottenere adeguate distribuzioni di temperature all'interno del combustore e alla sua uscita.

La ricerca del miglior compromesso tra l'efficienza del combustore e l'emissione di inquinanti può portare in alcune condizioni operative all'insorgere di fenomeni di instabilità della fiamma. L'accoppiamento tra variazioni di rilascio di calore legate ai cambiamenti di stechiometria della reazione e i modi acustici del combustore possono infatti creare fenomeni di instabilità termoacustica.

Le instabilità termoacustiche si manifestano con elevate fluttuazioni di pressione e crescente rilascio di calore. L'insorgere di queste problematiche porta ad un aumento delle vibrazioni del sistema, alti livelli di rumore e aumento delle temperature con conseguenti danneggiamenti del sistema per fatica o fusione.

L'identificazione e la comprensione dei meccanismi che innescano questa fenomenologia è quindi un passo cruciale nella progettazione e messa in opera di un combustore. E' in questa ottica che si inquadra il lavoro svolto in collaborazione tra l'Università degli Studi Roma TRE ed il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.

Con lo scopo di approfondire la conoscenza dei regimi di stabilità sono stati approntati una serie di test numerici e sperimentali su un modulo di bruciatore TVC, l'ETVB-mod1 (ENEA Trapped Vortex Burner modello 1), presente all'ENEA e funzionante sia con metano che con syngas. I modi acustici sono stati studiati per via numerica e poi successivamente attraverso una analisi parametrica sperimentale si è caratterizzata l'aeroacustica del bruciatore sia a freddo che in condizioni reattive. Nelle analisi è stato evidenziato l'eventuale insorgere di accoppiamenti termoacustici non desiderati.

I principali risultati ottenuti e le modalità con cui sono stati raggiunti sono spiegati esaustivamente nelle sezioni che seguono.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Il TVC oggetto del presente studio numerico-sperimentale è una rappresentazione bidimensionale di tre moduli di un bruciatore anulare per turbine a gas dalle dimensioni estremamente compatte. Si trova nel Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA ed è una evoluzione di un precedente impianto da cui prende il nome: MICOS (Multipurpose Installation for COMbustion Studies). L'impianto è multifunzionale per prove di combustione ad alta temperatura. Il prototipo di TVC è riportato in Figura 2-1.

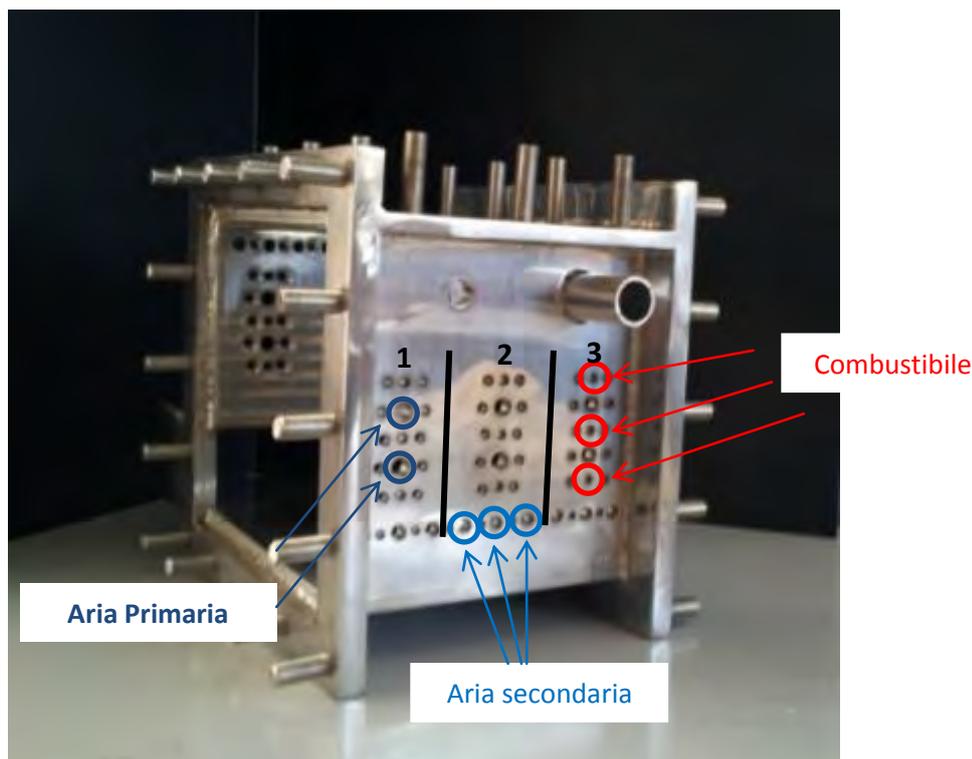


Figura 2-1: Il TVC dell'impianto MICOS. Centro Ricerche Casaccia, ENEA.

Il corpo bruciatore ha la forma di un parallelepipedo con una sezione di forma quadrata di dimensioni 190 x 190 mm. In Figura 2-1 sono evidenziati i tre moduli che costituiscono il TVC. Per ognuno di essi sono stati praticati dei fori su cui vengono fissati gli ugelli per l'adduzione dell'aria e del combustibile, in particolare:

- 3 fori per l'adduzione del combustibile;
- 2 fori per l'aria primaria;
- 3 fori per l'aria secondaria;

Con il fine di incentivare la creazione del vortice all'interno della cavità sono stati praticati altrettanti fori con distribuzione ruotata di 180° sulla parete opposta, al di sopra del collettore di scarico. Nel seguito verrà indicata come direzione principale l'asse degli ugelli.

Le portate volumetriche totali minime e massime con cui può essere alimentato il TVC sono riportate nella seguente tabella.

Tabella 2-1: Portate volumetriche totali minime e massime dei sistemi di alimentazione del TVC.

Range operativi sistemi di alimentazione TVC			
	n° fori	Portate Volumetriche [Nm ³ /h]	
		Min	Max
Aria Primaria Low	12	2.4	24
Aria Primaria High	12	15	140
Aria Secondaria	18	10	190
Metano CH ₄	18	1.5	20

Si tenga presente che per l'aria primaria vi è la possibilità di utilizzare alternativamente o contemporaneamente due confluenti condotti di alimentazione denominati Aria Primaria Low e Aria Primaria High per una misura più accurata rispettivamente delle basse e alte portate. Inoltre entrambe le portate possono essere preriscaldate fino ad una temperatura di 300 °C.

Il sistema di alimentazione è collegato a dei manometri, regolatori di flusso e termocoppie (Figura 2-2) gestiti in remoto attraverso un software appositamente creato dal personale ENEA, il quale non solo permette il controllo dell'impianto, ma anche il salvataggio automatico dei dati impianto durante il suo funzionamento.

Dalla Figura 2-2 e in particolare dalla Figura 2-3 è possibile visualizzare il TVC montato sull'impianto MICOS.

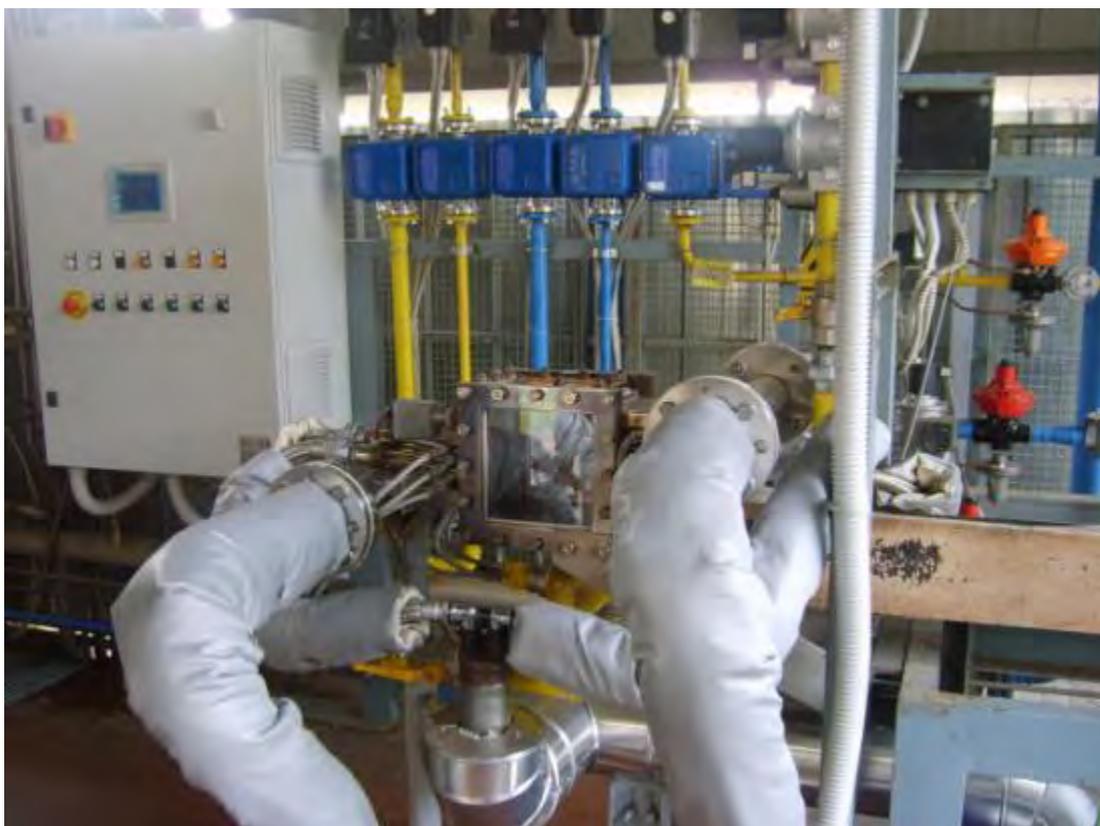


Figura 2-2: Vista del TVC dell'impianto di alimentazione e controllo aria e combustibile.

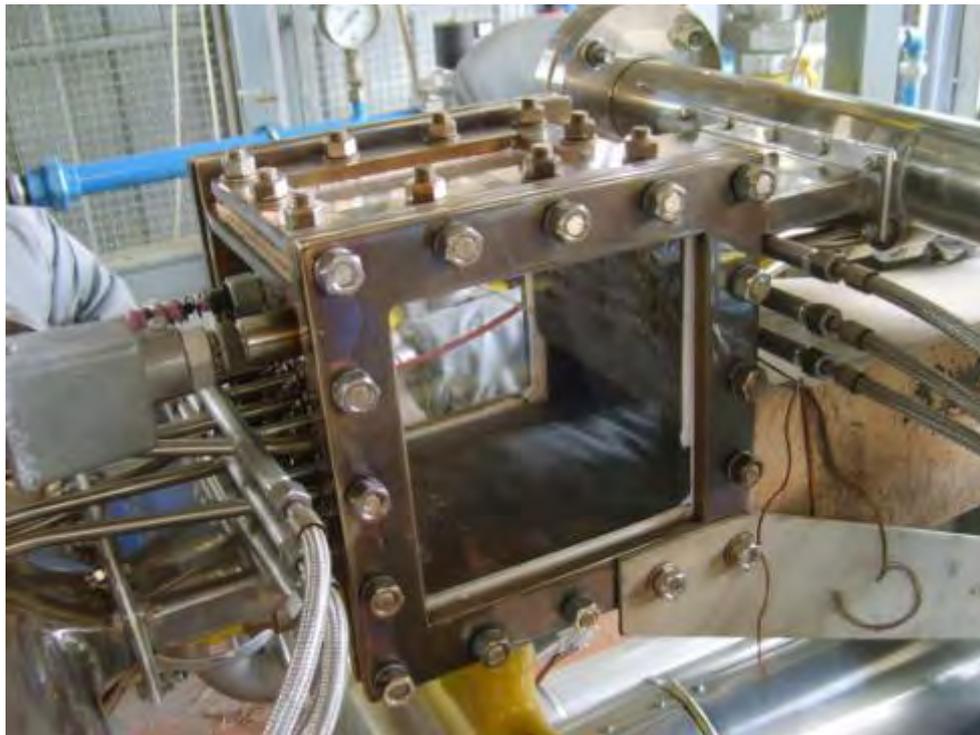


Figura 2-3: Vista dettagliata del TVC montato sull'impianto MICOS.

Dalla Figura 2-3, è possibile osservare sulla faccia laterale sinistra del bruciatore l'elettrodo di accensione e la fotocellula UV per la rilevazione di fiamma. Sulla destra il collettore di scarico.

Il TVC è predisposto con 3 finestre intercambiabili, due laterali ed una superiore. Nella configurazione riportata in Figura 2-3 sono state montate 3 finestre in quarzo due sulle facce laterali ed una su quella superiore. Con questo set-up è possibile effettuare misure con tecniche ottiche su un piano parallelo alla base del TVC e su un piano perpendicolare alla base e passante per la direzione principale. Durante il normale funzionamento si utilizzano due piastre di acciaio ed una di quarzo. Quella in quarzo è posizionata lateralmente e si rende necessaria per consentire l'accesso ottico all'interno del bruciatore. Per le misure in pressione le piastre in acciaio sono dotate di prese appositamente progettate. Un'altra presa di pressione è disponibile alla base del TVC. Per i dettagli riguardo alle dimensioni delle prese di pressione si consulti il paragrafo successivo.



Figura 2-4: Vista inferiore della base del TVC. Il particolare evidenziato è il condotto collegato alla presa di pressione.

Lo scarico del combustore è costituito da un primo tratto di sezione rettangolare di dimensioni 50 x 180 mm e di lunghezza 100 mm saldato al TVC. Prosegue con un secondo tratto della stessa sezione del primo e di lunghezza 600 mm che serve da raccordo con la parte finale. Il raccordo convoglia i fumi in un condotto di scarico di sezione circolare ad L. Il diametro è di 500 mm. Il tratto orizzontale è lungo 3.5 m e quello verticale circa 4 m. La parte finale del condotto di scarico è protetto con un coperchio conico per evitare l'ingresso di acqua.

Sul modello di TVC sono state condotte due analisi:

1. Analisi numerica tramite un modello FEM per la ricerca dei modi acustici della camera di combustione i cui risultati saranno presentati nella sezione 0;
2. Analisi sperimentale volta allo studio dell'aeroacustica riassunta nella sezione 0.

Le conclusioni e gli sviluppi futuri sono riassunti nella sezione 0.



Figura 2-5: Vista del condotto di scarico dei fumi.

2.1 Caratterizzazione acustica del bruciatore TVC mediante simulazione numerica FEM

Il comportamento acustico di un modulo del bruciatore TVC è stato testato sperimentalmente in una precedente campagna sperimentale [1] attraverso un test modale. Per meglio interpretare i risultati ed avere poi la possibilità di confrontarli con i risultati della campagna sperimentale sul modello reale si è approntata una simulazione numerica.

La simulazione numerica è stata effettuata con il codice di calcolo commerciale COMSOL Multiphysics. La geometria del TVC è stata riprodotta e risolta utilizzando un modello agli elementi finiti, in Figura 2-6a è possibile visualizzare la mesh del modello. Il numero di celle è stato ottimizzato al fine di ottenere un compromesso tra i tempi di calcolo e l'accuratezza della soluzione. Si può notare come è stato posto un volume di fluido esterno al modulo di TVC per consentire alle fluttuazioni di pressione di propagarsi.

Nell'approccio numerico, le equazioni dell'acustica sono risolte direttamente nel dominio della frequenza in un range, di interesse termoacustico, che va da 50 a 2000 Hz. Le risonanze acustiche sono state ricavate imponendo una fluttuazione di pressione pari ad 1Pa sul dominio esterno nella sezione di uscita (Figura 2-6b).

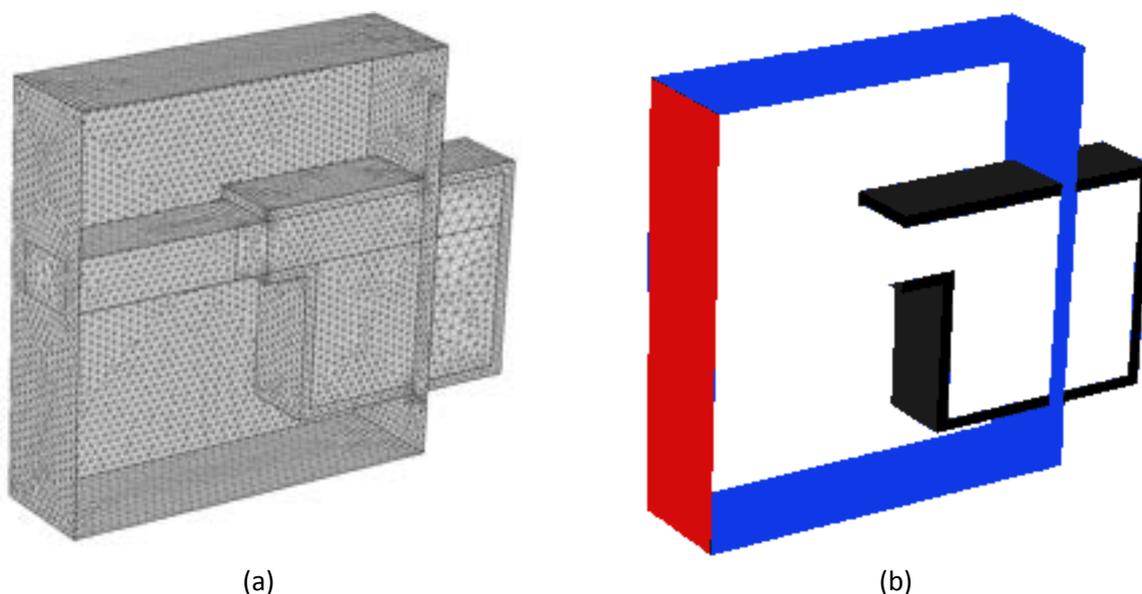


Figura 2-6 (a) Mesh del modello FEM. (b) Sketch delle condizioni al contorno utilizzate: la superficie rossa indica la condizione fluttuazione di pressione incidente, le superfici blu le condizioni di propagazione delle onde ed infine le nere condizioni di parete.

A tutte le facce corrispondenti al dominio esterno è stata imposta la condizione di propagazione libera nello spazio (superfici blu della Figura 2-6b) e le perdite viscose sono state trascurate.

Dal punto di vista teorico, le frequenze dei modi acustici possono essere previste usando l'equazione proposta da Tang e Sirignano [2], riportata qui di seguito:

$$\tan\left(\frac{2\pi f}{c_0}\right)L \tan\left(\frac{2\pi f}{c_0}\right)l = \frac{1}{\Gamma} \quad (2-1)$$

Dove:

- f è la frequenza;
- c_0 è la velocità del suono in condizioni ambiente;
- Γ è l'aspect ratio del TVC, ossia il rapporto D/d tra l'altezza del combustore e l'altezza del collettore di scarico;
- L è la lunghezza del combustore;

- l è la lunghezza del tratto iniziale del collettore di scarico.

L'equazione (2-1) è stata utilizzata da Poinot e Veynante [3] per ricavare il primo modo acustico di un combustore. L'espressione convenzionale valida per risuonatori di Helmholtz può essere ricavata dall'equazione (2-1) considerando $L \ll l$ e $l \ll 1$, ottenendo:

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \left(\frac{\Gamma}{Ll} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2-2}$$

Da cui si può ottenere la seguente legge di scalatura:

$$f \propto \Gamma^{\frac{1}{2}} \tag{2-3}$$

Un confronto tra i risultati sperimentali acquisiti in una precedente campagna sperimentale [1] e le frequenze di risonanza previste dalla relazione (2-2), è riportato in Figura 2-7 dove è possibile apprezzare il buon accordo tra i due andamenti.

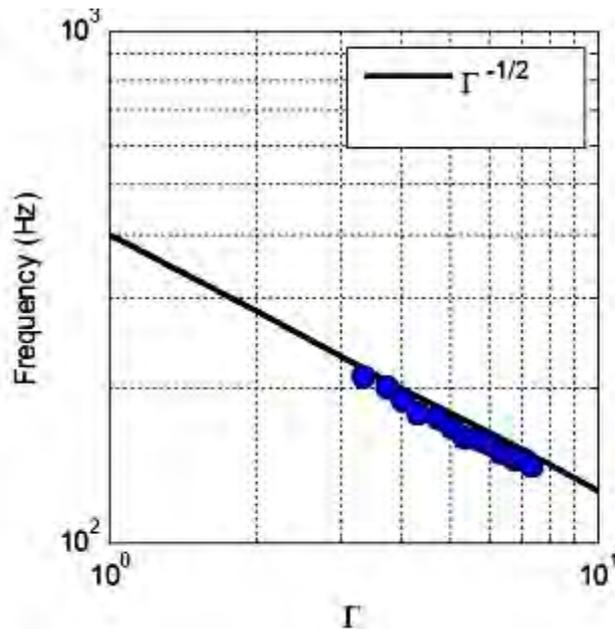
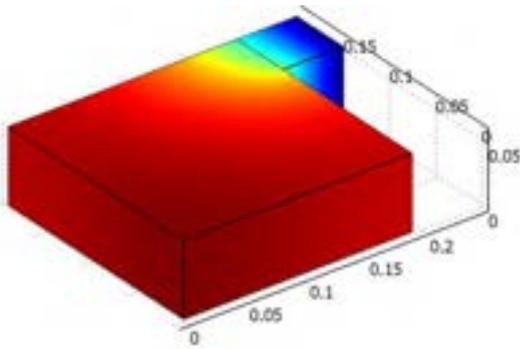


Figura 2-7: Frequenza del primo modo acustico in funzione dell'aspect ratio del TVC.

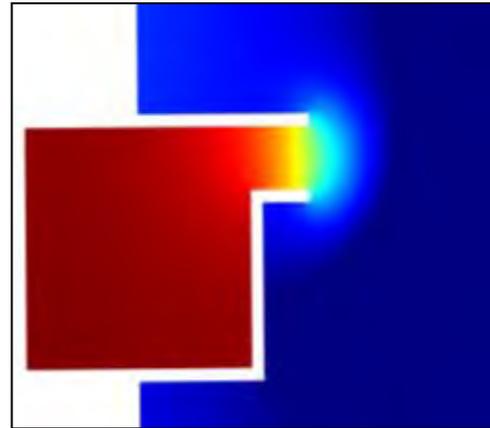
Sebbene la geometria del TVC non è molto simile a quella di un risuonatore di Helmholtz, la legge di scalatura del primo modo acustico è sempre la stessa.

È possibile apprezzare meglio questo risultato considerando i risultati numerici.

La Figura 2-8a mette in evidenza una peculiarità tipica dei risuonatori ossia la propagazione spaziale delle onde nel volume di fluido vicino al collettore di scarico. In Figura 2-8b è messo in evidenza inoltre come il campo acustico del primo modo si propaghi nell'ambiente esterno circostante il collettore.



(a)



(b)

Figura 2-8: (a) Campo di pressione acustico riferito al primo modo. (b) Campo di pressione all'interno del TVC e all'esterno.

Sulla base dei risultati ottenuti è possibile migliorare l'accuratezza dell'equazione (2-2), tenendo in considerazione lo sviluppo del primo modo acustico nel dominio esterno al TVC. La correzione si può ottenere inserendo un cosiddetto "End Correction Term", denominato $2\delta_r(\alpha)$:

$$l' = l + 2\delta_r = l + \alpha \sqrt{\frac{dW}{\pi}} \quad (2-4)$$

La frequenza di risonanza diventa:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\Gamma L l'}} \quad (2-5)$$

In genere, per risonatori di Helmholtz assialsimmetrici, il valore del termine correttivo varia nel seguente intervallo: $0.785 < 2\delta_r(\alpha)/d < 0.848$. Si è verificato tuttavia, che pur variando il fattore $2\delta_r(\alpha)/d$ all'interno di questo intervallo, l'accuratezza della relazione (2-2) non migliora in maniera significativa. Questo è dovuto alla forma del collettore di scarico ed al suo posizionamento nella cavità. Pertanto, sulla base dei risultati sperimentali ottenuti, è stato derivato un nuovo fattore di correzione seguendo la seguente procedura:

- i. una espressione analitica del coefficiente α è stata derivata dal logaritmo dell'equazione (2-5):

$$\log f = -\frac{1}{2} \log \Gamma + \log \frac{c}{2\pi \sqrt{L l'}}, \quad (2-6)$$

- ii. Un valore di α uguale a 2.44 è stato trovato utilizzando un fitting lineare dei dati sperimentali nella rappresentazione in scala bilogarithmica:

$$\alpha = \left[\left(\frac{c}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{L 10^{2q}} - l \right] \sqrt{\frac{\pi}{dW}}, \quad (2-7)$$

$$l' = l + 2.44 \sqrt{\frac{dW}{\pi}}. \quad (2-8)$$

In figura 1 si può apprezzare l'ottimo accordo tra la frequenza calcolata attraverso la relazione analitica corretta (2-8) e le frequenze ottenute attraverso il test modale sperimentale effettuato su un modello di laboratorio.

Il trend lineare e la pendenza unitaria del fit dimostrano l'affidabilità della relazione ottenuta.

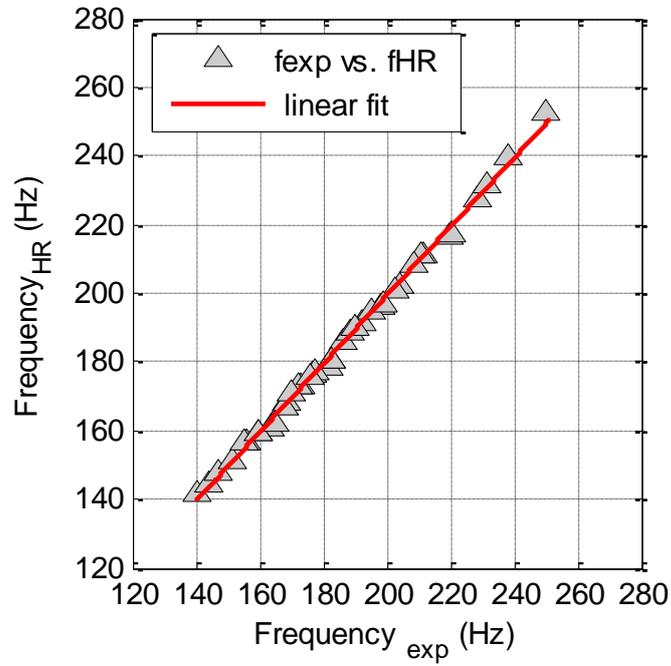


Figura 2-9: Frequenza del primo modo del TVC predetta analiticamente in funzione della stessa frequenza misurata sperimentalmente.

2.2 Caratterizzazione aeroacustica del bruciatore TVC a freddo ed in condizioni reattive

I dettagli riguardanti le misure aeroacustiche sul combustore Trapped Vortex ETVB-Mod1 sono descritte in questa sezione. Gli esperimenti sono stati condotti sia alimentando il combustore solo con aria (a freddo) sia in condizioni reattive. Il combustibile utilizzato è il metano. Le condizioni di prova concordate con il personale ENEA sono riassunte nella sezione 2.2.2. L'allestimento del set-up è stato effettuato dal personale ENEA così come la conduzione dell'impianto durante le prove.

2.2.1 Set-up sperimentale

L'obiettivo del set-up sperimentale approntato sul TVC è quello di acquisire e caratterizzare statisticamente fluttuazioni di pressione e le emissioni di inquinanti in diverse condizioni di funzionamento. Rispetto agli obiettivi prefissati, si è potuto anche approntare un sistema ODC in parallelo con le misure di pressione (Optical Diagnostics of Combustion). Le capacità e le caratteristiche principali del sistema ODC verranno brevemente descritte nel seguito.

Per l'acquisizione delle pressioni si sono utilizzati dei trasduttori di pressione KULITE XTEH-10L-190 (M) SERIES (Figura 2-10a) e dei microfoni MICROTECH GEFELL M360 (Figura 2-10b).

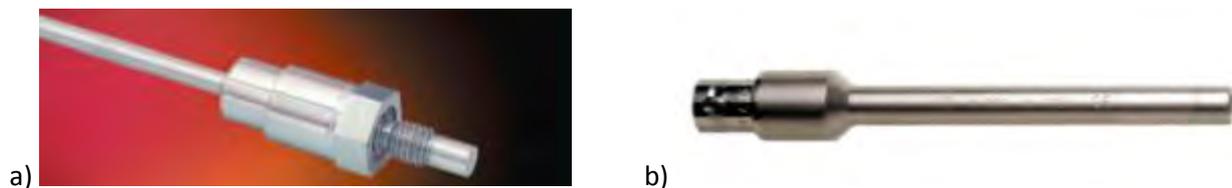


Figura 2-10: Trasduttore Kulite (a) e Microfono Microtech (b).

Il trasduttore KULITE è stato utilizzato per la misura delle fluttuazioni di pressione a parete viste le alte temperature ed il massimo valore raggiungibile dalle pressioni. Tale trasduttore ha infatti una sensibilità di $4.89 \cdot 10^{-2} \text{ mV/Pa}$, compatibile con le pressioni in gioco, ed un range operativo per la temperatura che va da $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ a $538 \text{ }^\circ\text{C}$. La frequenza di taglio dello strumento è pari a 20 kHz .

Il microfono MICROTECH è caratterizzato da una grande sensibilità, dell'ordine di 12.5 mV/Pa , ed una risposta in frequenza piatta fino a 20 kHz certificata. Il massimo Sound Pressure Level (SPL) acquisibile è di 130 dB . Dove per SPL si intende:

$$SPL = 10 \log \frac{(p_s^2)_{av}}{p_{ref}^2} \quad (2-9)$$

Dove $(p_s^2)_{av}$ e $p_{ref}=10^{-5} \text{ Pa}$ sono rispettivamente il quadrato del valore efficace (rms) medio della pressione e la pressione di riferimento.

Il range operativo di temperature va da $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

I microfoni sono stati calibrati utilizzando il calibratore Delta Ohm HD9101 ed il segnale amplificato dal modulo ICP® Conditioning modules M28.

Per le acquisizioni si è utilizzata una scheda della National Instruments modello PCI 6115 che ha a disposizione 4 input analogici a 12 bit a velocità elevata pari a 10 MSample/s per canale.

La frequenza di campionamento è stata impostata a 500 kHz e si sono acquisiti segnali per 30 s . Per sfruttare tutto il range dinamico della scheda, a seconda del test case i valori minimo e massimo di tensione acquisibile sono stati variati tra $\pm 0.2 \text{ V}$ e $\pm 0.5 \text{ V}$. In ogni caso, il tipo di accoppiamento scelto sulla scheda è stato di tipo AC.

Il sofisticato programma di controllo e acquisizione realizzato e compilato in LabVIEW è stato elaborato e testato dal personale ENEA. L'università ha contribuito suggerendo alcune modifiche per consentire le

acquisizioni ed elaborazioni dei segnali di interesse per l'analisi di tipo aeroacustico. I file sono stati salvati in formato binario con estensione .tdms che consente un'ottima compressione dei file.

Per le prove volte alla caratterizzazione della pressione, sono stati utilizzati 1 trasduttore di pressione e 3 microfoni.

Il trasduttore è stato inserito in un sistema tubo – collegamento a T – guida d'onda collegato alla parete della camera di combustione (Figura 2-11). Questo sistema di collegamento si è reso necessario per allontanare il trasduttore di pressione dalla fonte di calore. La sua presenza ha degli inconvenienti. I cambiamenti di sezione, gli snodi, le T e la guida d'onda possono introdurre delle armoniche acustiche. Nella sottosezione seguente verrà presentata la verifica della risposta dinamica di questo sistema di trasmissione delle fluttuazioni di pressione e le soluzioni migliorative proposte.

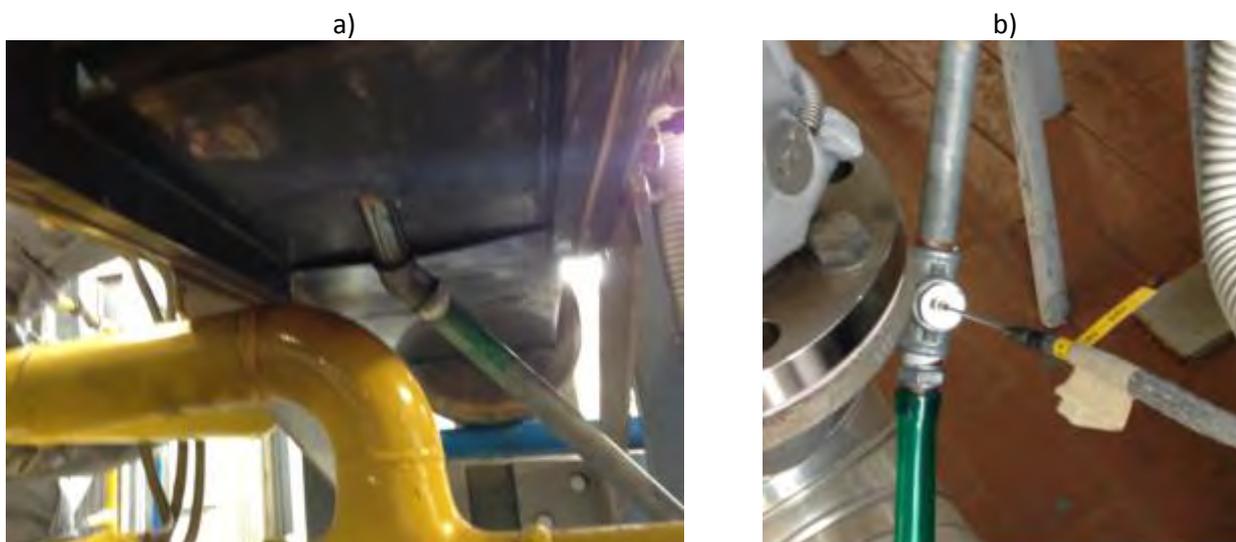


Figura 2-11: (a) Tubo saldato al di sotto del TVC. È visibile un raccordo a 135°. (b) Tubo – collegamento a T – guida d'onda e trasduttore Kulite.

I tre microfoni sono stati posizionati all'esterno per verificare la presenza di fenomeni acustici ed eventuali effetti di direzionalità (Figura 2-12). La distanza è stata scelta raggiungendo un compromesso tra l'affidabilità delle misure e la minimizzazione del rischio di danneggiamento dovuto alla temperatura.



Figura 2-12: Posizionamento dei microfoni all'esterno del TVC.

Per le emissioni di inquinanti si è utilizzato il sistema portatile Testo 350 posizionando la sonda nel tubo di scarico. Il sistema ha rilevato le concentrazioni di O₂, CO, CO₂, NO e NO_x. Le misure di inquinanti sono state gestite dal personale ENEA.

Per le misure di velocità si è utilizzata la tecnica ODC. Tale metodologia diagnostica è stata sviluppata in ENEA [4,5] ed è basata sull'analisi delle emissioni ottiche da flussi reagenti. Essa permette di individuare, nel loro stato di incipienza, anomalie funzionali sia di tipo fluidodinamico che termoacustico, in quanto riesce ad osservare nel segnale acquisito, 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 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 Turbogas.

Lo strumento ODC, e le metodologie in esso implementate, permettono di monitorare, analizzare e diagnosticare in tempo reale lo stato di instabilità fluidodinamica e termoacustica di un processo di combustione, cosa necessaria per realizzare un efficiente sistema di controllo che permette di risolvere le interattività, anche temporali, tra le due fenomenologie.

Misure sperimentali precedentemente effettuate hanno mostrato che l'ODC fornisce le stesse informazioni in frequenza ottenute con la tecnica LDA (*Laser Doppler Anemometry*) (Figura 2-13) [6], e che il segnale di luminosità può quindi essere usato nella diagnostica delle instabilità di combustione [7].

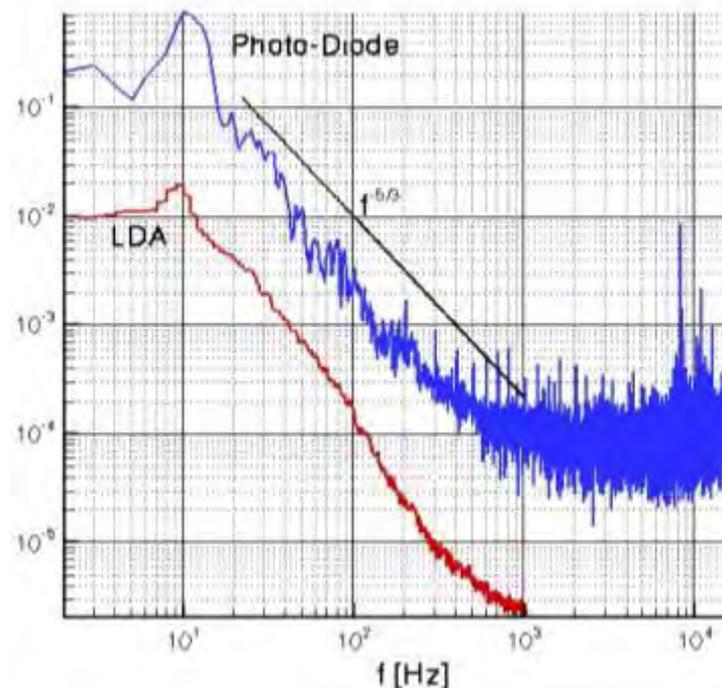


Figura 2-13: Confronto LDA e ODC: spettro di energia cinetica (LDA) e spettro di energia radiante (ODC, Photo-Diode).

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 (>100 kHz, il cui valore dipende dal tipo di scheda di acquisizione e dalla quantità di dati che si è in grado di stoccare o trattare) 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 (Figura 2-14) 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.



Figura 2-14: Testa ottica con fibra di zaffiro ($\Phi = 2 \text{ mm}$) in un tubo protettivo di allumina ($\Phi \approx 5 \text{ mm}$).

Il processo viene osservato attraverso le emissioni ottiche prodotte dalle fenomenologie implicate. Questa caratteristica è di notevole importanza in quanto le fluttuazioni ottiche, non interagendo tra di loro, garantiscono l'integrità della 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 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 e l'elettronica di amplificazione 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 la realizzazione di teste ottiche con funzioni specifiche:

- l'uso di fibra multimodale è preferita per ottenere una osservazione estesa (non collimata) in modo da avere la maggior informazione possibile.
- Il tipo di fibra (quarzo, zaffiro, ecc) definisce il livello di immunità alle alte temperature del sistema di osservazione. Normalmente le fibre hanno un "cladding" esterno che è una superficie drogata (dello stesso materiale) avente indice di rifrazione diverso dal loro "core" che è in grado di intrappolare al suo interno il segnale luminoso. La temperatura di fusione del quarzo è di 1500°C , ma la fibra ottica è ricoperta da un "buffer" esterno che ha la funzione di proteggerla da agenti esterni ed irrobustirla meccanicamente. Tale copertura abbassa la temperatura di funzionalità della fibra al quarzo ad una temperatura di circa 200°C oltre la quale si ha la sua fusione. Le fibre di zaffiro hanno invece il notevole vantaggio di avere una temperatura di fusione di 2040°C , di non aver bisogno né di un "cladding" per intrappolare il segnale luminoso al suo interno, né di "buffer" esterno.
- La fibra ottica permette di contenere l'intrusività (accesso ottico dell'ordine di grandezza del diametro della fibra usata, ad esempio 5 mm).
- In termini di risposta in frequenza il sensore ottico attualmente in uso ha una banda di risposta da $0 \div 25 \text{ MHz}$ (ma l'elettronica di amplificazione in cui è montato ha una banda $\text{DC} \div 100 \text{ kHz}$) ed una sensibilità alla radiazione ottica che si estende ad una lunghezza d'onda $200 \div 1000 \text{ nm}$ (ossia da UV a IR).

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 $\sim 600 \text{ nm}$.

Il segnale trasdotto viene campionato ad alta frequenza (1-5 MHz) in modo da non perdere la risoluzione di banda del sensore. 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 vorticose 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.

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 [9].

La catena di misura utilizzata dalla tecnica ODC sul TVC comprende (Figura 2-15):

- 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 filtri rimovibili**. Esso permette l’alloggiamento di filtri e il collegamento con le fibre ottiche. La lente collimatrice al suo interno permette di guadagnare in accuratezza del segnale ottico evitando gli effetti di bordo delle ottiche. I **filtri ottici grigi** (neutri) e dei **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 $f=100$ kHz and $\lambda=800$ nm) = 0.02 pW/Hz^{1/2}

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

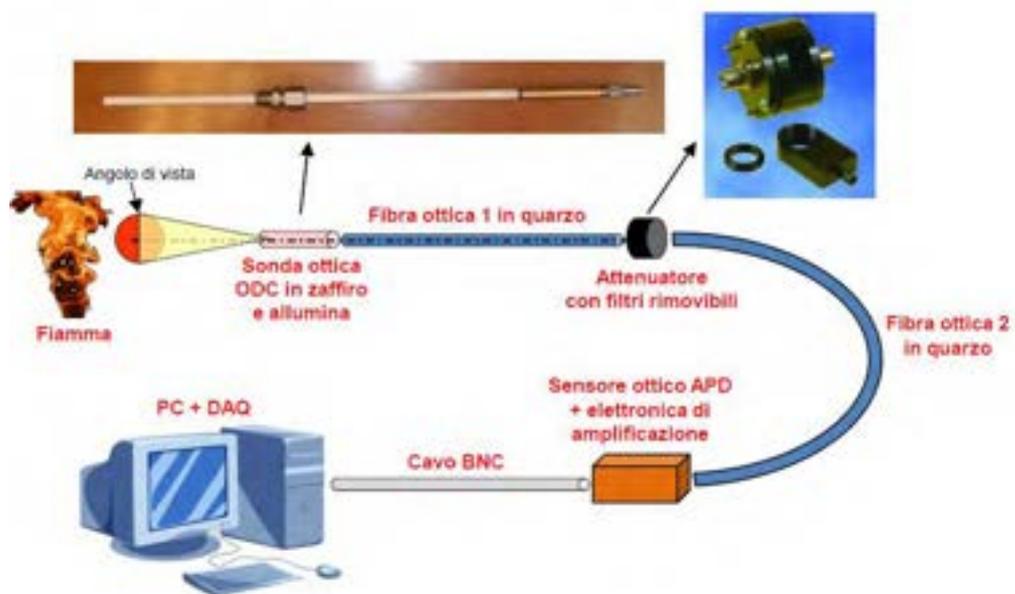


Figura 2-15: Schema della catena di misura per la tecnica ODC.

Verifica acustica Set-up esistente

La misura di fluttuazioni di pressione gioca un ruolo fondamentale nella verifica e controllo delle instabilità termoacustiche in un combustore. Di qui la necessità di avere un sistema affidabile che possa operare in condizioni avverse. Per ottenere questo risultato è ormai una pratica assodata quella di utilizzare un approccio che utilizzi una guida d'onda acustica ed una linea di trasmissione che sposti la posizione del trasduttore in una zona sicura [10].



Figura 2-16: Sketch di un set-up con guida d'onda.

In un set-up con guide d'onda (Figura 2-16), un tubo opportunamente dimensionato viene collegato al punto di misura della pressione. Il sensore è montato perpendicolarmente all'asse del tubo ad una certa distanza dalla fonte di calore. La distanza tra il punto di misura della pressione e la posizione del sensore ha un forte impatto sulla risposta del sistema e deve essere minimizzata in funzione della massima temperatura raggiungibile dal sensore. Nel caso in cui il sensore sia montato utilizzando una piccola diramazione (montaggio a T), la risultante cavità potrebbe innescare dei fenomeni di risonanza e quindi interferire con la misura delle fluttuazioni di pressione. Non appena l'onda di pressione raggiunge l'estremità del tubo, gli effetti di dissipazione termo-viscosi lungo l'estensione del tubo garantiscono che le fluttuazioni di pressione siano attenuate e le riflessioni minimizzate. È importante in questo dimensionamento cercare di non attenuare troppo il segnale ma soprattutto di non introdurre armoniche aggiuntive.

È quindi necessario verificare la risposta dinamica del sistema di trasmissione comprensivo di guida d'onda previsto e realizzato in fase progettuale del TVC.

Una serie di modelli teorici sono stati proposti negli anni per capire le caratteristiche di un sistema di trasmissione complesso della pressione alcuni di questi sono riportati in bibliografia [11,12,13]. Solo recentemente alcuni modelli avanzati hanno incluso dei termini dissipativi viscosi ed hanno preso in considerazione l'effetto della temperatura [14,15].

Di questi si è scelto di utilizzare il modello di Antonini et al. [15] che è allo stesso tempo facile da configurare, flessibile ed in grado di riprodurre la reale fisica del problema. Inoltre il modello è in grado di affrontare sistemi di trasmissione della pressione comunque complessi, comprensivi di molteplici linee e cavità.

Il modello consiste nel ricostruire un sistema di collegamenti complesso a partire da una configurazione semplice costituita da due cavità collegate da un unico tubo. L'obiettivo è quello di ricavare una matrice di influenza globale con la quale risolvere un sistema algebrico le cui incognite sono le pressioni in determinati punti della rete di trasmissione tra cui il punto in cui viene posizionato il sensore di misura. Per i dettagli si rimanda all'articolo in bibliografia.

La costruzione del modello analitico, sviluppato dall'Università, è stata testata, con esiti positivi, sugli stessi casi benchmark riportati sull'articolo di provenienza. Successivamente è stata applicata al caso reale.

La configurazione montata sul TVC da verificare analiticamente è riportata in Figura 2-17. Nel disegno non è riportato il tubo necessario per l'attenuazione delle fluttuazioni, da collegare all'estremità della connessione a T. Il tubo mancante è lungo 15 m ed ha lo stesso diametro interno del condotto di figura. Il foro praticato sulla parete del TVC è inclinato di 45° ed ha un diametro di 4 mm. La parete ha lo spessore di 10 mm.

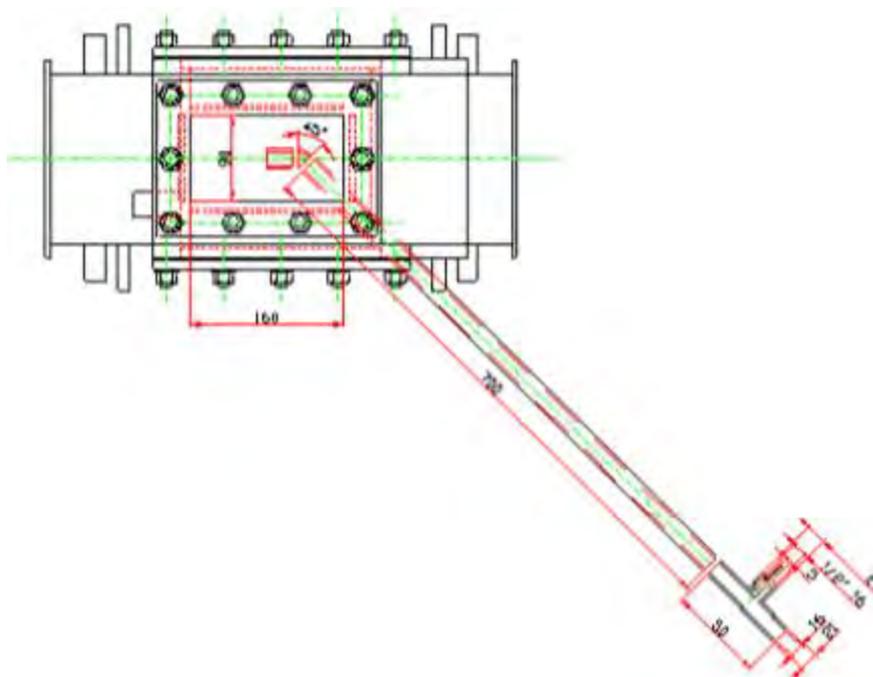


Figura 2-17: Disegno quotato della guida d'onda montata sul TVC.

Tale configurazione è stata verificata anche sperimentalmente nei laboratori dell'università. I risultati in termini di rapporto tra la pressione reale (P_0) e quella misurata (P_1) del modello analitico e della campagna sperimentale sono mostrati in Figura 2-18.

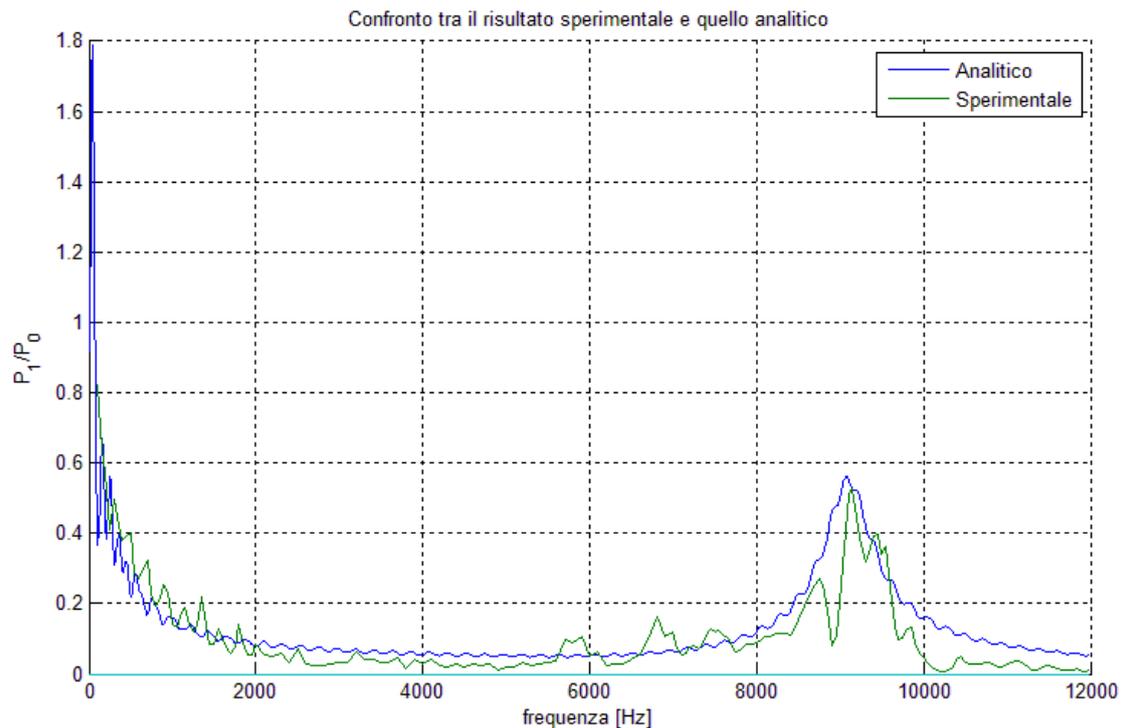


Figura 2-18: Risposta dinamica della guida d'onda ottenuta analiticamente e sperimentalmente.

La figura mostra l'ottimo accordo tra il modello predittivo e la verifica sperimentale.

Partendo da questa configurazione ed avendo a disposizione un affidabile modello predittivo si è cercato di migliorare il sistema di trasmissione della pressione. Il progetto e la verifica sono descritti nel successivo paragrafo.

Progetto e verifica acustica sistema acquisizione delle pressioni aggiornato

Per migliorare la risposta dinamica del sistema di trasmissione esistente sono state ottimizzate le dimensioni della guida d'onda in modo tale da ridurre le oscillazioni acustiche ed ottenere una minore attenuazione del segnale. È stato effettuato uno studio parametrico ottenendo le dimensioni di Figura 2-19. Introducendo i parametri geometrici nel modello predittivo a parità di condizioni operative si è ottenuta la risposta dinamica di Figura 2-20. Seguendo le indicazioni di questa analisi, si è quindi proceduto alla progettazione e realizzazione di un nuovo sistema a guida d'onda, da utilizzarsi per future sperimentazioni.



Figura 2-19: Sketch dimensionato della nuova guida d'onda. Il tubo lungo non è stato riportato.

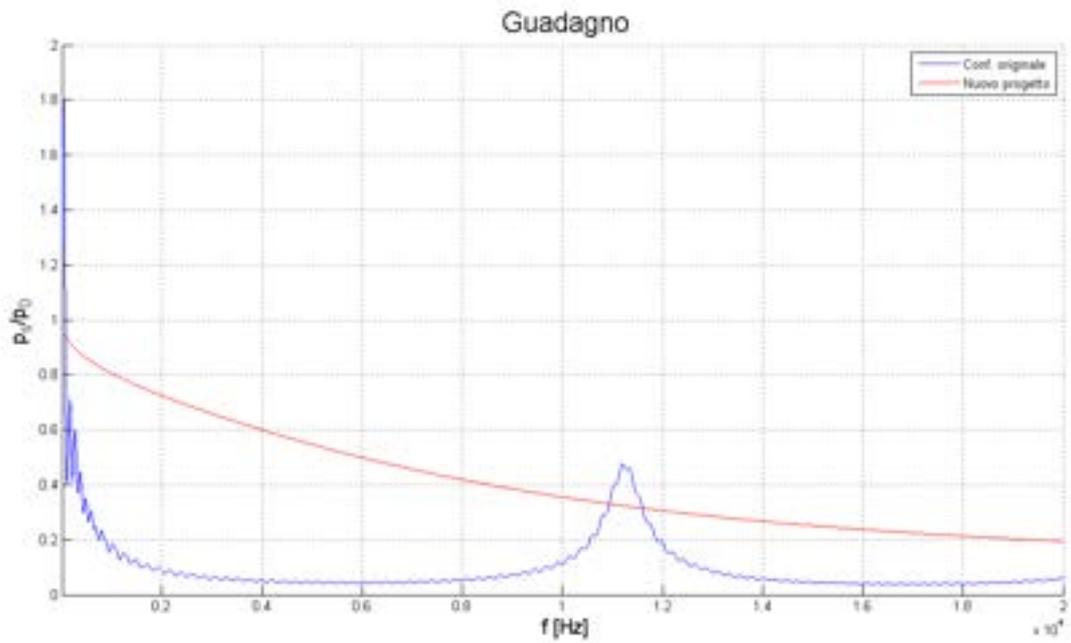


Figura 2-20: Confronto risposta dinamica tra il sistema originariamente montato sul TVC e quello ottimizzato.

2.2.2 Matrice delle prove

Le condizioni di prova analizzate nel presente studio sono state stabilite in accordo con il personale ENEA che ha gestito l'impianto e condotto le prove in collaborazione con l'Università. Di seguito sono riportate in ordine cronologico il totale delle prove effettuate a freddo con e senza preriscaldamento (Tabella 2-2) e delle prove in condizioni reattive con e senza preriscaldamento (Tabella 2-3).

Nelle prove a caldo il combustibile è stato introdotto soltanto dai condotti centrali di entrambe le pareti per un totale di 6 ugelli attivi (vedere Figura 2-1).

In base alle prove che è stato possibile condurre, si è effettuata un'analisi parametrica in funzione di:

- Aria primaria
- Aria secondaria
- Distribuzione di portata aria primaria/secondaria a parità di portata totale
- Rapporto di equivalenza
- Temperatura dell'aria di preriscaldamento (sia a freddo che in condizioni reattive)

I risultati sono riportati nelle sezioni seguenti estraendo dalle matrici delle prove totali delle sub-matrici che evidenzino l'eventuale effetto dei parametri summenzionati.

Prove a freddo

Tabella 2-2: Totale delle prove effettuate a freddo con e senza preriscaldamento dell'aria.

CIRCUITO ARIA PRIMARIA			ARIA SECONDARIA	
Portata Low [Nm ³ /h]	Portata High [Nm ³ /h]	Temp. [°C]	Portata [Nm ³ /h]	Temp. [°C]
24	0	20	68	20
24	29	20	60.4	20
23.9	22.3	20	90.3	20
23.2	28.7	20	94.3	20
20	116	20	155	20
0	35	20	60	20
0	0	20	106	20
0	0	20	155	20
0	0	20	0	20
24.4	0	20	70	20
23.5	30	20	92.7	20
20	116	20	154	20
21.3	0	200	71	200
0	45	20	63	20
23.7	30.9	200	92	200
0	72	200	101	200
0	85	300	120	300
19.6	113.5	260	137	260
0	47	300	62	300
0	46.4	200	63	200
0	136	20	0	20

Prove a Caldo

Tabella 2-3: Totale delle prove effettuate in condizioni reattive con e senza preriscaldamento dell'aria.

CIRCUITO ARIA PRIMARIA			ARIA SECONDARIA		GAS NATURALE		
Portata Low [Nm ³ /h]	Portata High [Nm ³ /h]	Temp. [°C]	Portata [Nm ³ /h]	Temp. [°C]	Portata [Nm ³ /h]	α	ϕ
24	0	20	68	20	14	0.152	1.444
23.2	30.2	20	60.4	20	15	0.132	1.250
23.2	20.3	20	94	20	15	0.109	1.035
23.4	23.9	20	90	20	18.8	0.137	1.299
23.3	30	20	96.6	20	15	0.100	0.949
18.6	0	20	68.6	20	13.6	0.156	1.485
0	45	20	63	20	6.6	0.061	0.582
0	48	350	67	350	8	0.070	0.662
18.6	0	20	51.5	20	15	0.214	2.037
23.5	0	20	51.3	20	15	0.201	1.909
8.8	22	20	46.8	20	15	0.193	1.840
7.8	40.7	20	51	20	15	0.151	1.435
7.4	64	20	51	20	15	0.123	1.167
7.3	66.5	20	70	20	15	0.104	0.993
7.2	65	240	72	260	15	0.104	0.990
7.4	64	240	51	260	15	0.123	1.167
7.8	40.7	268	51	262	15	0.151	1.435
8.6	23.5	261	46	260	15	0.192	1.828

Dove α è il rapporto tra portata volumetrica (q) di combustibile e portata di aria. Mentre ϕ è il rapporto di equivalenza definito da:

$$\phi = \frac{\alpha}{\alpha_{st}} = \frac{(q_{gas}/q_{aria,tot})}{(q_{gas}/q_{aria})_{st}} \quad (2-10)$$

2.2.3 Risultati prove a freddo

Nelle sottosezioni successive sono riportati i risultati delle campagne di misura effettuate sul TVC in condizioni non reattive. I risultati sono stati suddivisi in funzione del parametro di cui si vuole evidenziare l'effetto. Nelle sub-matrici sono evidenziati in rosso le condizioni di prova di cui si presentano i risultati. Le condizioni non riportate presentano risultati analoghi.

Effetto variazione aria primaria

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-7. Non si riscontrano particolari effetti dovuti all'aumento di portata d'aria primaria, soltanto un lieve aumento del contenuto energetico del segnale rilevato dal trasduttore (Figura 2-25). Il picco a 2 kHz è dovuto alla soffiante (un ventilatore centrifugo Mez, tipo APE 631 ES 4, RD270, 3 kW, numero di giri 2900, $f=50$ Hz) utilizzata per far funzionare il circuito dell'aria primaria.

Tabella 2-4: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione della portata di aria primaria in condizioni non reattive.

$T_{\text{aria}} [^{\circ}\text{C}]$	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]	Portata aria primaria [Nm ³ /h]
20	61	35
		45
	90	53
		46
		54

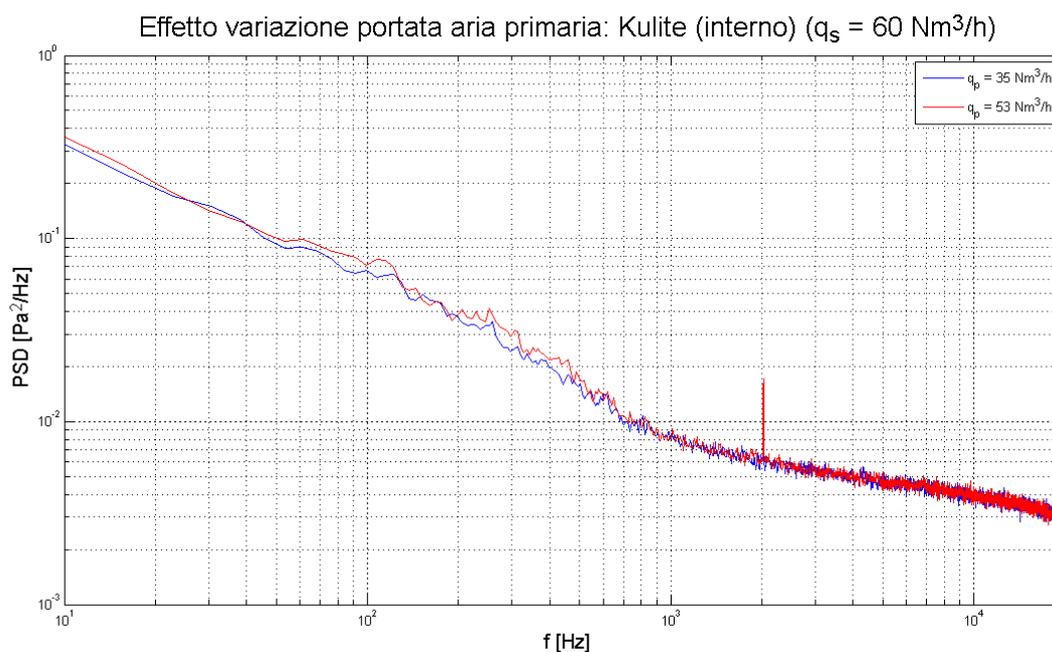


Figura 2-21: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare della portata di aria primaria fissata l'aria secondaria.

Effetto variazione aria secondaria

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-5. L'aumento della portata di aria secondaria non comporta eccessive variazioni del rumore percepito dai microfoni (Figura 2-22).

Tabella 2-5: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione della portata di aria secondaria in condizioni non reattive.

T_{aria} [°C]	Portata aria primaria [Nm ³ /h]	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]
20	45	60.4
		92.7
	53	63
		90.3

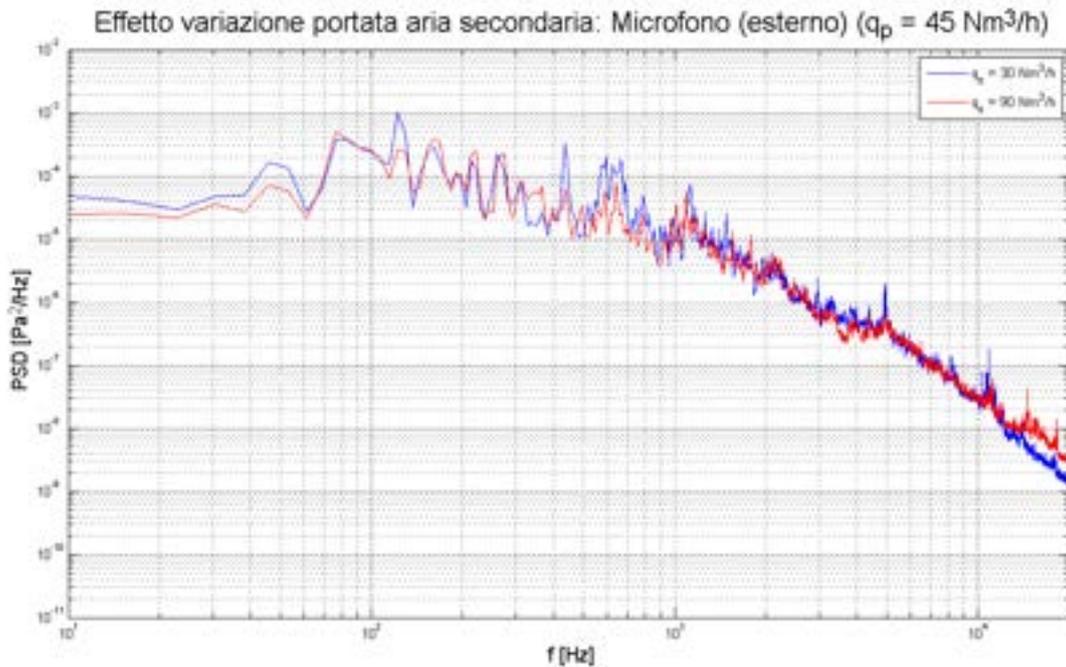


Figura 2-22: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della portata di aria secondaria fissata l'aria primaria.

Effetto variazione distribuzione aria primaria/secondaria a parità di aria totale

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-6. La variazione di distribuzione tra aria primaria e secondaria a parità di flusso totale nelle condizioni di prova riportate in tabella comporta un cambiamento delle condizioni dinamiche all'interno della cavità. Sono infatti visibili una serie di picchi di fluttuazioni di pressioni alla parete presso il condotto di scarico nell'intorno di 1 kHz (Figura 2-223) non riscontrabili quando la quantità di aria secondaria viene diminuita e la portata di aria primaria aumentata. Il risultato di Figura 2-24 dimostra che tali picchi di pressione non si propagano all'esterno e quindi sono, presumibilmente, di natura idrodinamica. Il rumore acustico aumenta per portate di aria secondaria maggiori a bassa frequenza (80 Hz) e alle alte frequenze (oltre i 5 kHz).

Tabella 2-6: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione della portata di aria totale in condizioni non reattive.

T_{aria} [°C]	Portata aria totale [Nm ³ /h]	Aria prim. [%]	Aria sec. [%]
20	93	26	74
		37	63
	109	0	100
		42	58
		47	53

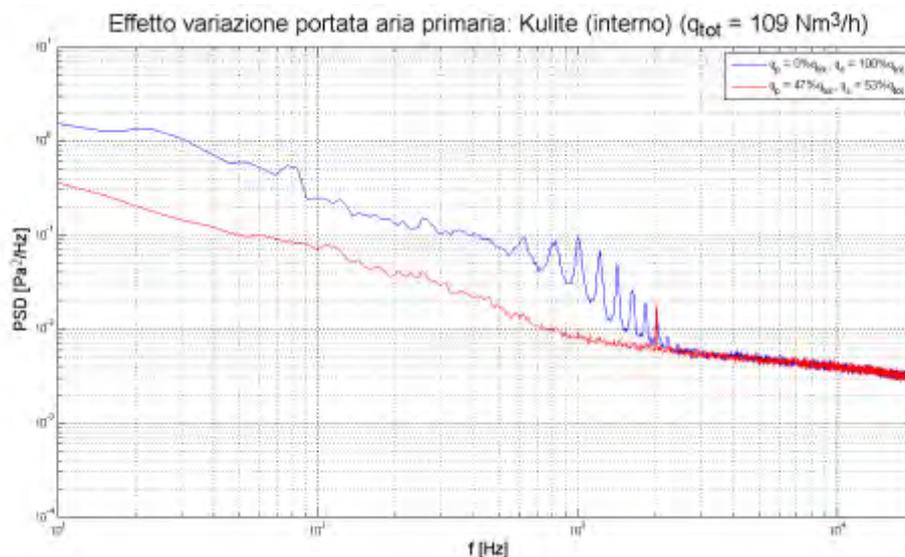


Figura 2-23: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare del rapporto percentuale aria primaria/secondaria fissata la portata di aria totale.

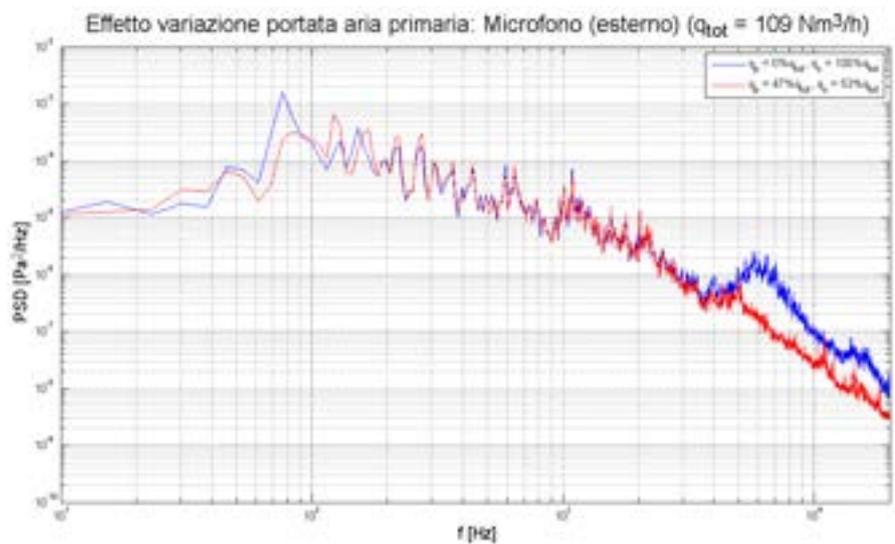


Figura 2-24: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare del rapporto percentuale aria primaria/secondaria fissata la portata di aria totale.

Effetto variazione temperatura di preriscaldamento dell'aria

Questa analisi parametrica è stata condotta solo con microfoni. Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-7. Non si riscontrano particolari effetti dovuti al preriscaldamento dell'aria (Figura 2-25 e Figura 2-26).

Tabella 2-7: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione della temperatura dell'aria in condizioni non reattive.

Portata aria primaria [Nm ³ /h]	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]	T _{aria} [°C]
45	63	20
		200
		300
21	70	20
		200
54	93	20
		200
136	140	20
		300

Effetto temperatura aria primaria/secondaria: Microfono (interno) ($q_p = 21 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $q_s = 70 \text{ Nm}^3/\text{h}$)

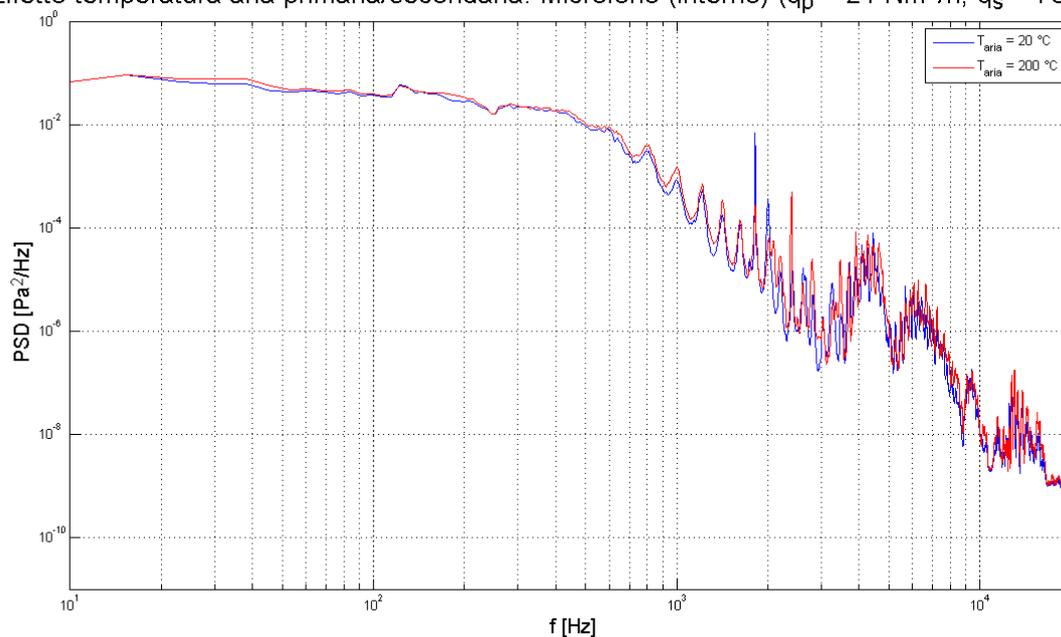


Figura 2-25: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono posizionato al posto del trasduttore al variare della temperatura di preriscaldamento dell'aria totale.

Effetto temperatura aria primaria/secondaria: Microfono (esterno) ($q_p = 21 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $q_S = 70 \text{ Nm}^3/\text{h}$)

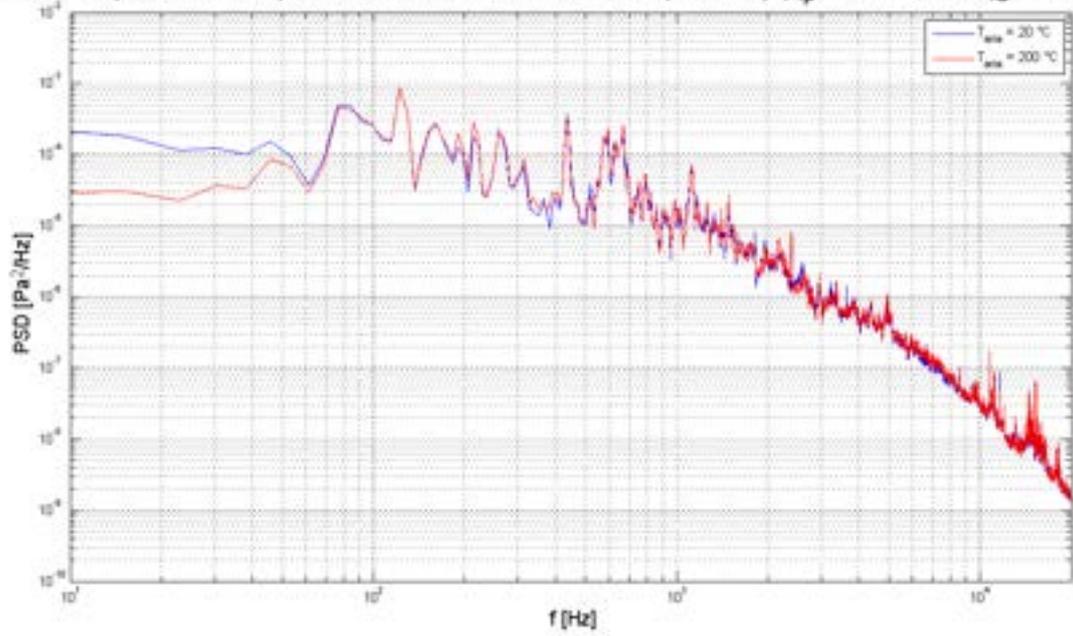


Figura 2-26: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della temperatura di preriscaldamento dell'aria totale.

2.2.4 Risultati prove a caldo

Nelle sottosezioni successive sono riportati i risultati delle campagne di misura effettuate sul TVC in condizioni reattive. I risultati sono stati suddivisi in funzione del parametro di cui si vuole evidenziare l'effetto. Nelle sub-matrici sono evidenziati in rosso le condizioni di prova di cui si presentano i risultati. Le condizioni non riportate presentano risultati analoghi o poco significativi.

Effetto variazione rapporto di equivalenza totale

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-8. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. Aumentando il rapporto di equivalenza ϕ si ha un arricchimento della quantità di combustibile nella miscelazione che comporta una riduzione del rumore percepibile all'esterno (Figura 2-27). Dalla figura è visibile un picco predominante intorno ai 140 Hz compatibile con il range di previsione calcolato alla fine del paragrafo 2.1.

La temperatura dei fumi di scarico raggiunge sorprendentemente un minimo per $\phi=1$ (Figura 2-28). Sia per miscele povere che per miscele ricche tende ad aumentare. Per miscele ricche l'aumento è più modesto fino a mantenersi pressoché costante.

Lo stesso andamento si ottiene per le emissioni di CO_2 (Figura 2-29) e di NO e NO_x (Figura 2-30).

Un andamento inverso si ottiene per la concentrazione di O_2 (Figura 2-29) e l'emissione di CO (Figura 2-30). E' importante notare che gli andamenti osservati sono funzione della qualità di combustione in atto dalla quale dipende non solo il colore della fiamma e quindi la temperatura locale e l'irraggiamento emesso da essa, ma anche la sua relativa posizione nel bruciatore. In alcuni casi, l'area dove la combustione era in atto dal bruciatore stesso avvicinandosi significativamente alla sonda dei gas di scarico e rendendo incandescenti le pareti della canna fumaria. Ulteriori analisi saranno necessarie nel futuro per ottenere una migliore comprensione dei fenomeni in gioco.

Tabella 2-8: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione del rapporto di equivalenza in condizioni reattive.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	T _{aria} [°C]	Rapporto d'equivalenza ϕ
15	20	0.95
		0.99
		1.03
		1.17
		1.25
		1.43
		1.84
		1.91
		2.04
		15
1.17		
260	1.43	
	1.82	

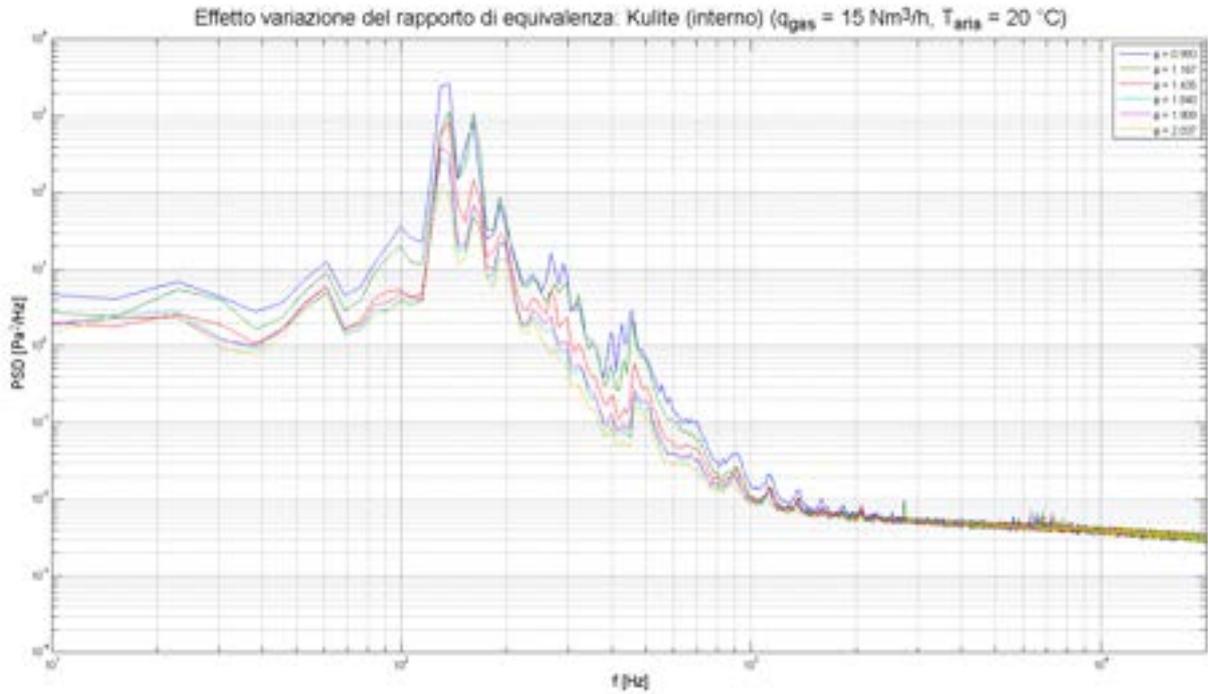


Figura 2-27: PSD delle fluttuazioni di pressione a parete al variare del rapporto di equivalenza calcolato sull'aria totale.

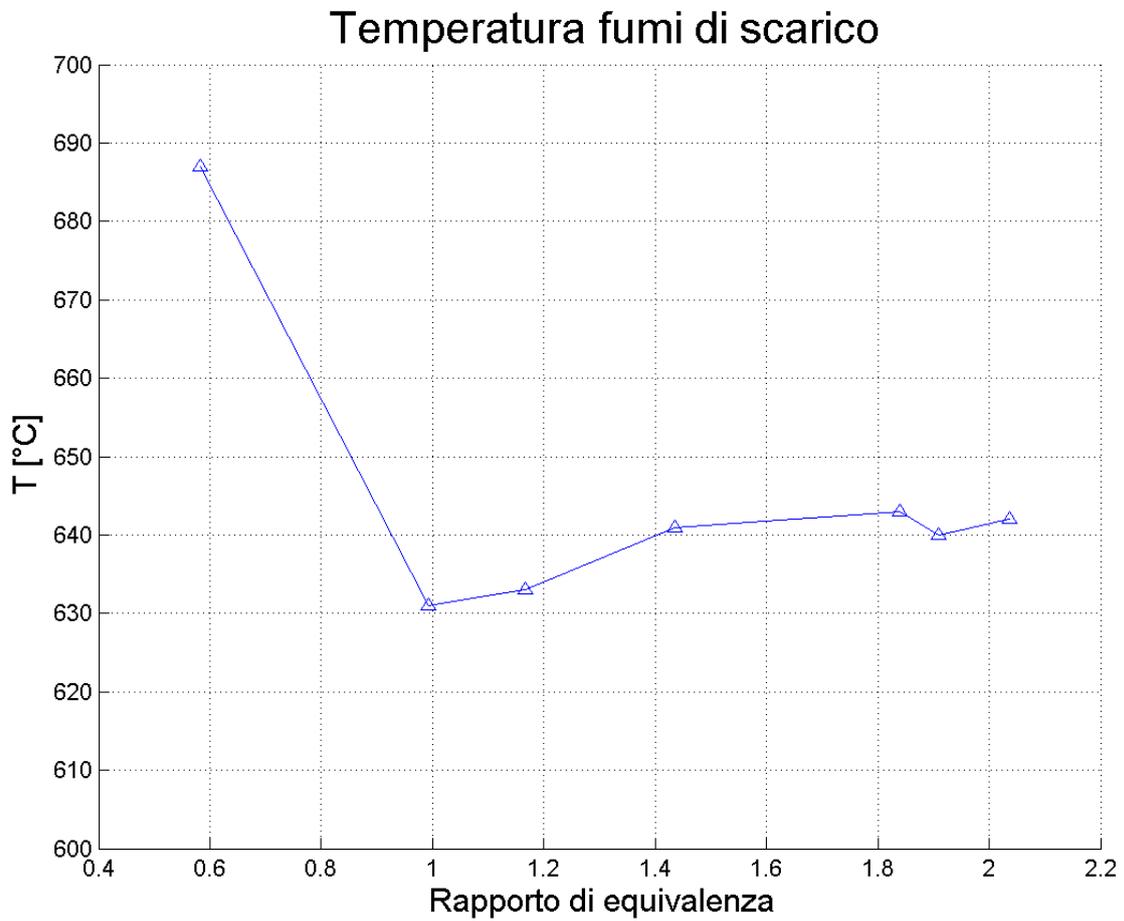


Figura 2-28: Andamento della temperatura dei fumi di scarico in funzione del rapporto di equivalenza.

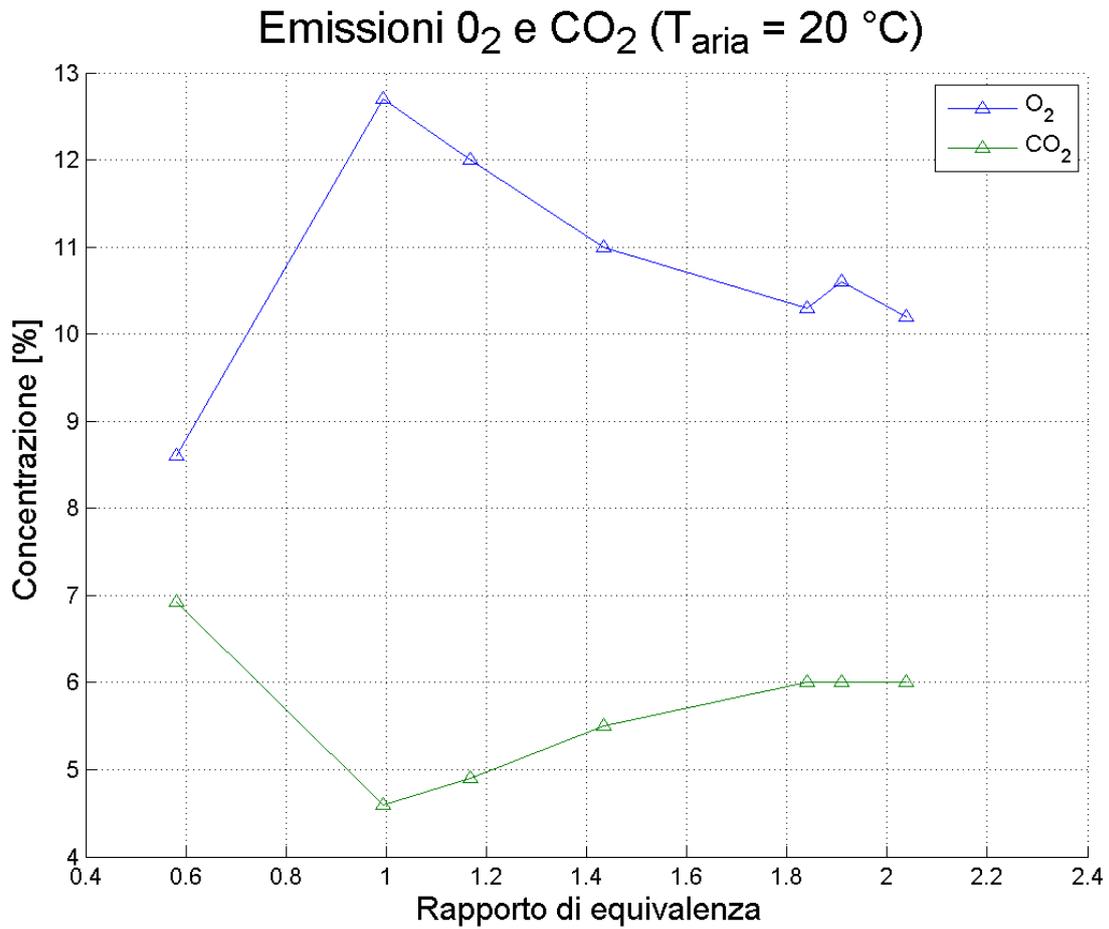


Figura 2-29: Variazione delle concentrazioni percentuali di O₂ e CO₂ in funzione del rapporto di equivalenza.

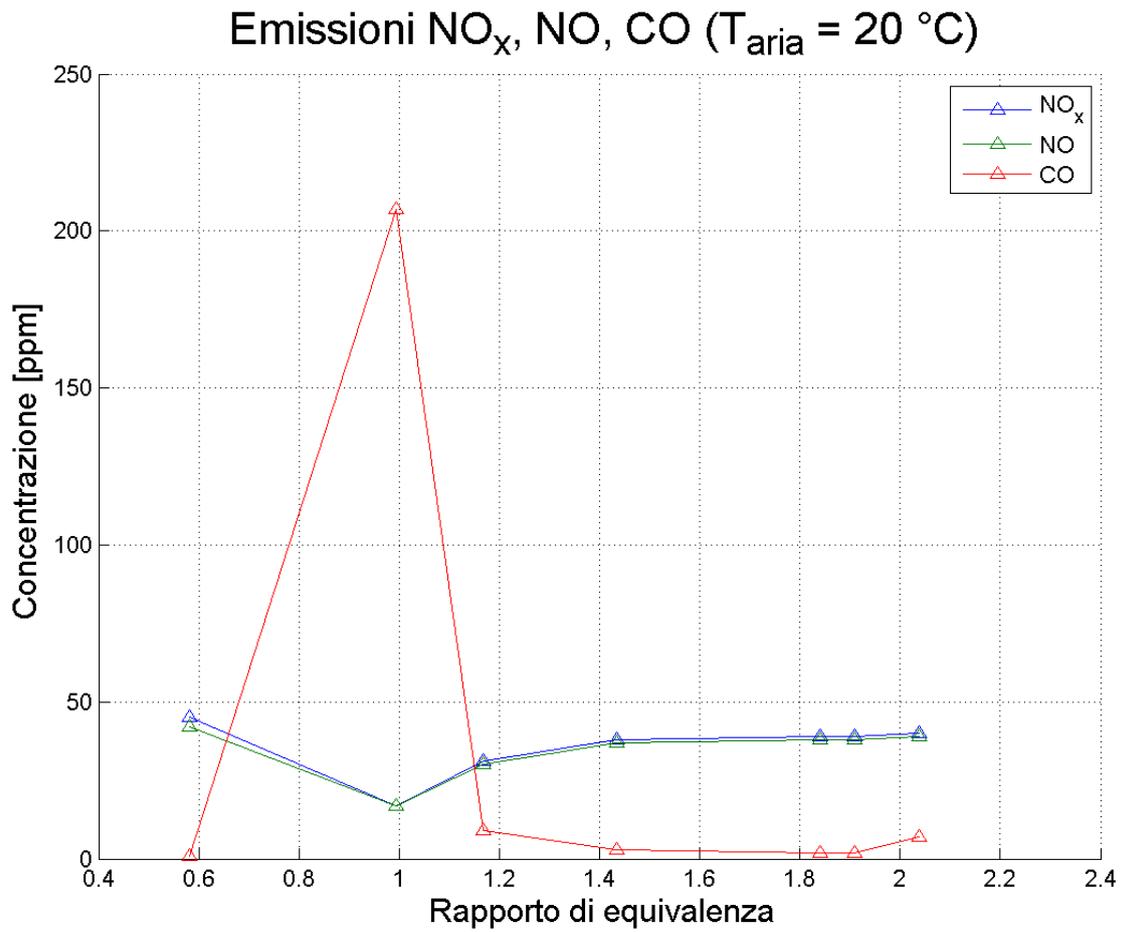


Figura 2-30: Variazione delle concentrazioni in ppm di NO_x, NO e CO in funzione del rapporto di equivalenza.

Effetto variazione aria primaria

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-9. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. Un aumento della quantità d'aria primaria a parità di aria secondaria riduce il rapporto di equivalenza ϕ causando un aumento dell'intensità delle fluttuazioni di pressione come è possibile verificare sia per acquisizioni effettuate con il trasduttore di pressione a parete che con il microfono esterno (Figura 2-31 - Figura 2-34).

Tabella 2-9: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione della portata di aria primaria in condizioni reattive.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]	Portata aria primaria [Nm ³ /h]	Rapporto d'equivalenza ϕ	
			Prim.	Sec.
15	51	18.6	7.68	2.80
		24	5.95	
		48.5	2.94	
		71.5	1.99	
	69	18.6	7.68	2.07
		24	5.95	
		73.8	1.93	
		95	3.30	
95	95	43.3	3.30	1.50
		53.3	2.68	

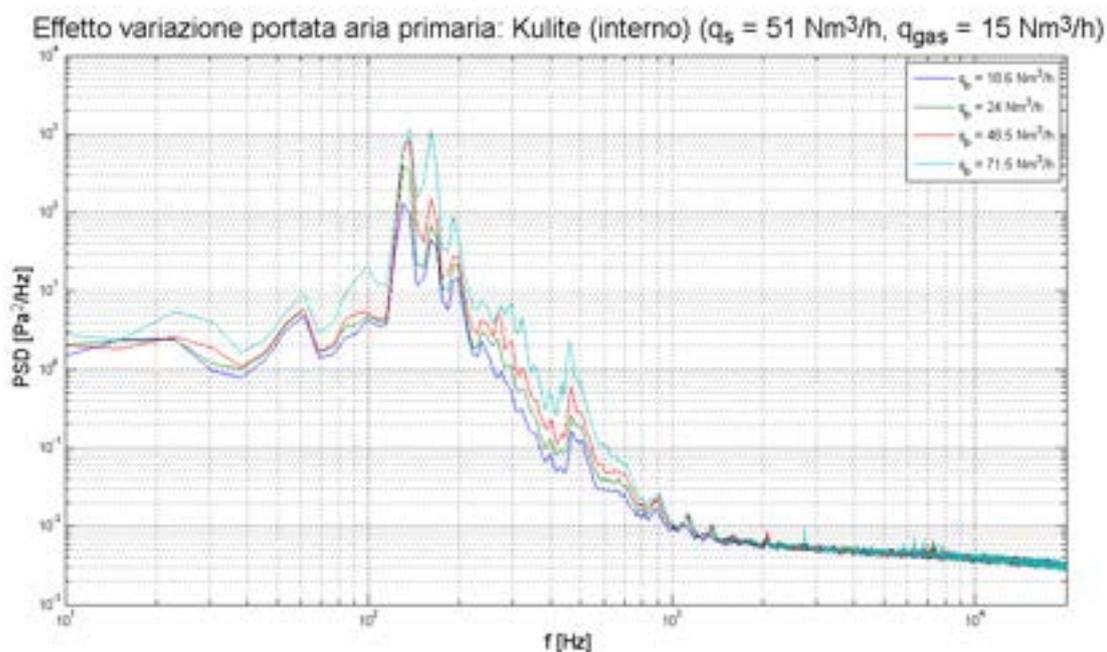


Figura 2-31: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare della portata d'aria primaria in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria secondaria 51 Nm³/h.

Effetto variazione portata aria primaria: Microfono (esterno) ($q_s = 51 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $q_{\text{gas}} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$)

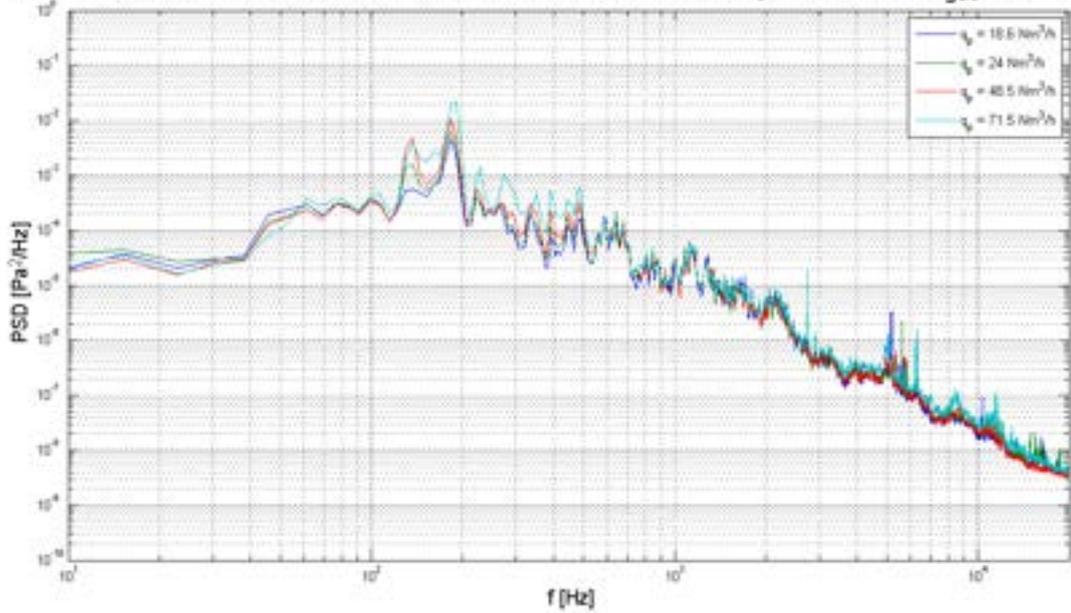


Figura 2-32: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della portata d'aria primaria in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria secondaria $51 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Effetto variazione portata aria primaria: Kulite (interno) ($q_s = 95 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $q_{\text{gas}} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$)

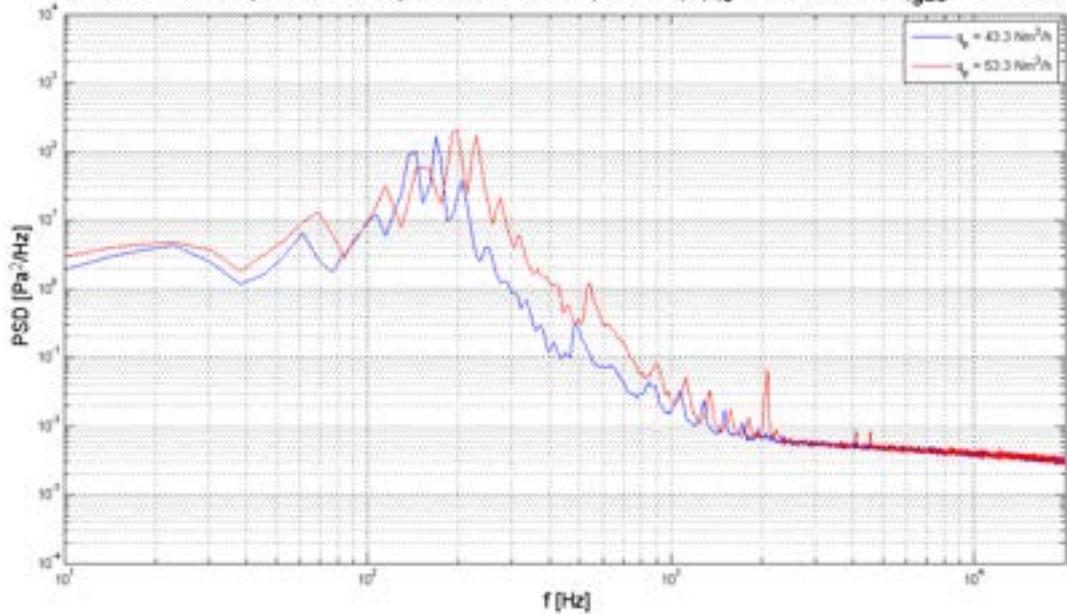


Figura 2-33: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare della portata d'aria primaria in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria secondaria $95 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Effetto variazione portata aria primaria: Microfono (esterno) ($q_s = 95 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $q_{gas} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$)

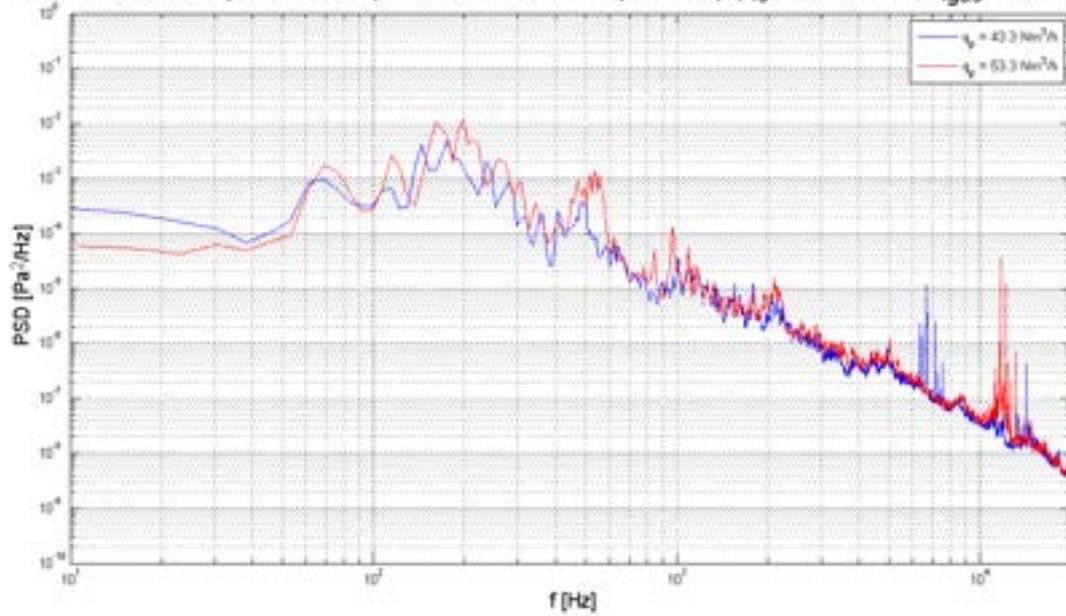


Figura 2-34: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della portata d'aria primaria in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria secondaria $95 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Effetto variazione aria secondaria

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-10. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. L'aumento di aria secondaria a parità di aria primaria comporta un lieve aumento dell'intensità delle fluttuazioni di pressione (Figura 2-35 - Figura 2-38) e per una variazione di portata a regimi elevati mostra uno shift in frequenza dei picchi legati all'accoppiamento termo-acustico (Figura 2-35 e Figura 2-36).

Tabella 2-10: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione della portata d'aria secondaria in condizioni reattive.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	Portata aria primaria [Nm ³ /h]	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]	Rapporto d'equivalenza ϕ	
			Prim.	Sec.
15	19	52	7.52	2.74
		69		2.06
	24	51.3	5.95	2.77
		68		2.09
	48	51	2.97	2.79
		90		1.58
	53	60	2.69	2.37
		96		1.48
	73	51	1.96	2.79
		70		2.03

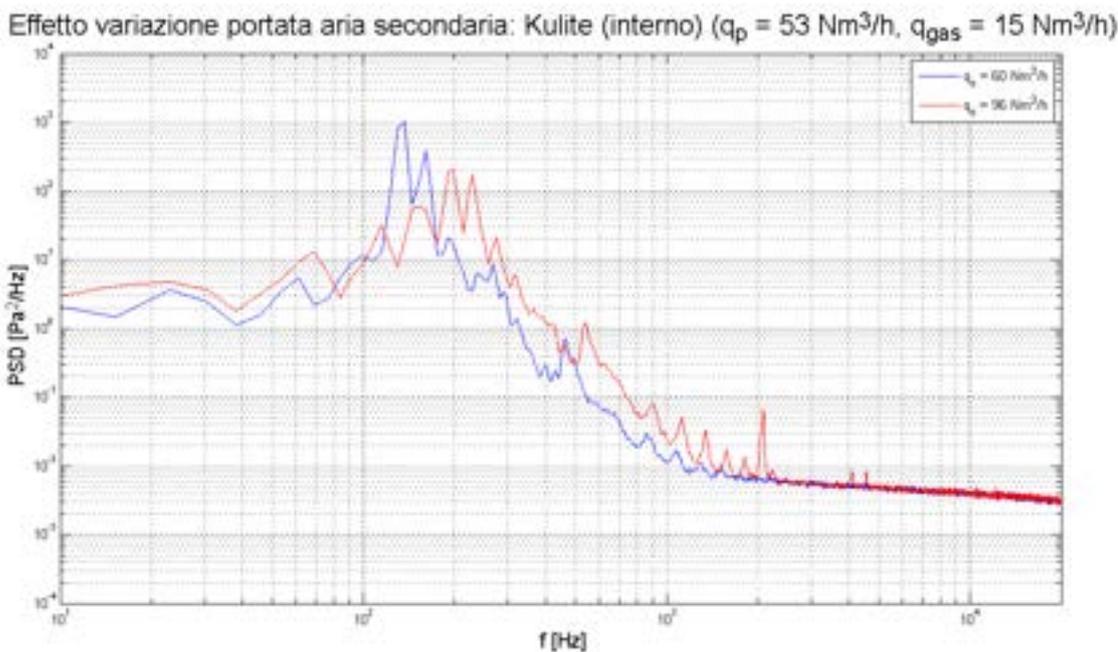


Figura 2-35: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare della portata d'aria secondaria in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria primaria 53 Nm³/h.

Effetto variazione portata aria secondaria: microfono (esterno) ($q_p = 53 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $q_{\text{gas}} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$)

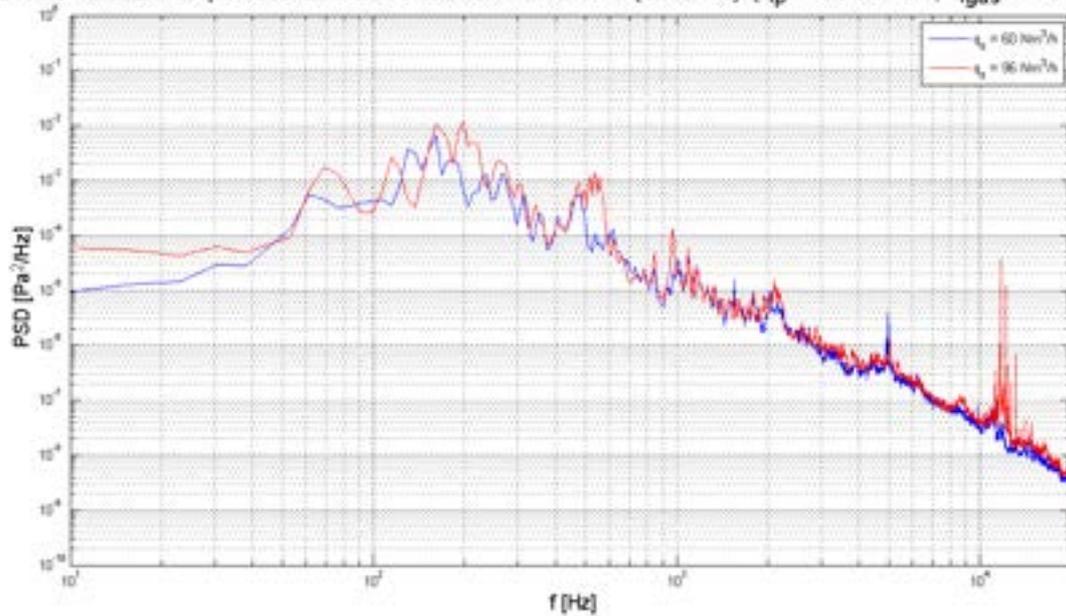


Figura 2-36: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della portata d'aria secondaria in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria primaria $53 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Effetto variazione portata aria secondaria: Kulite (interno) ($q_p = 73 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $q_{\text{gas}} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$)

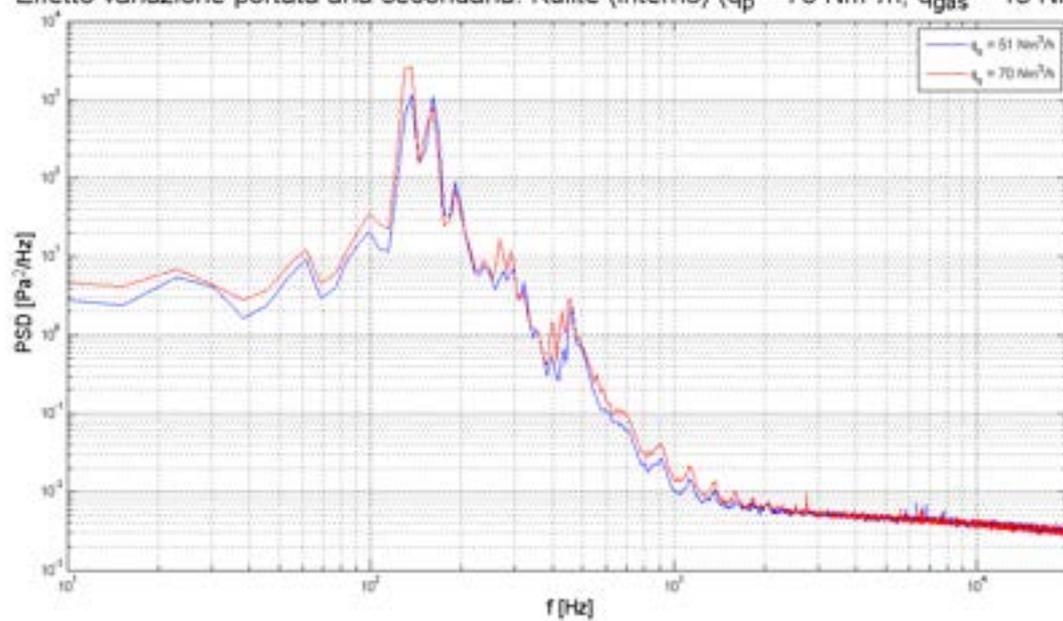


Figura 2-37: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare della portata d'aria secondaria in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria primaria $73 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Effetto variazione portata aria secondaria: Microfono (esterno) ($q_p = 73 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $q_{gas} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$)

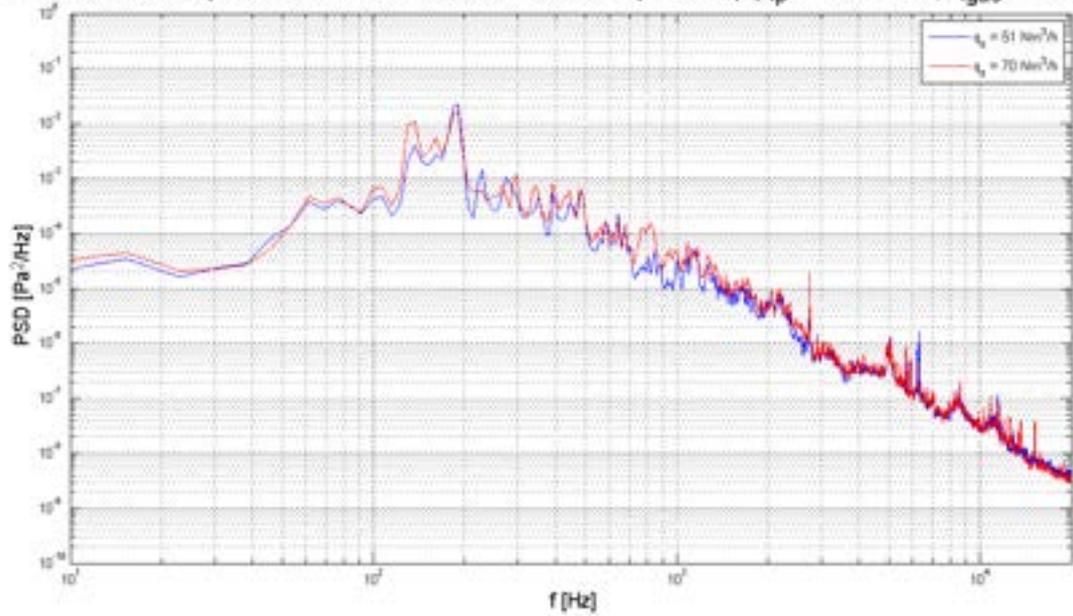


Figura 2-38: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della portata d'aria secondaria in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria primaria $73 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Effetto variazione distribuzione aria primaria/secondaria a parità di aria totale

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-11. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. Si rilevano variazioni delle fluttuazioni di pressione con aumento dei livelli sonori (Figura 2-39 e Figura 2-40).

Tabella 2-11: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione della portata d'aria totale in condizioni reattive.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	Portata aria totale [Nm ³ /h]	Rapporto d'equivalenza ϕ	Aria primaria [%]	Aria secondaria [%]
15	75	1.90	27	73
			31	69
			40	60
	90	1.59	21	79
			26	74
			31	69
	140	1.02	34	66
			51	49

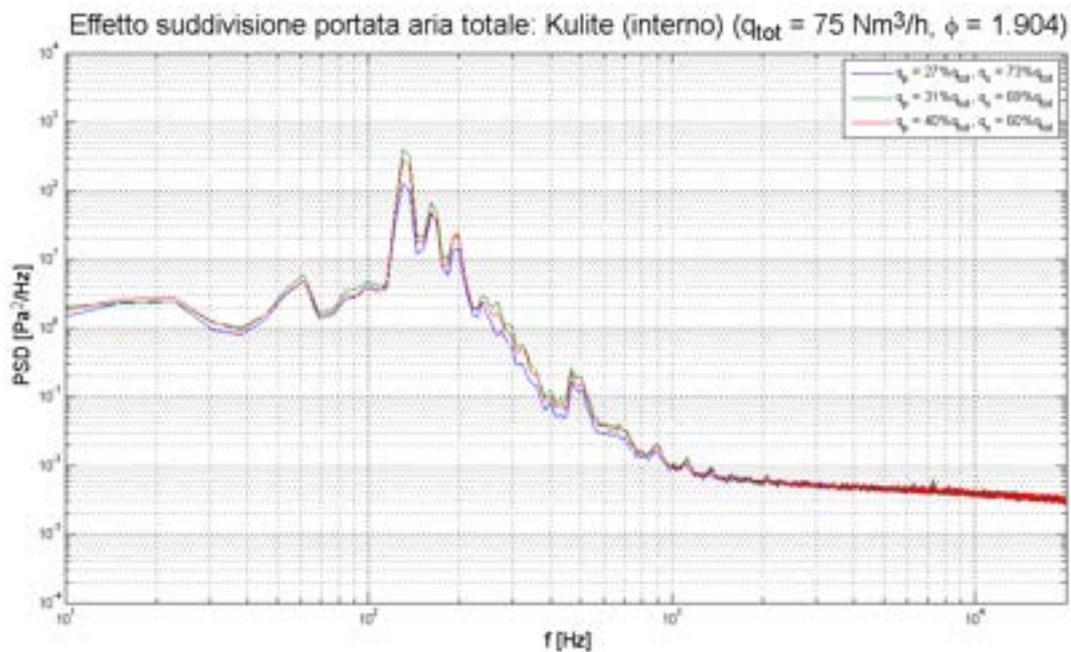


Figura 2-39: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare della suddivisione aria primaria/secondaria a parità di aria totale in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria totale 75 Nm³/h.

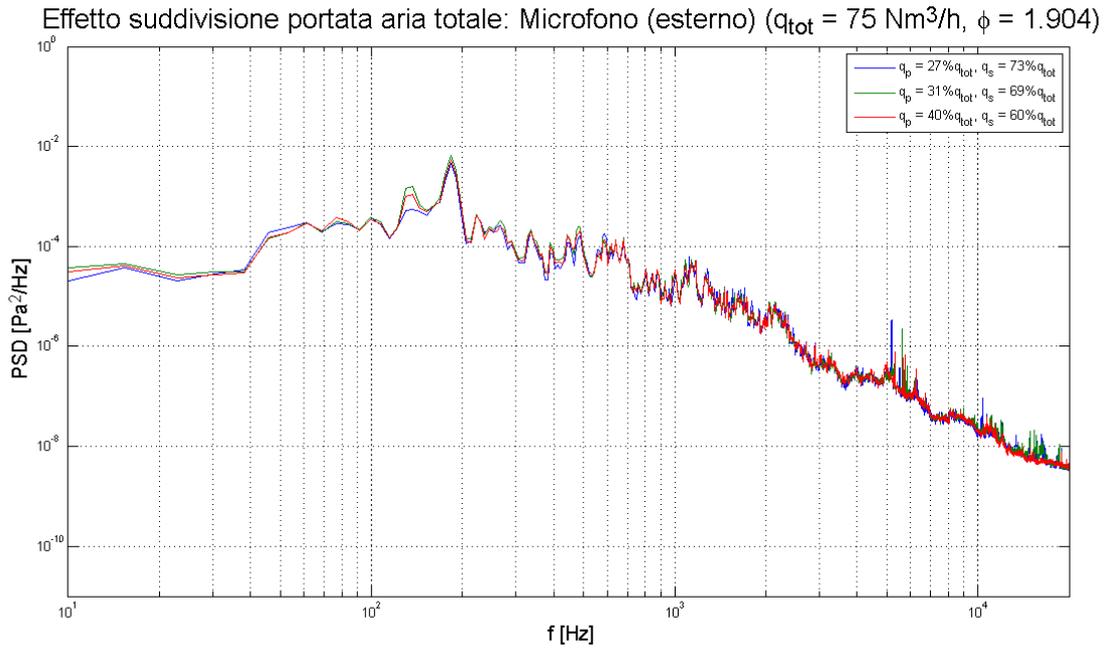


Figura 2-40: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della suddivisione aria primaria/secondaria a parità di aria totale in condizioni reattive a potenza costante. Portata aria totale $75 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Effetto variazione temperatura di preriscaldamento dell'aria

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-12. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. L'aumento della temperatura dell'aria di preriscaldamento modifica le reazioni di combustione all'interno del TVC. In caso di miscela prossima allo stechiometrico si hanno maggiori fluttuazioni di pressione a parete ed conseguente enfattizzazione delle emissioni sonore (Figura 2-41 e Figura 2-42). L'effetto è più blando all'aumentare del rapporto di equivalenza (Figura 2-43 e Figura 2-44).

Per quanto riguarda le concentrazioni di gas allo scarico si ha una riduzione dei gas inquinanti all'aumentare della temperatura dell'aria preriscaldata (Figura 2-45 e Figura 2-46). Risulta necessario effettuare un'ulteriore campagna sperimentale per approfondire tale fenomenologia.

Tabella 2-12: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione della temperatura dell'aria in condizioni reattive.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	Rapporto d'equivalenza ϕ	T _{aria} [°C]
15	0.99	20
		250
	1.17	20
		250
	1.43	20
		250
	1.83	20
		250

Effetto variazione temperatura aria primaria/secondaria: Kulite (interno) ($\alpha_{gas} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $\phi = 0.993$)

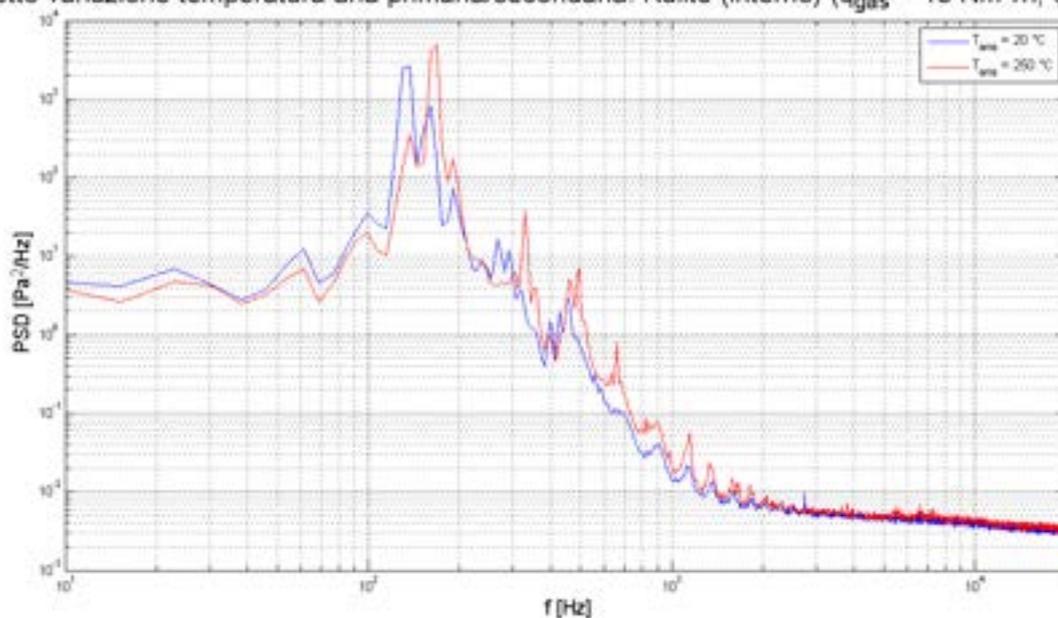


Figura 2-41: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare della temperatura dell'aria totale in condizioni reattive a potenza costante. Rapporto di equivalenza 0.993.

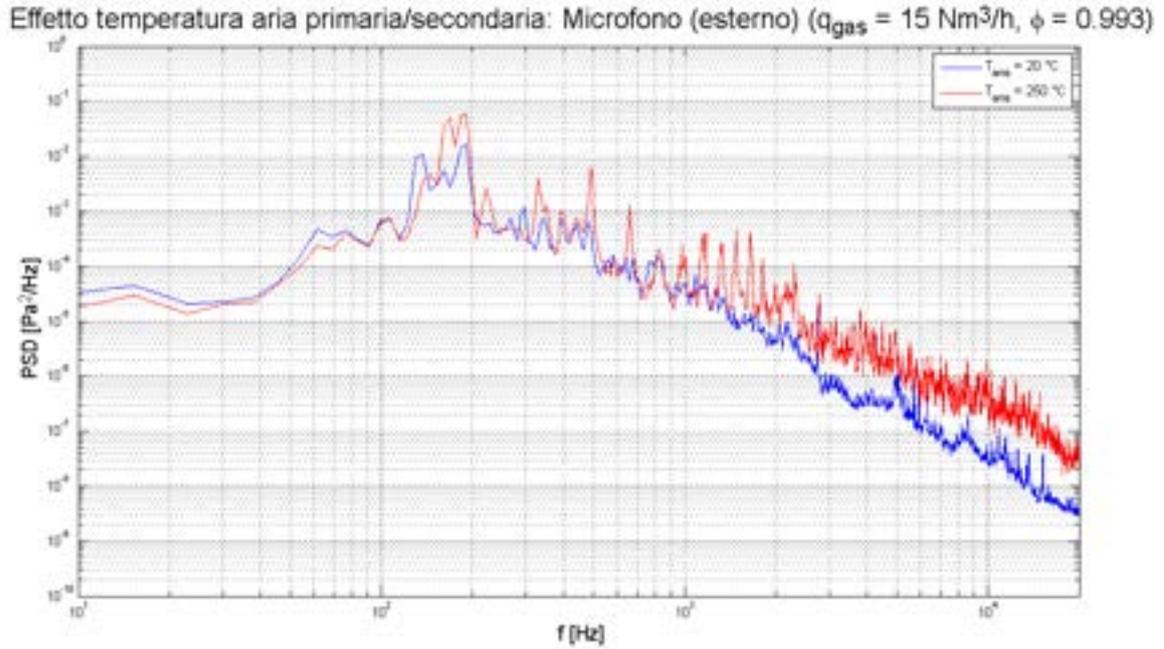


Figura 2-42: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della temperatura dell'aria totale in condizioni reattive a potenza costante. Rapporto di equivalenza 0.993.

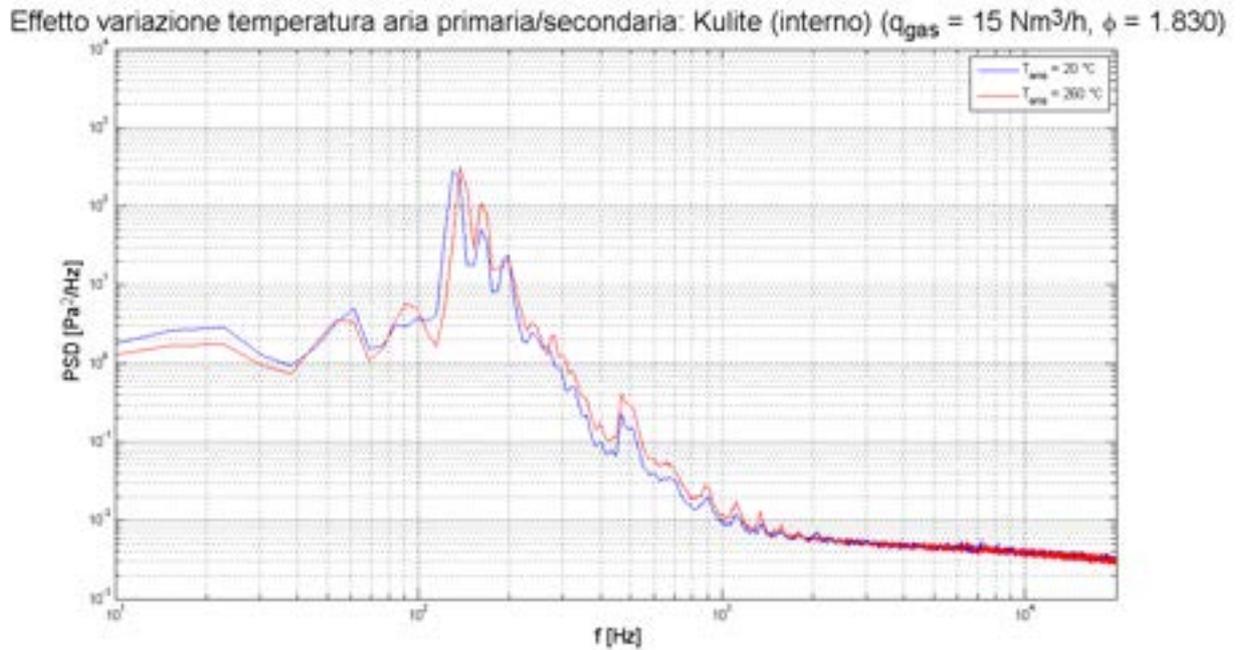


Figura 2-43: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute a parete al variare della temperatura dell'aria totale in condizioni reattive a potenza costante. Rapporto di equivalenza 1.83.

Effetto temperatura aria primaria/secondaria: Microfono (esterno) ($q_{gas} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $\phi = 1.830$)

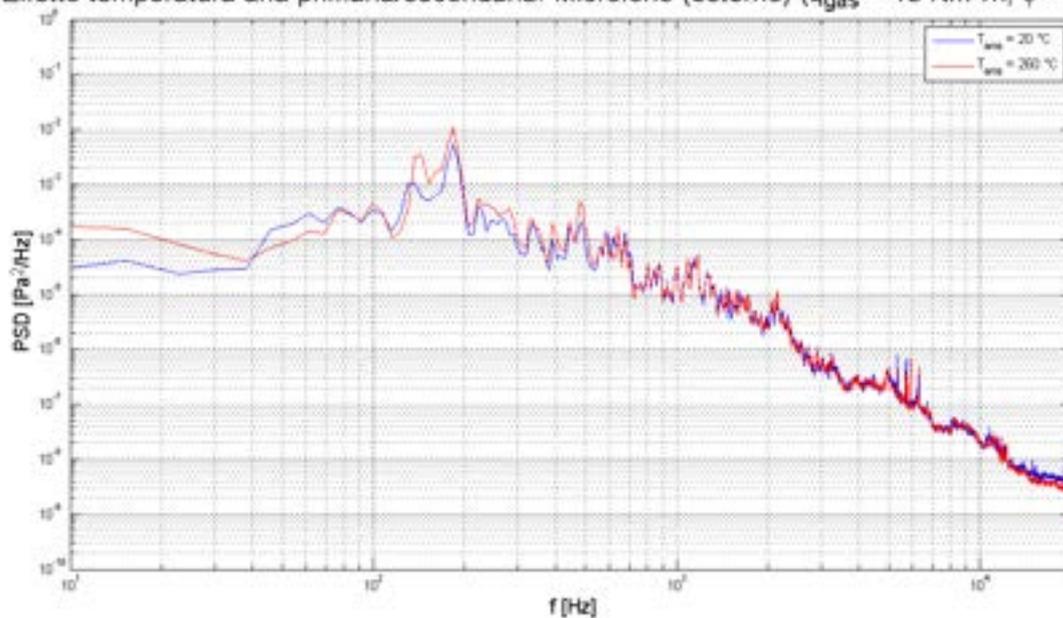


Figura 2-44: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno al variare della temperatura dell'aria totale in condizioni reattive a potenza costante. Rapporto di equivalenza 1.83.

Emissioni O_2 e CO_2

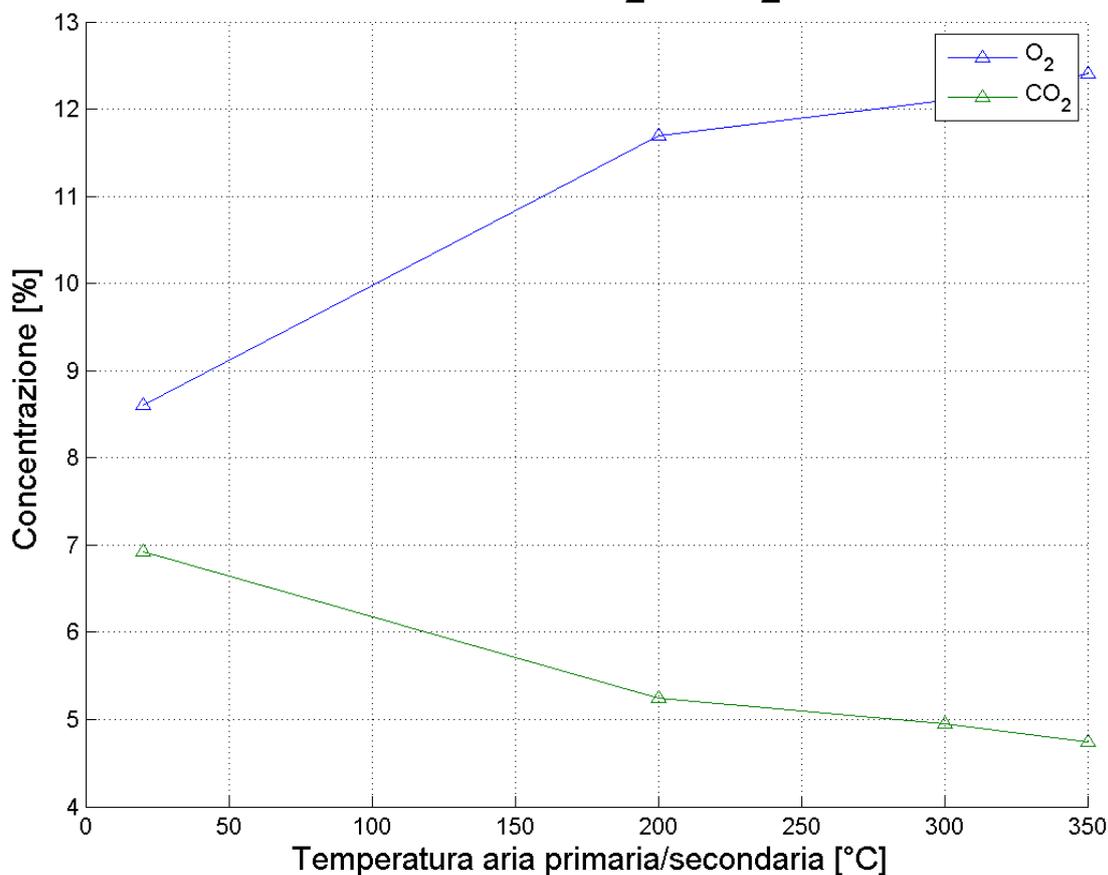


Figura 2-45: Variazione delle concentrazioni percentuali di O_2 e CO_2 in funzione della temperatura di preriscaldamento dell'aria totale.

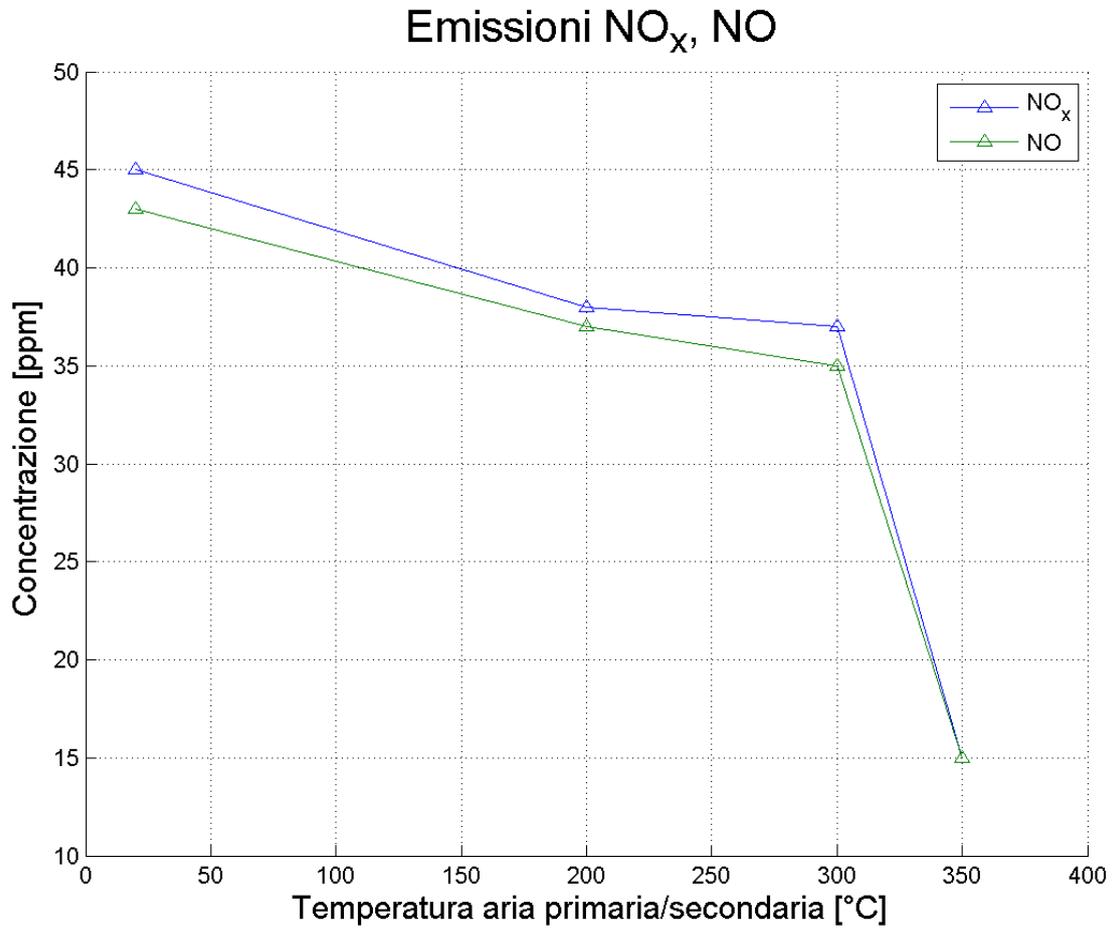


Figura 2-46: Variazione delle concentrazioni in ppm di NO_x, NO in funzione della temperatura di preriscaldamento dell'aria totale.

2.2.5 Confronto prove a freddo – prove a caldo

In questa sezione vengono presentati i risultati ottenuti da test a caldo e a freddo condotti in condizioni di portata d'aria primaria e secondaria simili. Le misure interne non sono state riportate perché non confrontabili; dunque, si è deciso di mostrare solo i dati forniti dai rilevamenti esterni tramite microfono, posizionato frontalmente rispetto alla finestra in quarzo.

Le prove confrontabili sono elencate in Tabella 2-13. L'effetto visibile è un aumento della rumorosità passando da condizioni a freddo a condizioni reattive (Figura 2-47 e Figura 2-49).

Tabella 2-13: Valori dei parametri principali operativi per confronti tra funzionamento in condizioni reattive e a freddo.

Test Case	Portata aria primaria [Nm ³ /h]	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]	Portata gas naturale [Nm ³ /h]
1	53.5	93	0 15
2	45	63	0 6.6
3	18.6	68.6	0 13.6

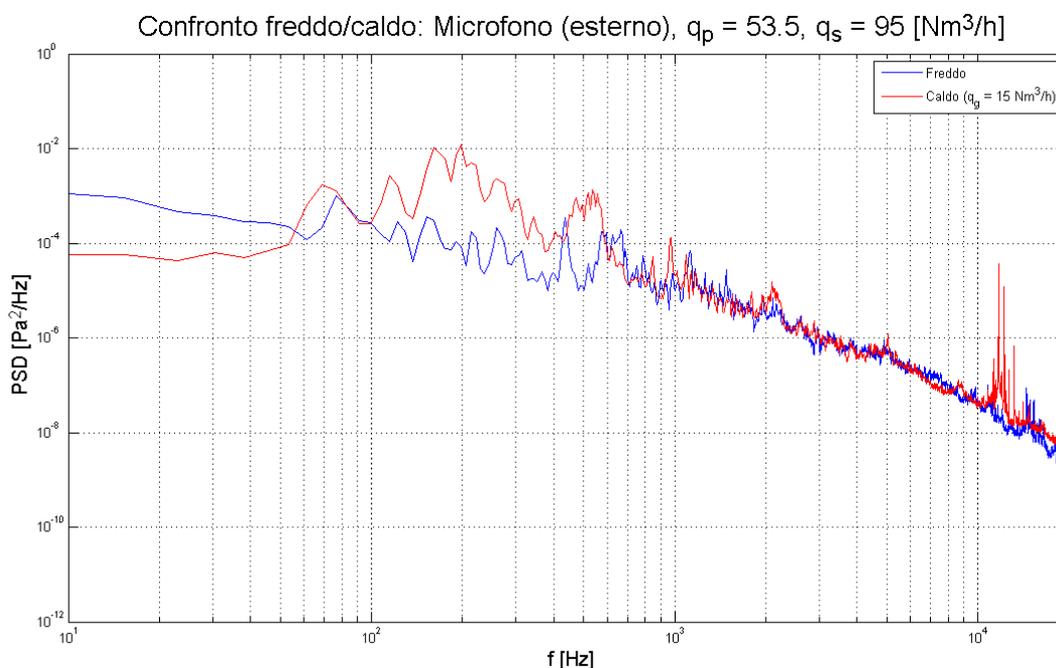


Figura 2-47: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno in condizioni reattive e a freddo. Test Case 1 di Tabella 2-13.

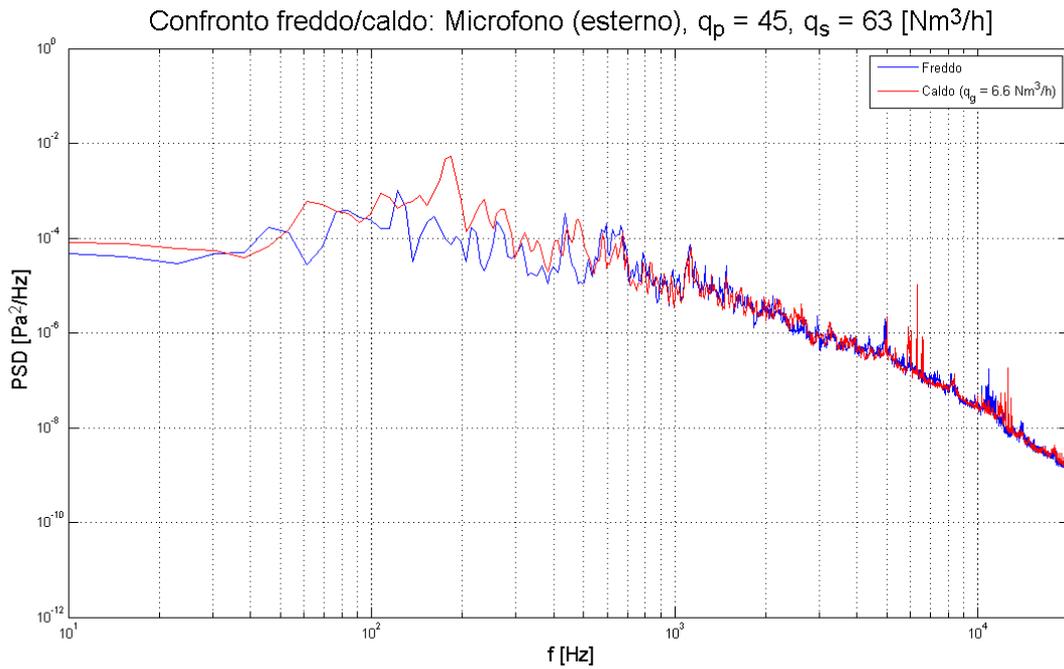


Figura 2-48: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno in condizioni reattive e a freddo. Test Case 2 di Tabella 2-13.

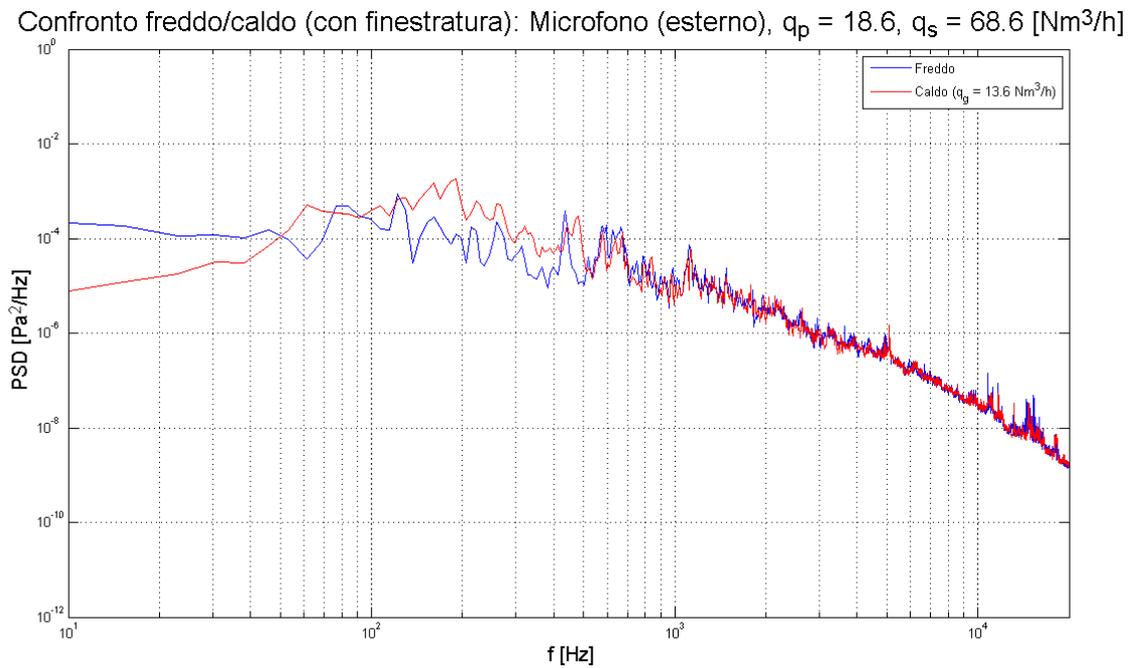


Figura 2-49: PSD delle fluttuazioni di pressione ottenute dal microfono esterno in condizioni reattive e a freddo. Test Case 3 di Tabella 2-13.

2.2.6 Test con ODC

I risultati presentati in questa sezione riguardano gli spettri ottenuti tramite le sonde ODC poste esteriormente alla camera di combustione di fronte alla finestra in quarzo. Sono riportati soltanto gli spettri di un sensore in quanto gli output sono risultati pressoché uguali. Le frequenze superiori ad 800 Hz sono state omesse in quanto il segnale da questa frequenza in poi risulta piatto. Si riporta di seguito (Figura 2-50) il rumore di fondo da cui è possibile ricavare alcuni picchi in frequenza che sono presenti negli spettri in condizioni reattive.

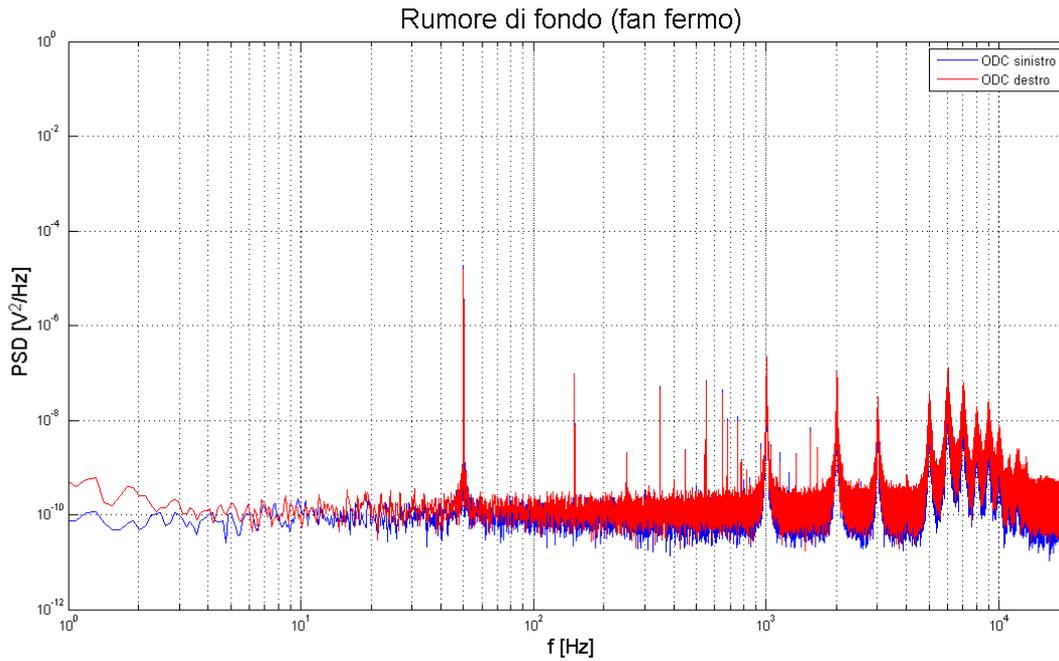


Figura 2-50: Rumore di fondo sonde ODC.

Effetto variazione rapporto di equivalenza totale

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-14. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. Aumentando il rapporto di equivalenza ϕ si ha un arricchimento della miscela che promuove la combustione ed aumenta la dinamicità dei moti fluidodinamici all'interno della cavità del TVC (Figura 2-51). L'effetto è principalmente dovuto ad una diminuzione dell'aria primaria come è possibile approfondire dai risultati delle sezioni successive.

Tabella 2-14: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione del rapporto di equivalenza totale.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	T _{aria} [°C]	Portata aria totale [Nm ³ /h]	Rapporto d'equivalenza totale	Colore fiamma
15	20	144	0.993	blu
		122	1.167	blu/arancio
		100	1.435	blu/arancio
		78	1.84	arancio
		75	1.909	arancio
		70	2.037	arancio

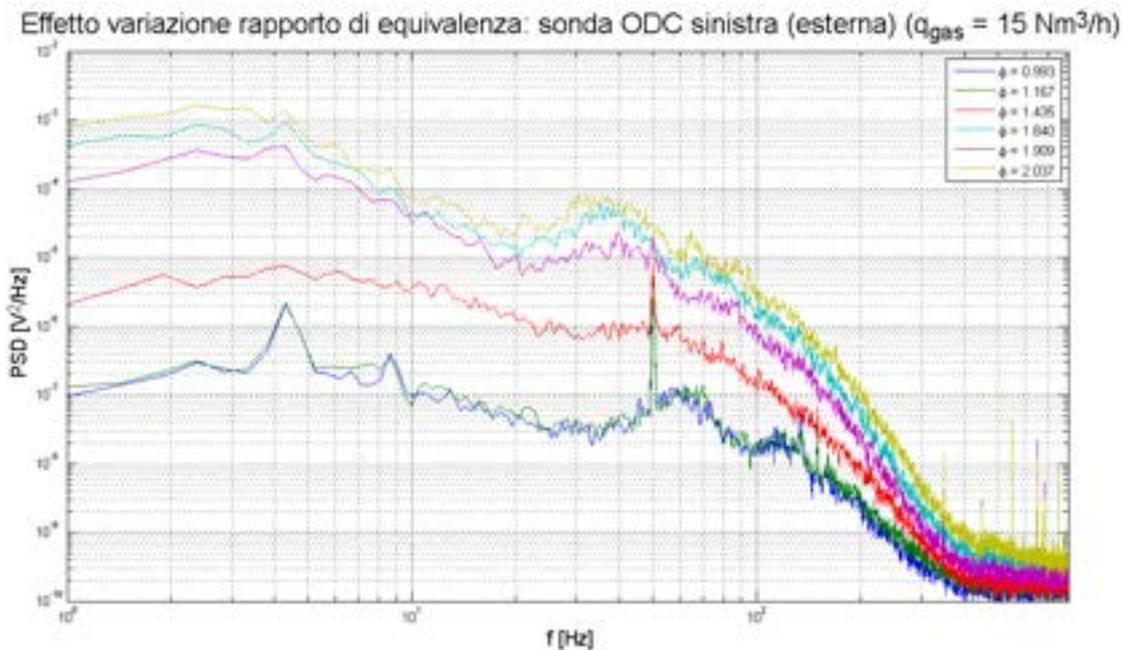


Figura 2-51: PSD del segnale ODC al variare del rapporto di equivalenza totale.

Effetti variazione aria primaria

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-15. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. L'aumento di portata di aria primaria riduce il rapporto di equivalenza primario e quello totale impoverendo la miscela e quindi causando un indebolimento dei moti dinamici all'interno del TVC (Figura 2-52).

Tabella 2-15: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione dell'aria primaria.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]	Portata aria primaria [Nm ³ /h]	Rapporto d'equivalenza			Colore fiamma
			Prim.	Sec.	Tot.	
15	51	18.6	7.677		2.037	arancio
		24	5.950		1.909	arancio
		48.5	2.944	2.800	1.435	blu/arancio
		71.5	1.997		1.167	blu/arancio

Effetto variazione portata aria primaria: sonda ODC sinistra (esterna) ($q_s = 51$, $q_{gas} = 15$ [Nm³/h])

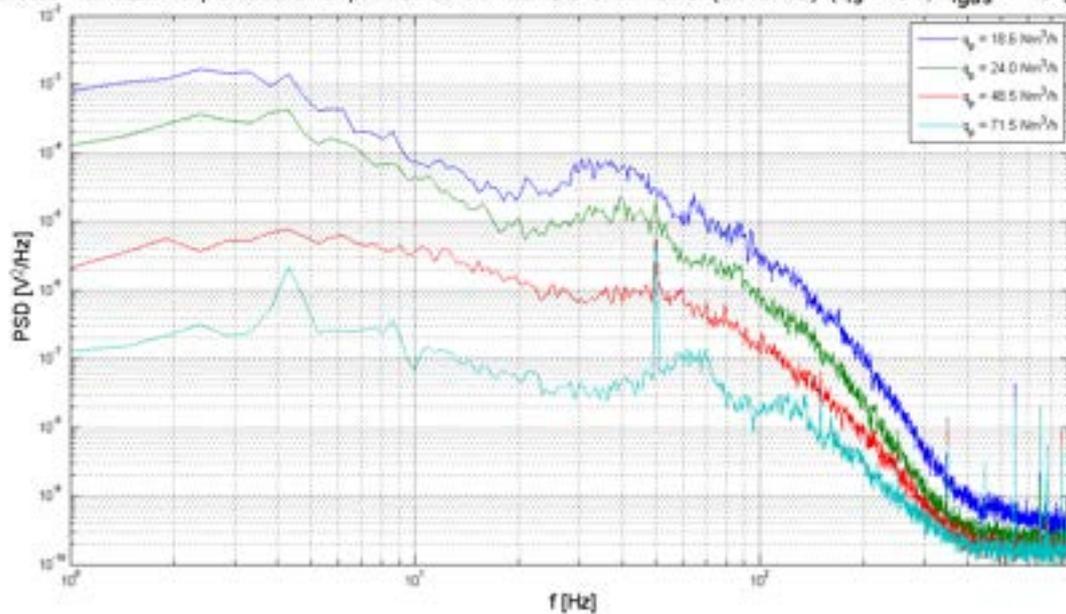


Figura 2-52: PSD del segnale ODC al variare della portata di aria primaria.

Effetto variazione aria secondaria

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-16. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. La variazione di portata d'aria secondaria non influenza particolarmente la dinamica del moto circolatorio (Figura 2-53).

Tabella 2-16: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto alla variazione dell'aria secondaria.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	Portata aria primaria [Nm ³ /h]	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]	Rapporto d'equivalenza			Colore fiamma
			Prim.	Sec.	Tot.	
15	73	51	1.956	2.800	1.165	blu/arancio
		70		2.040	0.993	blu

Effetto variazione portata aria secondaria: sonda ODC sinistra (esterna) ($q_p = 73$, $q_{gas} = 15$ [Nm³/h])

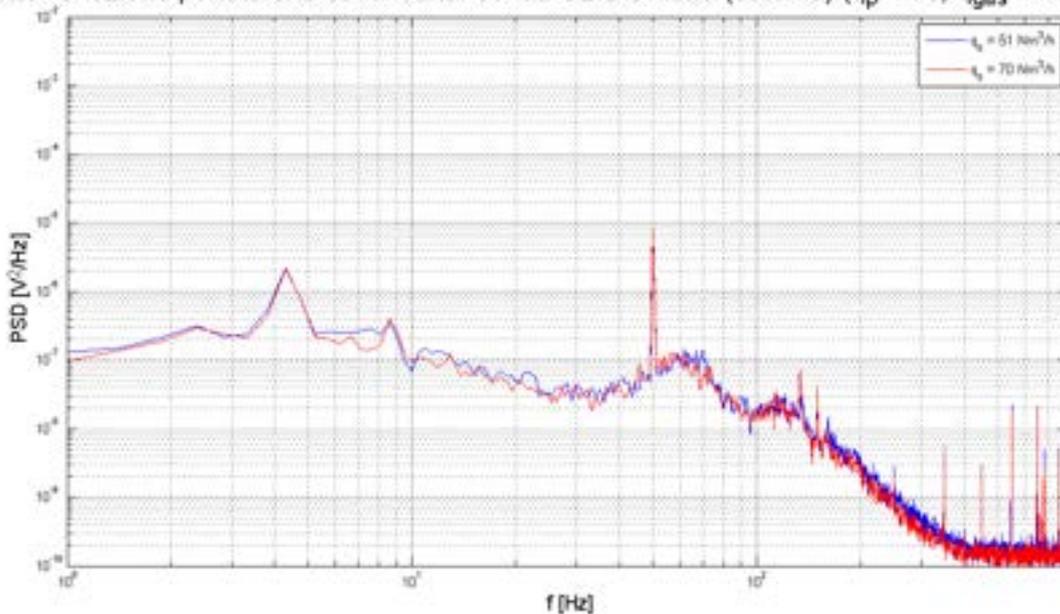


Figura 2-53: PSD del segnale ODC al variare della portata di aria secondaria.

Effetto variazione temperatura di preriscaldamento dell'aria

Le condizioni di prova sono elencate nella sub-matrice delle prove di Tabella 2-17. Le prove riportate sono tutte a potenza costante pari a circa 125 kW. L'aumento della temperatura di preriscaldamento dell'aria incentiva i moti di rimescolamento all'interno della cavità favorendo il miscelamento (Figura 2-54).

Tabella 2-17: Valori dei parametri sperimentali utilizzati per lo studio dell'effetto dovuto al preriscaldamento dell'aria totale.

Portata gas naturale [Nm ³ /h]	Portata aria primaria [Nm ³ /h]	Portata aria secondaria [Nm ³ /h]	Rapporto d'equivalenza Totale	Temperatura aria [°C]	Colore fiamma
15	31	46	1.83	20	arancio
				250	arancio

Effetto temperatura aria primaria/secondaria: sonda ODC sinistra (esterna) ($q_{gas} = 15 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $\phi = 1.830$)

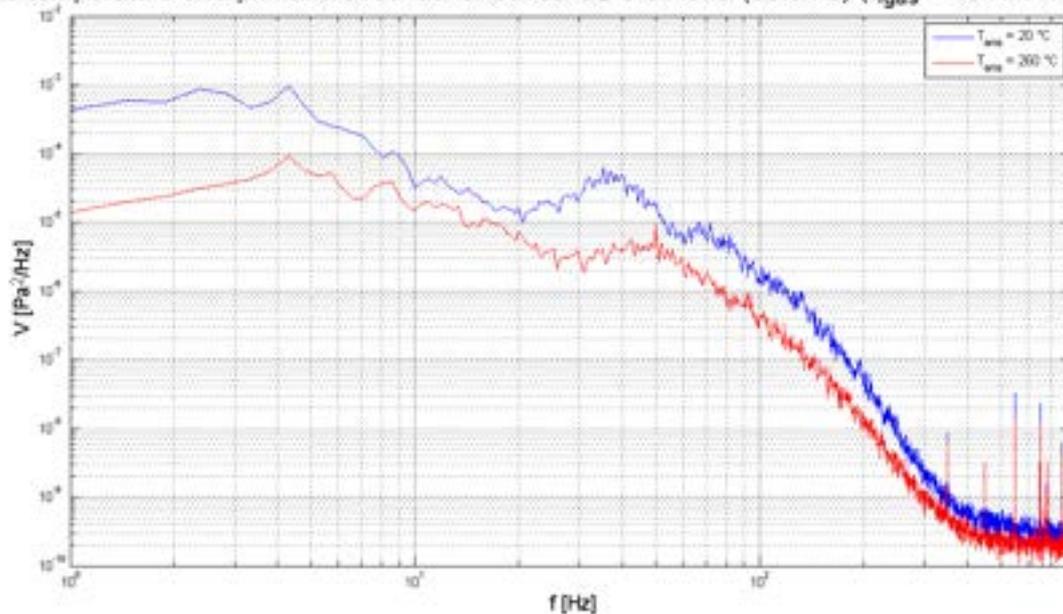


Figura 2-54: PSD del segnale ODC al variare della temperatura di preriscaldamento dell'aria totale.

Confronti spettri ODC e pressione a parete

In questa sezione vengono messi a confronto gli output delle misure d'intensità luminosa (ODC) con quelli delle misure acustiche interne (trasduttore di pressione a parete), effettuate nelle medesime condizioni. Pur trattandosi di unità di misura non congruenti, si è deciso di scalare gli assi delle ordinate mantenendone costante il rapporto fra gli estremi, in modo da rendere osservabili eventuali similarità nelle pendenze. E' interessante osservare come, per tutti i rapporti di equivalenza analizzati, nella regione ad alta frequenza, al di sopra di circa 200Hz, gli spettri di velocità e di pressione hanno andamenti molto simili. Tale risultato sembra suggerire che le fluttuazioni di pressioni ad alta frequenza siano di natura idrodinamica ed influenzate dalle piccole scale della turbolenza. I picchi di pressione associati ai modi acustici si riflettono sugli spettri di velocità solo per i rapporti di equivalenza più bassi. In particolare, si osserva che per $\phi=1.435$ (Figura 2-58) compare un picco a bassa frequenza a cui, per rapporti di equivalenza ancora inferiori, si accompagna un secondo picco proprio alle frequenze caratteristiche delle risonanze acustiche. E' possibile affermare che tali fenomeni rappresentino dei precursori dell'innesco di instabilità termoacustiche che quindi appaiono più probabili per i rapporti di equivalenza più bassi. Ulteriori approfondimenti sono necessari per chiarire queste fenomenologie, e, per questo motivo, delle ulteriori campagne sperimentali sono programmate per il futuro.

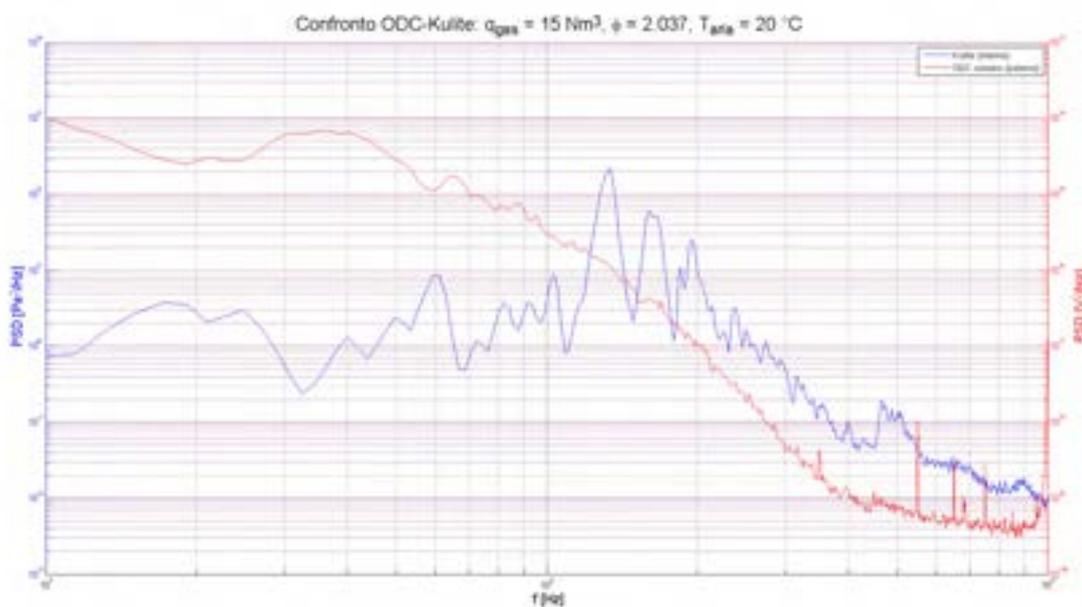


Figura 2-55: PSD del segnale ODC confrontato con lo spettro di pressione acustica acquisito a parete. Rapporto di equivalenza $\phi=2.037$.

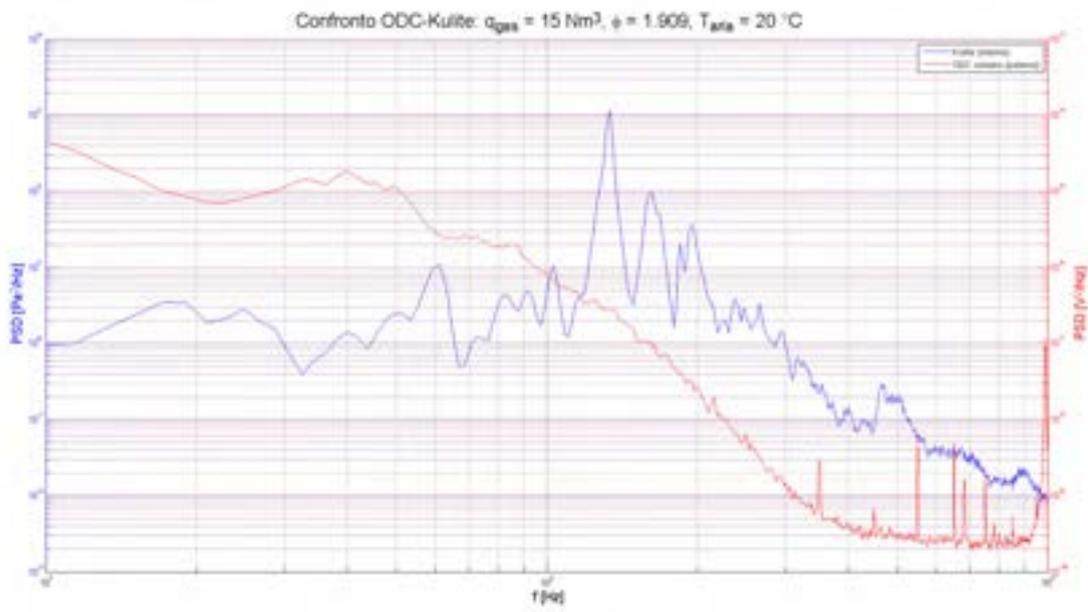


Figura 2-56: Come la figura precedente ma per rapporto di equivalenza $\phi=1.909$.

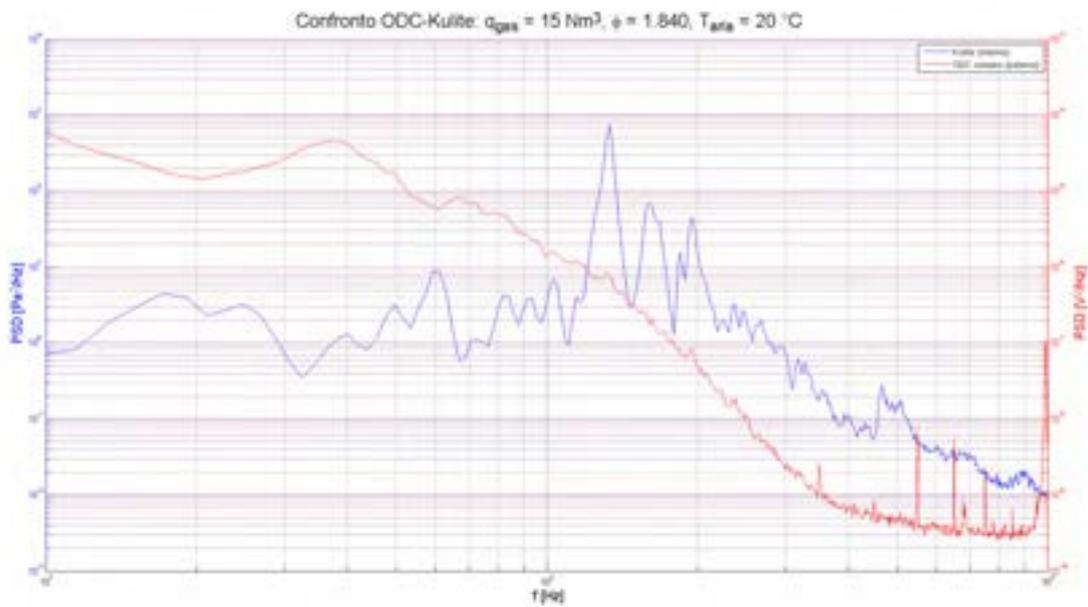


Figura 2-57: Come la figura precedente ma per rapporto di equivalenza $\phi=1.840$.

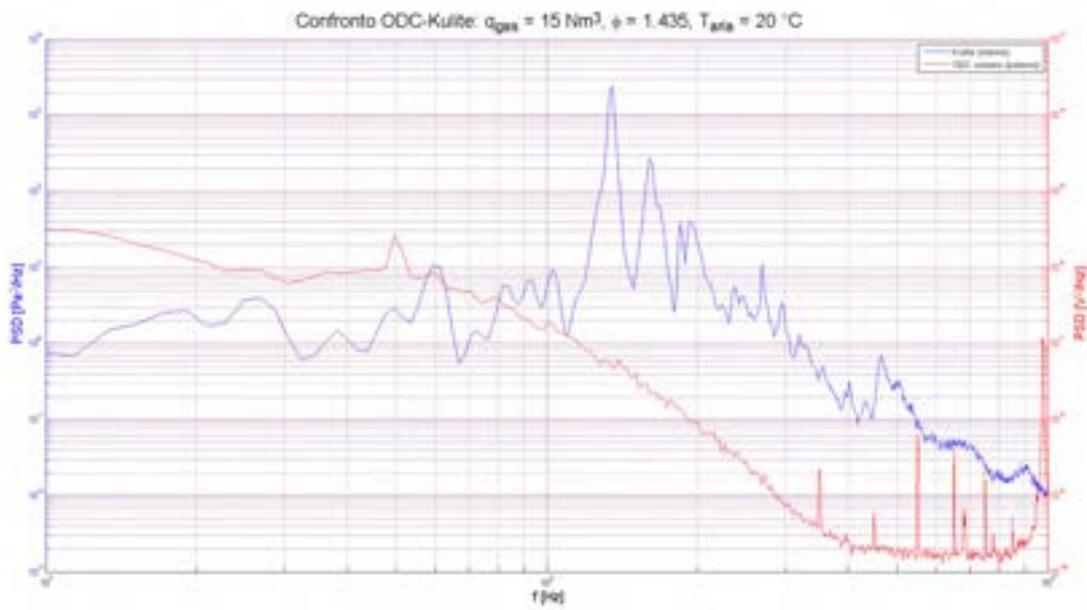


Figura 2-58: Come la figura precedente ma per rapporto di equivalenza $\phi=1.435$.

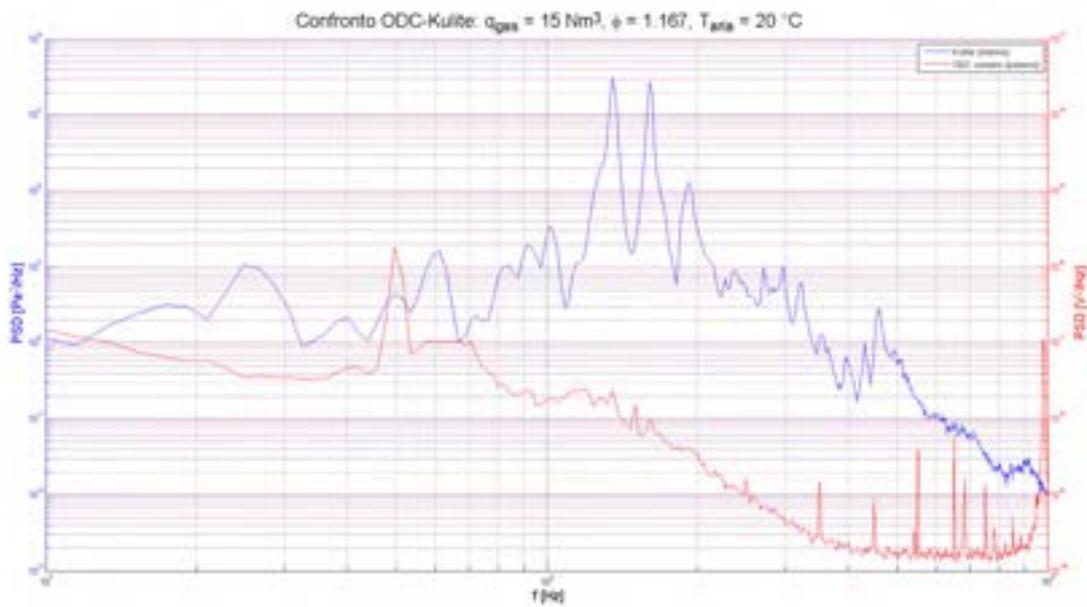


Figura 2-59: Come la figura precedente ma per rapporto di equivalenza $\phi=1.167$.

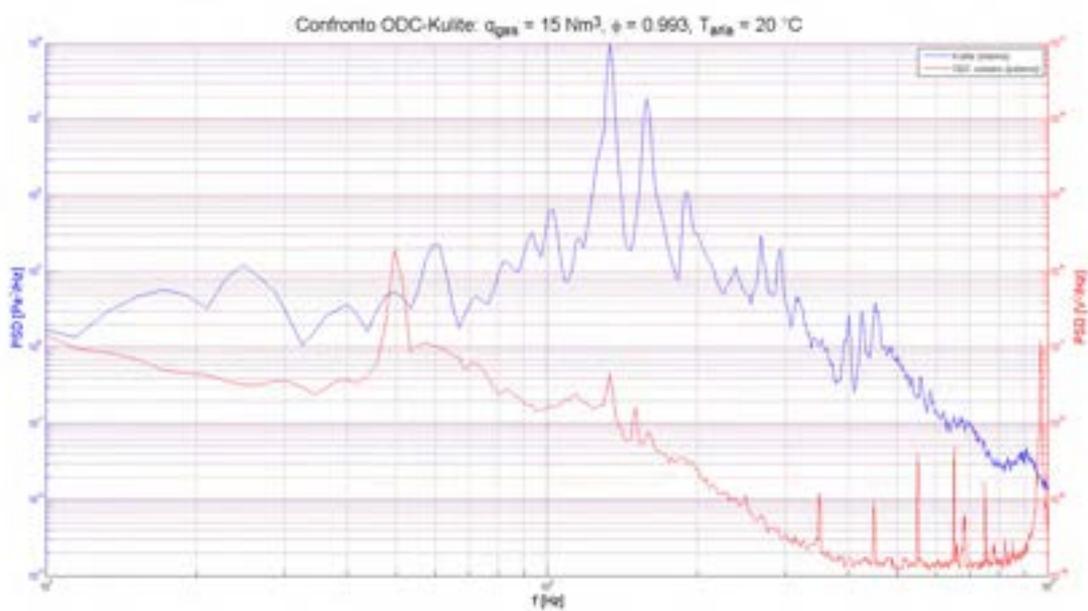


Figura 2-60: Come la figura precedente ma per rapporto di equivalenza $\phi=0.993$.

3 Conclusioni

Il Trapped Vortex Combustor ETVB-Mod1 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA presente nell'impianto MICOS è stato testato sia numericamente che sperimentalmente. I risultati sono stati ottenuti da una stretta sinergia tra il personale ENEA e quello dell'università degli studi Roma TRE.

L'obiettivo che ci si era prefissato all'inizio del rapporto di collaborazione consisteva nella caratterizzazione del TVC dal punto di vista acustico ed aeroacustico.

La caratterizzazione acustica, svolta dall'università su geometria concordata con l'ENEA, è stata approntata numericamente tramite un modello FEM implementato su codice commerciale. Il risultato a cui si è pervenuti consente di prevedere il primo modo acustico di un qualsiasi TVC una volta stabilito il rapporto di forma tenendo in considerazione la correzione dovuta alla propagazione delle onde acustiche nel condotto di scarico. Attualmente è in fase di sviluppo una versione aggiornata che possa prevedere anche l'effetto della temperatura.

La caratterizzazione aeroacustica è stata svolta sperimentalmente presso l'impianto ENEA. Il funzionamento dell'impianto e la conduzione delle prove è stata gestita dal personale ENEA con la collaborazione dell'università. La tipologia di prove riassunte in una test matrix è stata concordata da entrambe le parti cercando di scegliere le condizioni più opportune per perseguire gli obiettivi prefissati. Sono state effettuate prove sia in condizioni non reattive con aria a temperatura ambiente o preriscaldate e prove in condizioni reattive con aria a temperatura ambiente o preriscaldata.

Le fluttuazioni di pressione sono state acquisite con un trasduttore di pressione, per quanto riguarda quelle a parete, e con dei microfoni posizionati esternamente per discriminare i contributi acustici. Inoltre è stato possibile effettuare delle misure di concentrazione sui fumi di scarico grazie ad un sistema monitoraggio a disposizione dell'ENEA.

Le misure di pressione a parete hanno comportato delle difficoltà applicative dovute all'ambiente di misura. Essendo le temperature alte si è stati costretti a spostare il trasduttore in un punto sufficientemente lontano dalla sorgente di calore e collegarlo con una guida d'onda. Questa soluzione può introdurre dei disturbi armonici nell'analisi in frequenza. Per poterli prevedere è stato messo a punto un programma analitico dall'università. Con il programma è stato verificato il sistema esistente ed è stato possibile proporre uno ottimizzato in termini contenuto in frequenza ed attenuazione del segnale.

Dal post-processing effettuato dall'Università delle misure realizzate si è messa in evidenza la presenza di un picco in frequenza dovuto all'acustica della cavità la cui ampiezza è influenzata dal rapporto di equivalenza della miscela. La frequenza che si ottiene è compatibile con l'intervallo previsionale determinato numericamente. Nelle condizioni di funzionamento studiate la fiamma è risultata comunque stabile e le concentrazioni di inquinanti abbastanza basse con un'ulteriore diminuzione utilizzando aria preriscaldata. A causa dei numerosi fattori in gioco (e.g. colore delle fiamma e quindi suo irraggiamento, posizione della fiamma all'interno del campo termo fluidodinamico), che influenzano la temperatura locale e quindi la concentrazione dei gas di scarico emessi in uscita, risulta necessario effettuare un'ulteriore campagna sperimentale.

Negli ultimi test effettuati si è effettuata un'analisi parallela mediante la tecnica ODC (*Optical Diagnostics of Combustion*) cercando di iniziare la messa a punto di un sistema in parallelo con le misure di pressione.

Tramite l'uso parallelo e contemporaneo dell'ODC, dei trasduttori di pressione e dei microfoni sarà possibile caratterizzare non solo i fenomeni di risonanza dei modi propri acustici della cavità del combustore Trapped Vortex, ma anche caratterizzare in maniera più esauriente il comportamento dinamico del flusso all'interno della stessa cavità, rendendo possibile l'ottimizzazione di un rapporto di forma che disaccoppi i fenomeni acustici da quelli termici.

4 Riferimenti bibliografici

1. R. Camussi, T. Pagliaroli, "Caratterizzazione aerodinamica e aeroacustica di bruciatori non convenzionali di tipo Trapped Vortex", Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico-ENEA, Report Ricerca di Sistema Elettrico, RdS/2012/194, settembre 2012.
2. P.K. Tang, W.A. Sirignano, "Theory of generalized Helmholtz resonator", *J. Sound Vib*, 26(2), pp. 247-262, 1973.
3. T. Poinso, D. Veynante, "Theoretical and Numerical Combustion", Edwards, Philadelphia, PA USA, 2005.
4. 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, 2004.
5. R. Bruschi, M. Grottadaurea, E. Giacomazzi, E. Giulietti, C. Stringola, V. Casasanta, and S. Giammartini, "Metodo e relativo dispositivo per la misura della velocità assiale dei gas combusti", Italian Patent RM2006A000159, 2006.
6. E. Giacomazzi, G. Troiani, E. Giulietti, R. Bruschi, "Effect of Turbulence on Flame Radiative Emission", *Experiments in Fluids*, vol.44, issue 4, pp.557-564, 2008.
7. 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.
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. Bruschi R., Daniele S., Giacomazzi E., Giammartini S., Giulietti E., Manfredi F., Stringola C., "Optical Unsteady Characterization of Turbulent Combustion: Application in an Active Control System", 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit., number AIAA 2005-4328; Tucson (Arizona, USA), 10-13 July 2005.
10. M.A. White, M. Dhingra, J.V.R. Prasad, "Experimental analysis of a waveguide pressure measuring system", Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, GT2009, June 8-12, 2009, Orlando, Florida, USA.
11. H. Bergh, H. Tijdeman, "Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems", Report NLR-TR F.238, 1967.
12. H. Tijdeman, R.M.E.J. Spiering, "A System for Unsteady Pressure Measurements Revisited" International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, 2003.
13. J.D. Holmes, R.E. Lewis, "The Dynamic Response of Pressure-Measurement System", 9th Austral-Asian Fluid Mechanics Conference, Auckland, 8-12 December 1986.
14. E. Rodarte, G. Singh, N.R. Miller, P. Hrnjak, "Sound attenuation in tubes due to Visco-Thermal effects", *J. Sound Vib*, 231(5), pp. 1221-1242, 2000.
15. C. Antonini, G. Persico, A.L. Rowe, "Prediction of the dynamic response of complex transmission line systems for unsteady pressure measurements", *Meas. Sci. and Technol.*, 19, 2008.

5 Abbreviazioni ed acronimi

- TVC trapped vortex combustor
- MICOS Multipurpose Installation for COmbustion Studies
- MILD Moderate and Intense Low oxygen Dilution
- ODC Optical Diagnostic of Combustion

Curriculum del responsabile scientifico del gruppo di ricerca dell'Università di Roma TRE

Roberto Camussi si è laureato con lode in Ingegneria Aeronautica presso l'Università "La Sapienza" di Roma nel 1991. Nel 1995 ha completato il Dottorato di Ricerca in Meccanica Teorica ed Applicata presso la stessa Università e, nello stesso anno, ha vinto un posto da Ricercatore presso l'Università Roma Tre. Dal 2002 è Professore Associato presso la facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre. Dal 2012 è Professore Straordinario presso l'Università Roma Tre.

Nel periodo 1994-1995 ha svolto attività di ricerca presso l'Ecole Normale di Lione. Dal 1994 ad oggi ha partecipato a numerose conferenze Nazionali ed Internazionali, come Chairman in alcune sessioni. È stato organizzatore di workshop, conferenze e scuole internazionali.

È stato invitato a tenere numerosi seminari presso Università e centri di ricerca italiani ed esteri, compreso un breve corso tenuto nell'ambito della scuola estiva internazionale "Turbulence: measurements and signals", presso l'Institut d'Etudes Scientifique di Cargese (Francia), organizzata dal CNRS francese nel 2002, ed un corso intitolato "Boundary Layer Noise" nell'ambito della scuola "Noise Sources in Turbulent Shear Flows", tenuta presso il CISM (Udine), nel 2011.

È stato invitato a contribuire su riviste internazionali con pubblicazioni di review ad invito. È Referee di numerose prestigiose riviste internazionali (ad esempio. Journal of Fluid Mechanics, Physics of Fluids, Experiments in Fluids).

È Referee della *National Science Foundation* degli USA, del sistema *EPSRC* – UK Engineering and Physical Science Research Council, del sistema *e-GAP2* della Royal Society, London (UK).

Fa parte del Consiglio Direttivo dell'associazione AIVELA (Associazione Italiana di Velocimetria Laser). È il rappresentante dell'AIDAA (Associazione Italiana di Aeronautica ed Astronautica) presso l'*Aeroacoustic Specialists Committee* della CEAS (Council of European Aerospace Society).

Ha avuto ruolo di responsabilità e di collaborazione in numerosi contratti e convenzioni di ricerca finanziati dalla comunità europea (nel 6° e 7° programma quadro), da enti pubblici (quali MUR, CNR, Regione Lazio), da centri di ricerca (quali ASI, CIRA, ENEA) e da società private (quali ad esempio ALENIA, MBDA, ITALFERR). Insegna presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre, tenendo un corso di fluidodinamica nella laurea in Ingegneria Meccanica, e corsi di Aerodinamica e Propulsione, nell'ambito della laurea magistrale di Ingegneria Aeronautica. Tiene corsi nel settore dell'aeroacustica agli studenti della sezione di Ingegneria Meccanica e Industriale della Scuola Dottorale di Ingegneria dell'Università Roma Tre, del cui Collegio dei Docenti fa parte. È docente guida di diversi dottorandi, di numerosi laureandi di primo e secondo livello, di numerosi stagisti italiani e stranieri. Ha fatto parte di commissioni per concorsi a posti di Ricercatore, di Dottorato, di assegni di ricerca ed ha fatto parte di commissioni per l'esame finale di Dottorato sia in Italia che presso Università straniere.

Ha lavorato principalmente nel settore della fluidodinamica sperimentale con studi nel campo dei flussi turbolenti, dell'aeroacustica ed aerodinamica di flussi di parete, dell'aeroacustica ed aerodinamica di getti, della combustione turbolenta e nello sviluppo di metodologie avanzate per analisi di segnali.

Le ricerche svolte hanno portato alla realizzazione di oltre 130 lavori scientifici pubblicati su riviste scientifiche internazionali e atti di conferenze nazionali o internazionali.