

# Analisi e controllo di instabilità termoacustiche in sistemi turbogas

Matteo Bargiacchi

Relatore: Chiar.mo Prof. Alessandro Bottaro<sup>1</sup>    Correlatore: Dott. Giulio Mori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni dell'Ambiente e del Territorio  
Università degli Studi di Genova

<sup>2</sup>Ansaldo Energia

17 Dicembre 2010

# Outline



**DICAT**



**Periodo:** Tesi svolta Just in Time fra Gennaio e Novembre 2010.

**Collaborazioni:** Tesi di ricerca svolta in collaborazione con Ansaldo Energia, Politecnico di Bari, CERFACS.

**Obiettivo:** Sviluppo di un modello per l'analisi di instabilità termoacustiche in sistemi turbogas.

# Outline

- 1 **Instabilità termoacustiche**
  - Il fenomeno dell'Humming
  - Il codice LOMTI
- 2 Calibrazione su un modello ad elementi finiti
  - Confronto senza perturbazioni della fiamma
  - Confronto con perturbazioni della fiamma
- 3 Studi parametrici
- 4 Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico
- 5 Conclusioni e sviluppi futuri

## Il perché di questi studi

- Necessità di ridurre le emissioni inquinanti di Ossidi di Azoto  $\rightsquigarrow NO_x$  termici.
- **Alcune soluzioni:** Immissione di inerti in camera di combustione ( $H_2O$ ,  $N_2$ ), filtri ceramici catalizzatori, combustione RQL
- Combustione premiscelata povera (LP-LPP)  
 $\rightsquigarrow$  rapporto di equivalenza  $\Phi \simeq 0.5$ .
  - Autoignizione
  - Flashback
  - **Instabilità termoacustiche**

# Il processo di retroazione

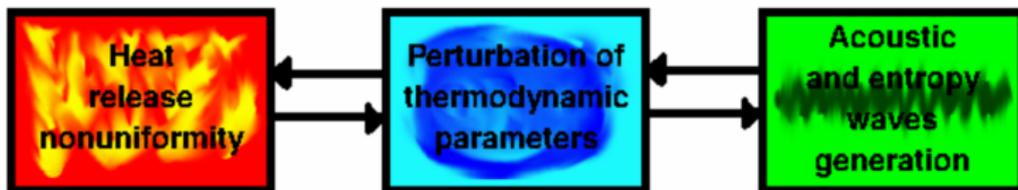
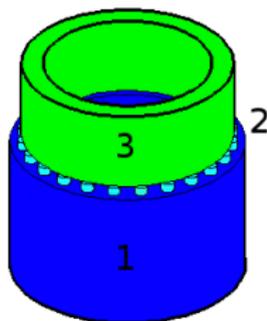
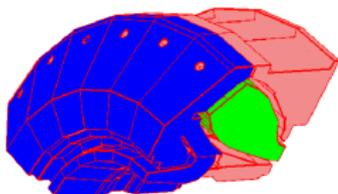


Figura: Il processo di feedback.

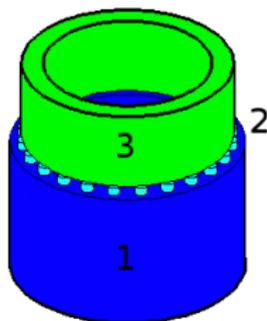
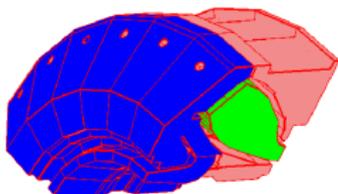
- Piccole perturbazioni esistono sempre perché il sistema non è isolato.
- Ancoraggio della fiamma, rumore di combustione.

# Il modello a parametri concentrati



- si ipotizza un flusso medio dalle caratteristiche costanti in ogni condotto (plenum, 24 premixers, camera di combustione)
- ogni grandezza  $G(x, r, \theta, t)$  viene scomposta in una parte costante  $\bar{G}$  (diversa per ogni condotto) e in una parte variabile  $G'(x, r, \theta, t) \ll \bar{G}$

# Il modello a parametri concentrati



- si ipotizza un flusso medio dalle caratteristiche costanti in ogni condotto (plenum, 24 premixers, camera di combustione)
- ogni grandezza  $G(x, r, \theta, t)$  viene scomposta in una parte costante  $\bar{G}$  (diversa per ogni condotto) e in una parte variabile  $G'(x, r, \theta, t) \ll \bar{G}$

# Calcolo del flusso medio

- conservazione alle interfacce
  - portata massica
  - quantità di moto
  - energia
- condizioni al contorno:  $p$ ,  $T$ ,  $\dot{m}$  all'ingresso e  $T_{fiamma}$
- equazione dei gas perfetti in ogni condotto
- legame  $\{c_{pi}, c_{vi}\} = f(T_i)$

## Sistema risultante

$$\vec{F}(\bar{p}_i, \bar{T}_i, \bar{u}_i, \bar{\rho}_i) = 0$$

dove  $\vec{F}$  è un sistema non lineare di equazioni.

## Variabili correlate

$$c_{si}, c_{pi}, c_{vi}, Ma_j, h_j$$

# Calcolo del flusso medio

- conservazione alle interfacce
  - portata massica
  - quantità di moto
  - energia
- condizioni al contorno:  $p$ ,  $T$ ,  $\dot{m}$  all'ingresso e  $T_{fiamma}$
- equazione dei gas perfetti in ogni condotto
- legame  $\{c_{pi}, c_{vi}\} = f(T_i)$

## Sistema risultante

$$\vec{F}(\bar{p}_i, \bar{T}_i, \bar{u}_i, \bar{\rho}_i) = 0$$

dove  $\vec{F}$  è un sistema non lineare di equazioni.

## Variabili correlate

$$c_{si}, c_{pi}, c_{vi}, Ma_j, h_j$$

# Calcolo del flusso medio

- conservazione alle interfacce
  - portata massica
  - quantità di moto
  - energia
- condizioni al contorno:  $p$ ,  $T$ ,  $\dot{m}$  all'ingresso e  $T_{fiamma}$
- equazione dei gas perfetti in ogni condotto
- legame  $\{c_{pi}, c_{vi}\} = f(T_i)$

## Sistema risultante

$$\vec{F}(\bar{p}_i, \bar{T}_i, \bar{u}_i, \bar{\rho}_i) = 0$$

dove  $\vec{F}$  è un sistema non lineare di equazioni.

## Variabili correlate

$$c_{si}, c_{pi}, c_{vi}, Ma_j, h_j$$

# Calcolo del flusso medio

- conservazione alle interfacce
  - portata massica
  - quantità di moto
  - energia
- condizioni al contorno:  $p$ ,  $T$ ,  $\dot{m}$  all'ingresso e  $T_{fiamma}$
- equazione dei gas perfetti in ogni condotto
- legame  $\{c_{pi}, c_{vi}\} = f(T_i)$

## Sistema risultante

$$\vec{F}(\bar{p}_i, \bar{T}_i, \bar{u}_i, \bar{\rho}_i) = 0$$

dove  $\vec{F}$  è un sistema non lineare di equazioni.

## Variabili correlate

$$c_{si}, c_{pi}, c_{vi}, Ma_j, h_j$$

# Calcolo del flusso medio

- conservazione alle interfacce
  - portata massica
  - quantità di moto
  - energia
- condizioni al contorno:  $p$ ,  $T$ ,  $\dot{m}$  all'ingresso e  $T_{fiamma}$
- equazione dei gas perfetti in ogni condotto
- legame  $\{c_{pi}, c_{vi}\} = f(T_i)$

## Sistema risultante

$$\vec{F}(\bar{p}_i, \bar{T}_i, \bar{u}_i, \bar{\rho}_i) = 0$$

dove  $\vec{F}$  è un sistema non lineare di equazioni.

## Variabili correlate

$$C_{Si}, C_{pi}, C_{vi}, Ma_i, h_i$$

# L'equazione fondamentale

## L'equazione delle onde non omogenea convettiva

$$\frac{D^2 p'}{Dt^2} - c_s^2 \nabla^2 p' = \bar{\rho}(\gamma - 1) \frac{Dq'}{Dt}$$

$$\frac{D(..)}{Dt} = \frac{\partial(..)}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}(..)$$

$c_s$ : celerità del suono;

$\gamma$ : rapporto calori specifici;

$q$ : potenza termica per unità di volume.

$$\rightsquigarrow G'(x, r, \theta, t) = \sum_{n=-N_n/2+1}^{N_n/2} \left[ \left( A_n^+ e^{ik^+x} + A_n^- e^{ik^-x} \right) B_{n,m}(r) + A_n^e e^{ik^0x} E(r) \right] e^{j\omega t + in\theta}$$

# L'equazione fondamentale

## L'equazione delle onde non omogenea convettiva

$$\frac{D^2 p'}{Dt^2} - c_s^2 \nabla^2 p' = \bar{\rho}(\gamma - 1) \frac{Dq'}{Dt}$$

$$\frac{D(..)}{Dt} = \frac{\partial(..)}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}(..)$$

$c_s$ : celerità del suono;

$\gamma$ : rapporto calori specifici;

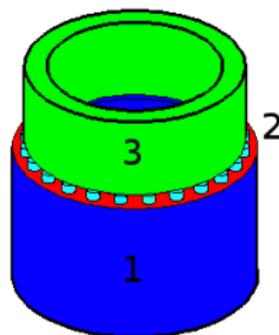
$q$ : potenza termica per unità di volume.

$$\rightsquigarrow G'(x, r, \theta, t) = \sum_{n=-N_n/2+1}^{N_n/2} \left[ \left( A_n^+ e^{ik^+x} + A_n^- e^{ik^-x} \right) B_{n,m}(r) + A_n^e e^{ik^0x} E(r) \right] e^{i\omega t + in\theta}$$

# Le equazioni del disturbo

- condizioni alle interfacce: **portata massica**
- condizioni acustiche al contorno:
- modello di rilascio termico:

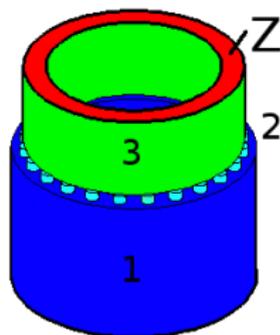
$$\int_{R_{1i}}^{R_{1o}} \int_{\theta^i - \pi\beta}^{\theta^i + \pi\beta} (\dot{m}_1)' r dr d\theta = (\dot{m}_2^i)'$$



# Le equazioni del disturbo

- condizioni alle interfacce:
- condizioni acustiche al contorno: **hard wall**
- modello di rilascio termico:

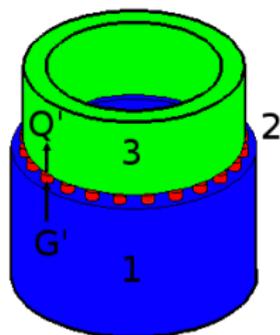
$$Z = \frac{p'}{u'} \longrightarrow \infty$$



# Le equazioni del disturbo

- condizioni alle interfacce:
- condizioni acustiche al contorno:
- modello di rilascio termico: **FTF**

$$F(\omega) = \frac{Q'/\bar{Q}}{G'/\bar{G}} = \kappa e^{-i\omega\tau}$$



# Il codice LOMTI

- Le grandezze rappresentative del sistema sono le ampiezze delle perturbazioni:

$$[\mathbf{M}] \cdot \mathbf{x} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{x} = \left\{ \begin{array}{c} A_n^+ \\ A_n^- \\ A_n^e \\ \hat{Q} \end{array} \right\}$$

- La matrice dei coefficienti  $[\mathbf{M}]$  è funzione della sola variabile  $\omega = \omega_r + i\omega_j$ . Il sistema ammette soluzione non banale solo se  $\det([\mathbf{M}]) = 0$ .

# Il codice LOMTI

- Le grandezze rappresentative del sistema sono le ampiezze delle perturbazioni:

$$[\mathbf{M}] \cdot \mathbf{x} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{x} = \left\{ \begin{array}{c} A_n^+ \\ A_n^- \\ A_n^e \\ \hat{Q} \end{array} \right\}$$

- La matrice dei coefficienti  $[\mathbf{M}]$  è funzione della sola variabile  $\omega = \omega_r + i\omega_i$ . Il sistema ammette soluzione non banale solo se  $\det([\mathbf{M}]) = 0$ .

# Outline

- 1 Instabilità termoacustiche
  - Il fenomeno dell'Humming
  - Il codice LOMTI
- 2 Calibrazione su un modello ad elementi finiti
  - Confronto senza perturbazioni della fiamma
  - Confronto con perturbazioni della fiamma
- 3 Studi parametrici
- 4 Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico
- 5 Conclusioni e sviluppi futuri

## Confronto senza perturbazioni della fiamma

- è necessario calibrare la geometria semplificata del LOMTI per trovare le dimensioni acustiche equivalenti di ognuno dei condotti:
  - lunghezza  $L$ , raggio medio  $R$  e spessore  $d$  del plenum e della camera di combustione;
  - lunghezza  $L$  e area trasversale  $A$  di ognuno dei 24 premixers.
- è stato utilizzato un codice commerciale ad elementi finiti per ottenere i valori dei modi caratteristici della geometria reale.\*

\* Politecnico di Bari

## Confronto senza perturbazioni della fiamma

- è necessario calibrare la geometria semplificata del LOMTI per trovare le dimensioni acustiche equivalenti di ognuno dei condotti:
  - lunghezza  $L$ , raggio medio  $R$  e spessore  $d$  del plenum e della camera di combustione;
  - lunghezza  $L$  e area trasversale  $A$  di ognuno dei 24 premixers.
- è stato utilizzato un codice commerciale ad elementi finiti per ottenere i valori dei modi caratteristici della geometria reale.\*

\* Politecnico di Bari

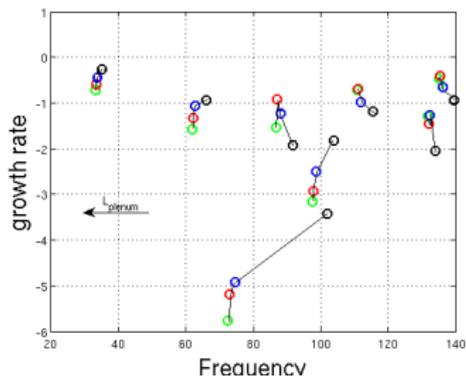
## Matching delle condizioni operative

Temperatura all'ingresso	683.15 K
Pressione all'ingresso	16.43 bar
Temperatura della fiamma	1736 K
Portata massica	0
Condizioni al contorno (inlet/outlet)	$u' = 0$
Nessuna perturbazione di fiamma	$Q' = 0$

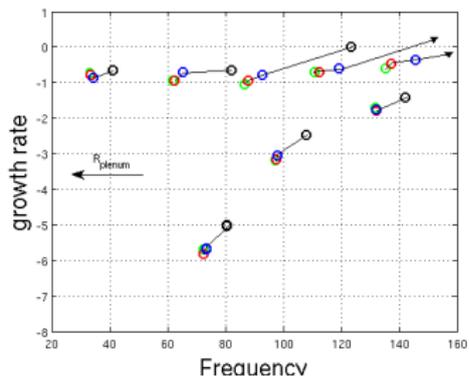
Tabella: Parametri di input per la simulazione FEM.

# Studi preliminari

## Alcuni esempi



(a)



(b)

**Figura:** (a): variazione dei modi in funzione della lunghezza del plenum.  $\circ$ :  $L_{plenum} = 1.24$  m;  $\circ$ :  $L_{plenum} = 1.2$  m;  $\circ$ :  $L_{plenum} = 1$  m;  $\circ$ :  $L_{plenum} = 0.8$  m; (b): effetto della variazione del raggio.  $\circ$ :  $R_{plenum} = 3.249$  m;  $\circ$ :  $R_{plenum} = 3.2$  m;  $\circ$ :  $R_{plenum} = 2.5$  m;  $\circ$ :  $R_{plenum} = 2$  m;

# Geometria ottimale

## Plenum

### Geometria ottimale

Lunghezza del plenum $L_{plenum}$	2.3 m
Raggio del plenum $R_{plenum}$	1.7 m
Spessore del plenum $d_{plenum}$	0.435 m
Volume del plenum $V_{plenum}$	10.68 m <sup>3</sup>

# Geometria ottimale

## Premixers

	Geometria ottimale
Lunghezza dei premixers $L_{premixer}$	0.142 m
Area premixers $A_{premixer}$	0.034 m <sup>2</sup>

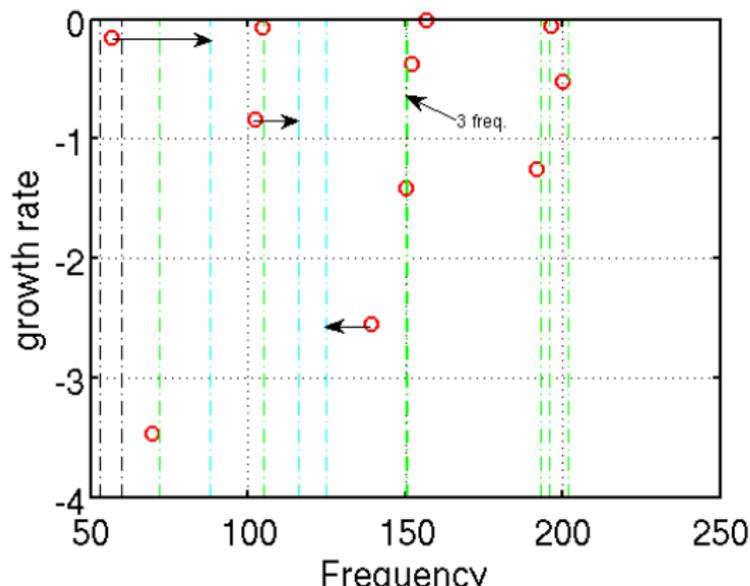
# Geometria ottimale

## Camera di combustione

### Geometria ottimale

Lunghezza combustione $L_{CC}$	1.3 m
Raggio combustione $R_{CC}$	1.55 m
Spessore combustione $d_{CC}$	0.355 m
Volume combustione $V_{CC}$	4.495 m <sup>3</sup>

# Spettro delle frequenze



Confronto fra le frequenze ottenute in LOMTI e in COMSOL. **o**: modi ottenuti con LOMTI; **- · - · -** modi ottenuti con COMSOL con buona concordanza; **- · - · -** non buona concordanza; **- · - · -** non rilevati.

# Modo a 72 Hz

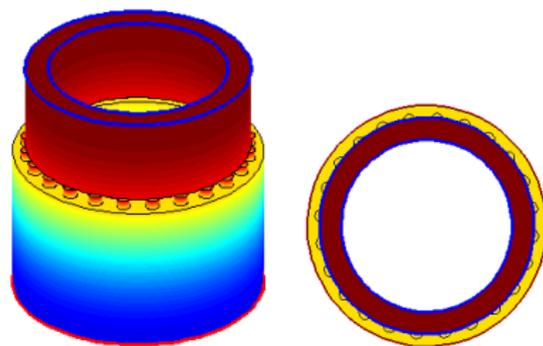
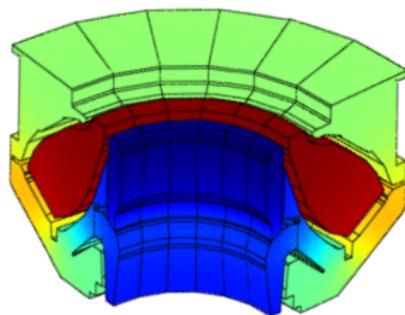
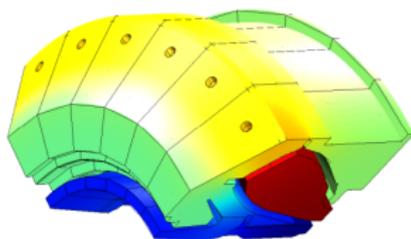


Figura: Mode shape per il modo  $n = 0$ , ottenuto a 72 Hz con COMSOL e 70 Hz con LOMTI.

# Modo a 105 Hz

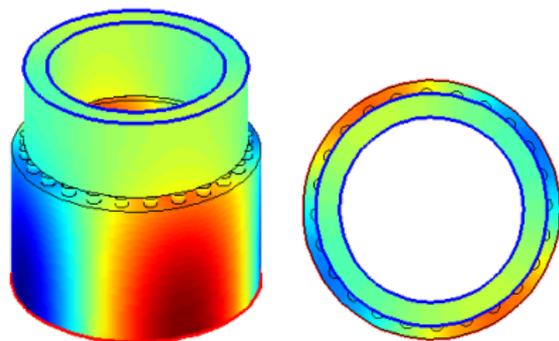
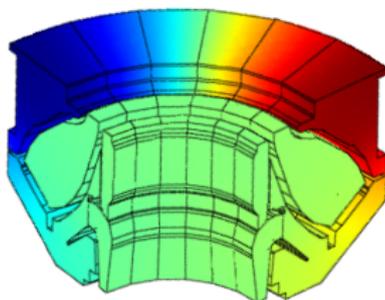
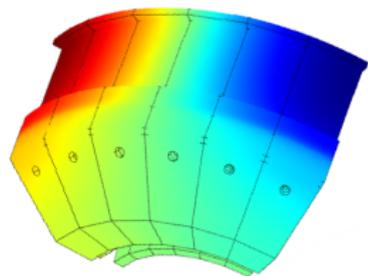


Figura: Mode shape per il modo  $n = 2$ , ottenuto a 105 Hz con COMSOL e 105 Hz con LOMTI.

# Modo a 116 Hz

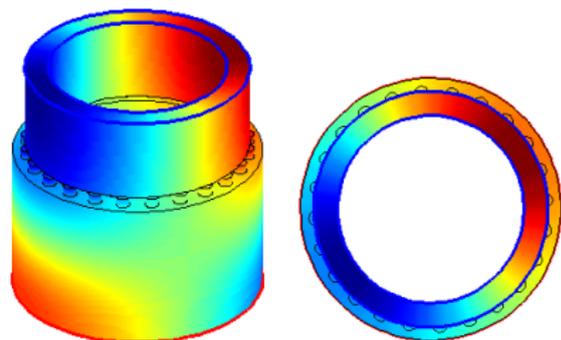
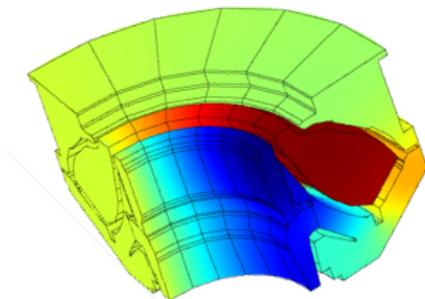
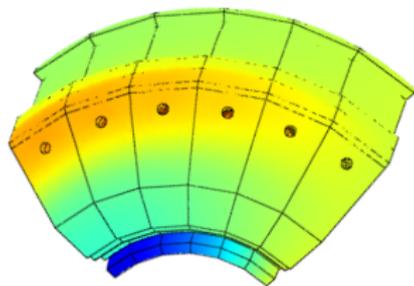


Figura: Mode shape per il modo  $n = 1$ , ottenuto a 116 Hz con COMSOL e 102 Hz con LOMTI.

# Modo a 193 Hz

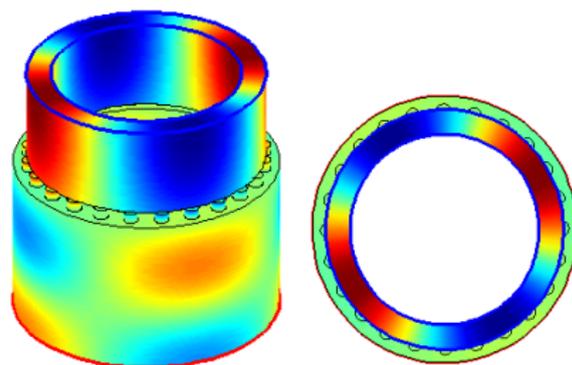
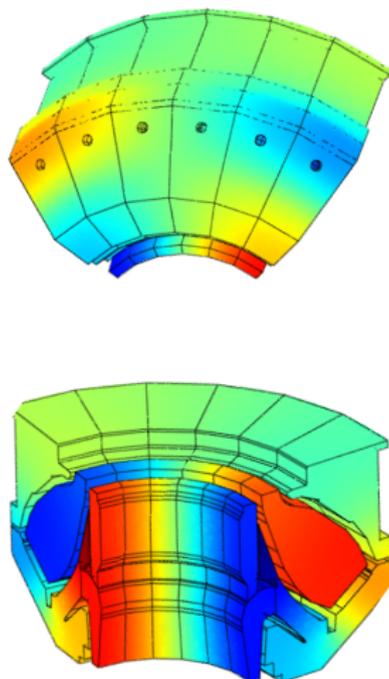


Figura: Mode shape per il modo  $n = 2$ , ottenuto a 193 Hz con COMSOL e 191 Hz con LOMTI.

# Confronto con perturbazioni della fiamma

Simulazione con perturbazioni di rilascio termico attive ( $\kappa \neq 0$ )

$$Q'(t) = 0 \quad \rightsquigarrow \quad \frac{Q'(t)}{Q} = -\kappa \frac{u'_{ref}}{u_2} e^{-i\omega\tau}$$

I valori dei parametri  $\kappa$  e  $\tau$  devono essere confrontati con quelli imposti nella simulazione ad elementi finiti. Inoltre deve essere implementato lo stesso punto di riferimento.

# Frequenze ottenute

Numero	COMSOL	LOMTI	Concordanza senza fiamma
1	52+i	-	non rilevato
2	58+i	-	non rilevato
<b>3</b>	<b>84+i</b>	<b>54-130i</b>	<b>buona</b>
4	90	48+45i	non buona
<b>5</b>	<b>102+5i</b>	<b>103-27i</b>	<b>buona</b>
6	112-48i	142+42i	non buona
7	121-i	118+45i	non buona
<b>8</b>	<b>147+3i</b>	<b>149+2i</b>	<b>buona</b>
<b>9</b>	<b>144+9i</b>	<b>150+4i</b>	<b>buona</b>
<b>10</b>	<b>155-16i</b>	<b>157+16i</b>	<b>buona</b>
11	164+3i	-	non rilevato
12	187+2i	-	non rilevato
<b>13</b>	<b>192</b>	<b>188-85i</b>	<b>buona</b>
<b>14</b>	<b>198+20i</b>	<b>201+18i</b>	<b>buona</b>
<b>15</b>	<b>201-i</b>	<b>186+44i</b>	<b>buona</b>
16	206+i	-	non rilevato

**Tabella:** Confronto fra LOMTI e COMSOL. Risultati ottenuti per  $\kappa = 1$ . L'ultima colonna si riferisce alla concordanza ottenuta con  $Q' = 0$ .

# Outline

- 1 **Instabilità termoacustiche**
  - Il fenomeno dell'Humming
  - Il codice LOMTI
- 2 **Calibrazione su un modello ad elementi finiti**
  - Confronto senza perturbazioni della fiamma
  - Confronto con perturbazioni della fiamma
- 3 **Studi parametrici**
- 4 **Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico**
- 5 **Conclusioni e sviluppi futuri**

# Studi parametrici

- influenza delle dimensioni della camera di combustione
- parametri della FTF  $\kappa - \tau$
- influenza della FTF

# L'influenza delle dimensioni della camera di combustione: lunghezza

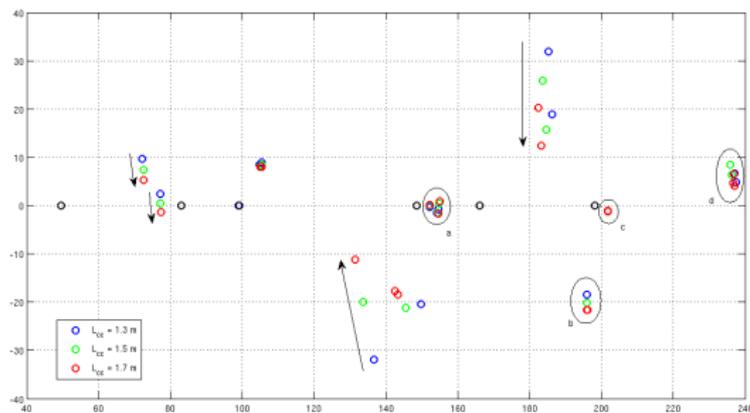
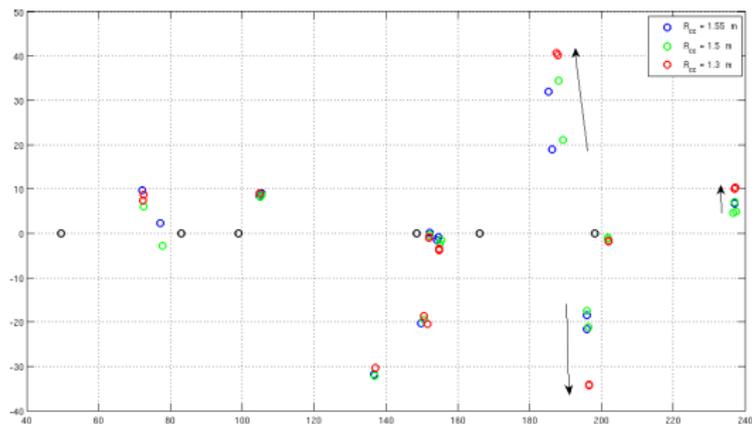


Figura: ●  $L_{cc} = 1.3 \text{ m}$ ; ●  $L_{cc} = 1.5 \text{ m}$ ; ●  $L_{cc} = 1.7 \text{ m}$ ;

# L'influenza delle dimensioni della camera di combustione: raggio medio



# L'influenza dei parametri $\tau$ e $\kappa$

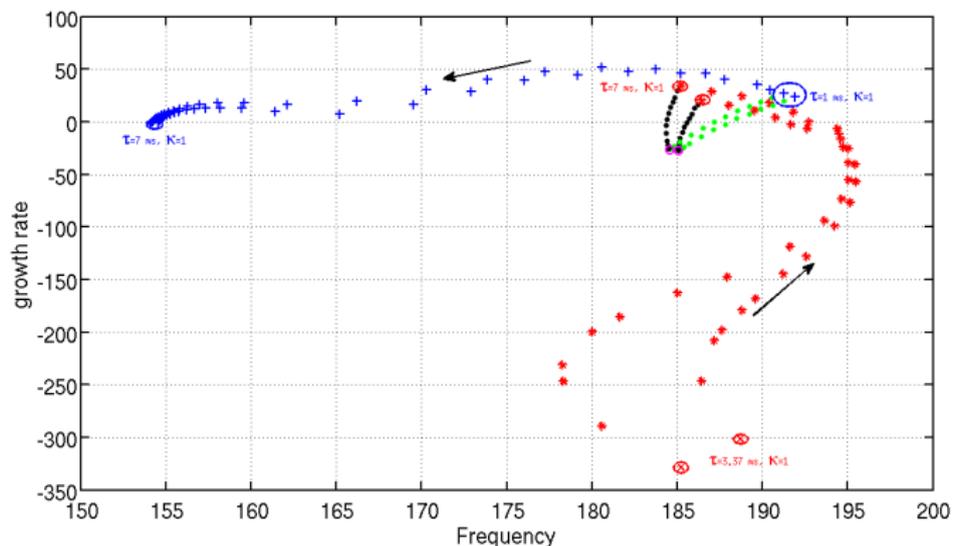
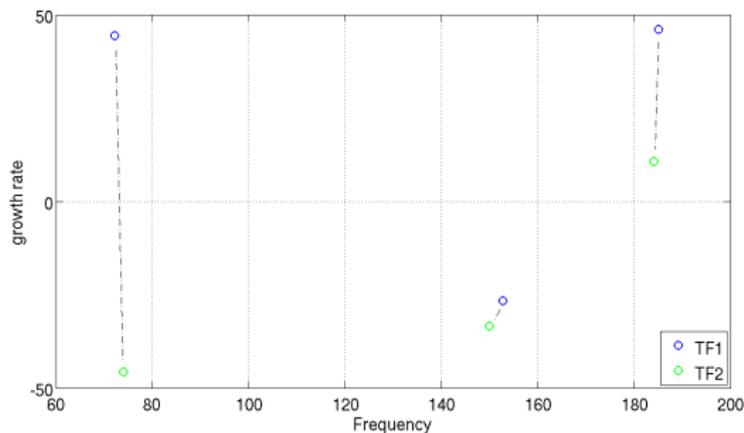


Figura: Modi vicino a 170Hz per differenti valori di  $\kappa$  e  $\tau$ .

# Confronto fra diverse FTF



$$TF1 : \frac{Q'}{\bar{Q}} = \kappa \frac{\dot{m}'}{\dot{m}} e^{-i\omega\tau}$$

$$TF2 : \frac{Q'}{\bar{Q}} = \kappa \frac{u'}{\bar{u}} e^{-i\omega\tau}$$

# Outline

- 1 Instabilità termoacustiche
  - Il fenomeno dell'Humming
  - Il codice LOMTI
- 2 Calibrazione su un modello ad elementi finiti
  - Confronto senza perturbazioni della fiamma
  - Confronto con perturbazioni della fiamma
- 3 Studi parametrici
- 4 Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico
- 5 Conclusioni e sviluppi futuri

# Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico

## L'espressione analitica

$$Q^* = \frac{\dot{m}_F H_i}{A} \quad \dot{m} = \rho_{flame} u_{flame} A_{flame} \quad \alpha = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_F}$$

$$\frac{Q'}{\bar{Q}} = \frac{\rho'_{flame}}{\bar{\rho}_{flame}} + \frac{u'_{flame}}{\bar{u}_{flame}} - \frac{\alpha'_{flame}}{\bar{\alpha}_{flame} + 1} \quad \rho = \sum_i \rho_i = \rho_{air} + \rho_F$$

## L'espressione finale della FTF:

$$\frac{Q'}{\bar{Q}} = \frac{\rho'_{flame}}{\bar{\rho}_3} + \frac{u'_{flame}}{\bar{u}_3} - \frac{\bar{\alpha} + \frac{PM_{air}}{PM_F}}{\bar{\alpha} + 1} \cdot \frac{\rho'_{inj}}{\bar{\rho}_2} e^{-i\omega\tau}$$

\* [W/m<sup>2</sup>]

# Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico

## Il significato fisico

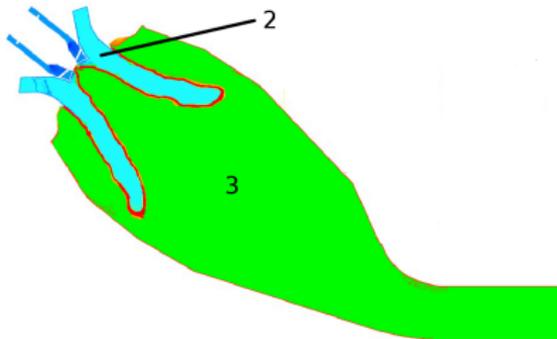


Figura: Modello conforme alla realtà

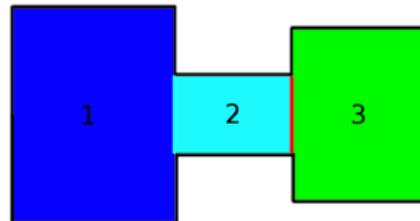


Figura: Modello LOMTI a parametri concentrati

# Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico

## Risultati

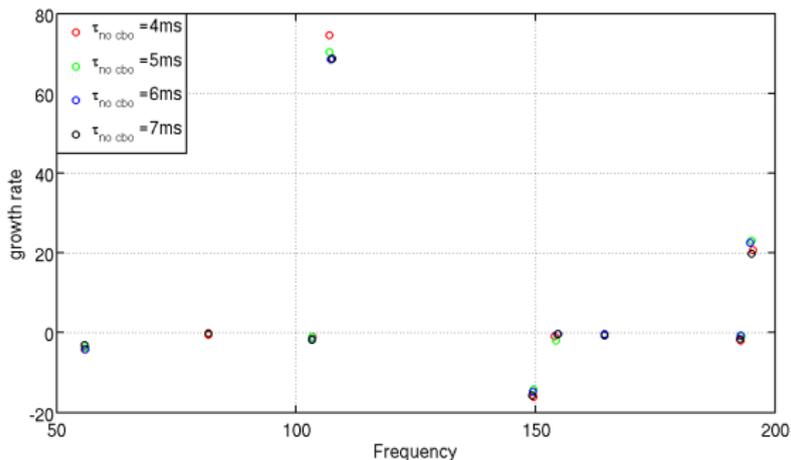


Figura: Risultati per  $x_{inj} = \frac{1}{2} L_{premixer}$ .

# Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico

## Risultati

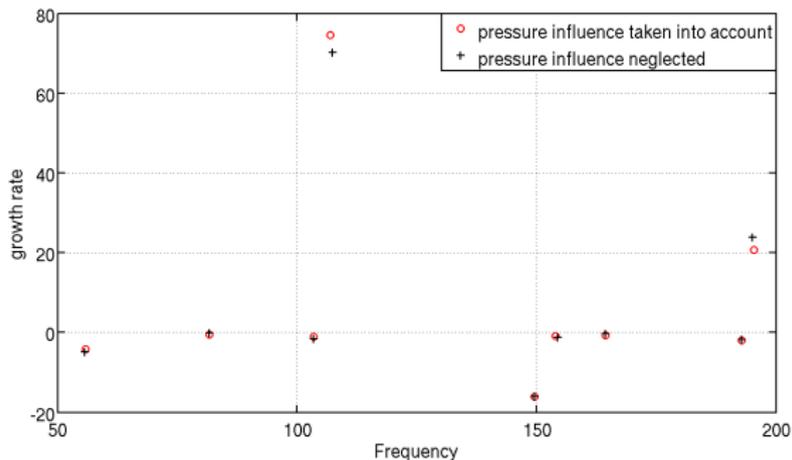


Figura: Risultati per la funzione di trasferimento semplificata.

# Outline

- 1 Instabilità termoacustiche
  - Il fenomeno dell'Humming
  - Il codice LOMTI
- 2 Calibrazione su un modello ad elementi finiti
  - Confronto senza perturbazioni della fiamma
  - Confronto con perturbazioni della fiamma
- 3 Studi parametrici
- 4 Nuova funzione di trasferimento del rilascio termico
- 5 Conclusioni e sviluppi futuri

# Conclusioni

- È stata mostrata un'ottima corrispondenza nei risultati fra due approcci completamente differenti come un modello FEM e uno a parametri concentrati mediante una **calibrazione** del codice LOMTI.
- È stata mostrata l'**influenza di alcuni parametri** sull'insorgere di instabilità in una camera di combustione.
- Diverse **transfer functions** per il modello di fiamma sono state analizzate.

## Sviluppi futuri

- Sviluppo di un codice in grado di suddividere camera di combustione e plenum in **più condotti**.
- Implementazione di un **MEX file** che interfacci MATLAB con un codice compilato per calcolare il determinante.
- Sviluppo e validazione della **flame transfer function**.
  - Sostituire  $\rho_{flame} U_{flame} A_{flame}$  con  $\rho_u S_T A(\omega)$ .
- Studi (sia numerici che di carattere tecnico) sull'inserimento di controlli passivi (**risuonatori di Helmholtz**).

# Criteri integrali

Il criterio di Rayleigh:

$$\int_T \int_{\Omega} p'(\mathbf{x}, t) \cdot q'(\mathbf{x}, t) dV dt > \int_T \int_{\Sigma} p' \mathbf{v}' \cdot d\mathbf{A} dt$$

Contributo delle fluttuazioni di entropia

$$\int_T \int_{\Omega} \left( \frac{T' q'}{\bar{T}} - \frac{\bar{p}}{R c_p} s' \mathbf{v}' \cdot \nabla \bar{s} \right) dV dt > 0.$$

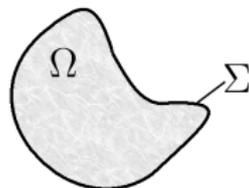


Figura: Sistema in esame.

# Espressione delle perturbazioni

$$\rho' = \sum_{n=-N_n/2+1}^{N_n/2} \left( A_n^+ e^{ik^+x} + A_n^- e^{ik^-x} \right) B_{n,m}(r) e^{i\omega t + in\theta},$$

$$\rho' = \sum_{n=-N_n/2+1}^{N_n/2} \frac{1}{c^2} \left[ \left( A_n^+ e^{ik^+x} + A_n^- e^{ik^-x} \right) B_{n,m}(r) - A_n^e e^{ik^0x} E(r) \right] e^{i\omega t + in\theta},$$

$$u' = \sum_{n=-N_n/2+1}^{N_n/2} -\frac{1}{\bar{\rho}} \left( \frac{k^+}{\alpha^+} A_n^+ e^{ik^+x} + \frac{k^-}{\alpha^-} A_n^- e^{ik^-x} \right) B_{n,m}(r) e^{i\omega t + in\theta},$$

$$v' = \sum_{n=-N_n/2+1}^{N_n/2} \frac{i}{\bar{\rho}} \left( \frac{1}{\alpha^+} A_n^+ e^{ik^+x} + \frac{1}{\alpha^-} A_n^- e^{ik^-x} \right) \frac{dB_{n,m}(r)}{dr} e^{i\omega t + in\theta},$$

$$w' = \sum_{n=-N_n/2+1}^{N_n/2} -\frac{n}{r\bar{\rho}} \left( \frac{1}{\alpha^+} A_n^+ e^{ik^+x} + \frac{1}{\alpha^-} A_n^- e^{ik^-x} \right) B_{n,m}(r) e^{i\omega t + in\theta},$$

$$T' = \sum_{n=-N_n/2+1}^{N_n/2} \frac{1}{c_p \bar{\rho}} \left[ \left( A_n^+ e^{ik^+x} + A_n^- e^{ik^-x} \right) B_{n,m}(r) + \frac{1}{\gamma - 1} A_n^e e^{ik^0x} E(r) \right] e^{i\omega t + in\theta},$$

$$Q' = \hat{Q} e^{i\omega t}$$

## Modo a 88 Hz

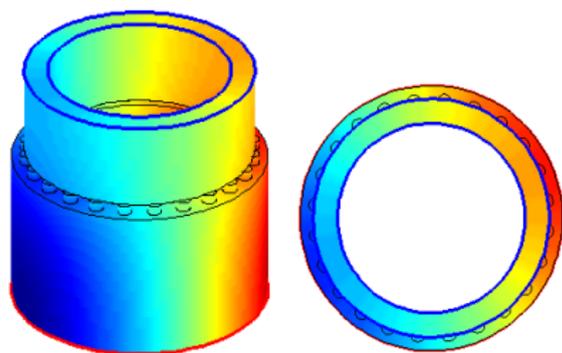
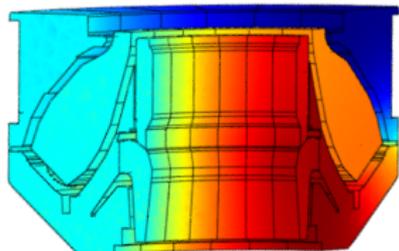
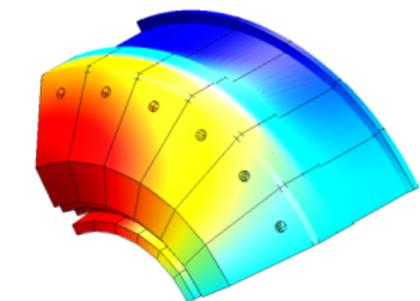


Figura: Mode shape per il modo  $n = 1$ , ottenuto a 88 Hz con COMSOL e 56 Hz con LOMTI.

## Modo a 125 Hz

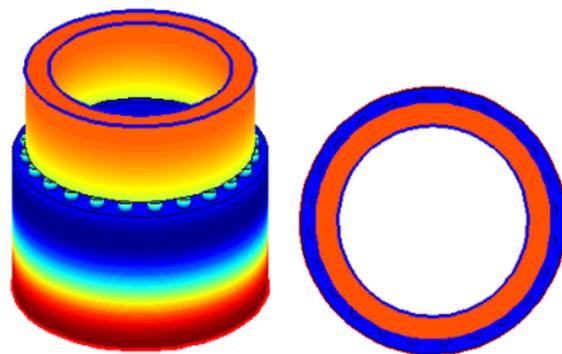
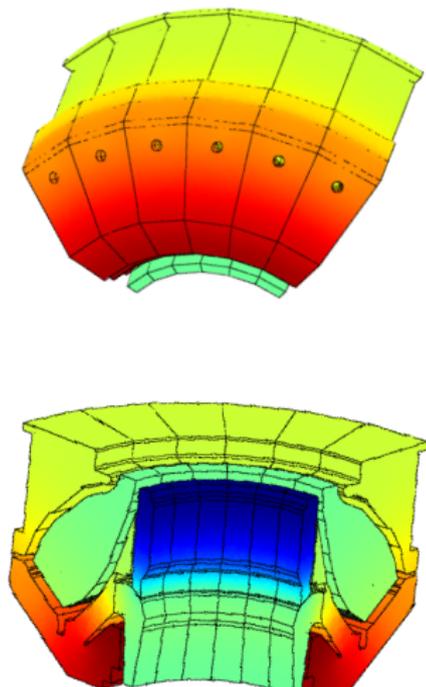


Figura: Mode shape per il modo  $n = 0$ , ottenuto a 125 Hz con COMSOL e 139 Hz con LOMTI.

## Modo a 150.1 Hz

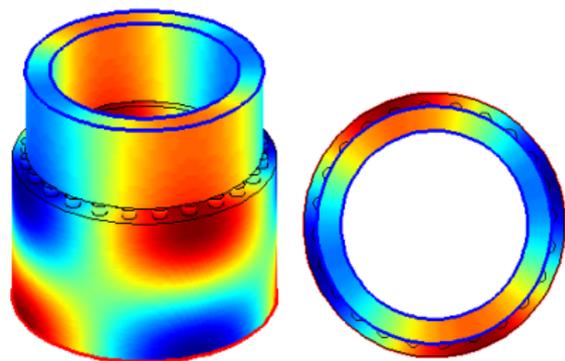
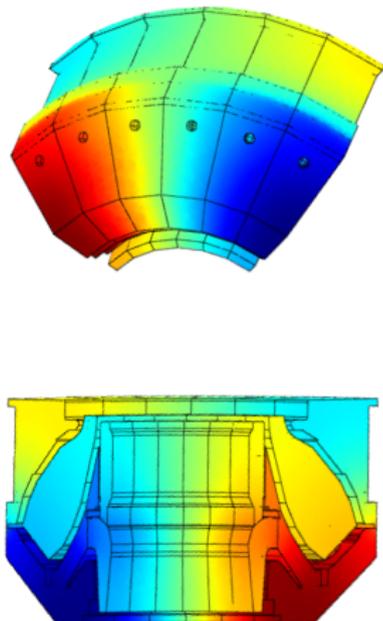


Figura: Mode shape per il modo  $n = 2$ , ottenuto a 150.1 Hz con COMSOL e 156 Hz con LOMTI.

## Modo a 150.4 Hz

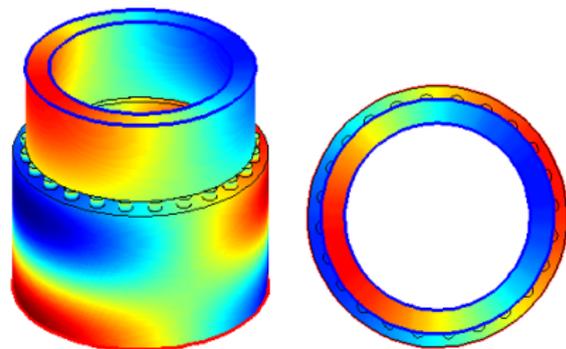
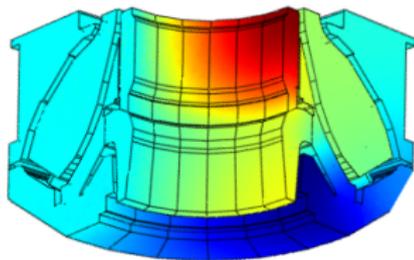
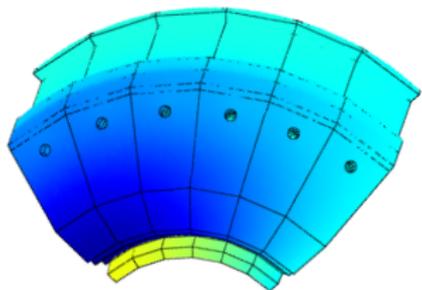


Figura: Mode shape per il modo  $n = 1$ , ottenuto a 150.4 Hz con COMSOL e 150 Hz con LOMTI.

## Modo a 150.5 Hz

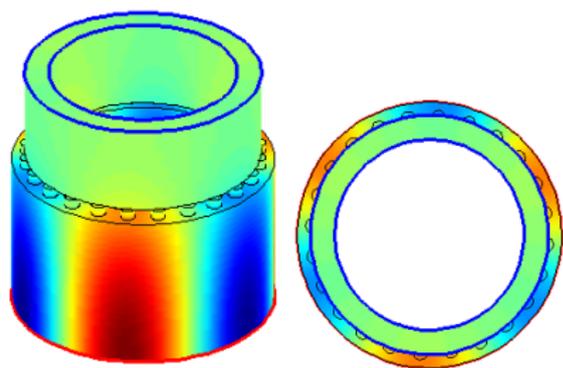
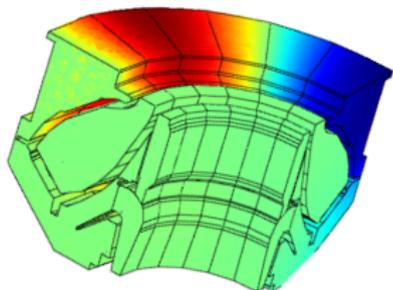
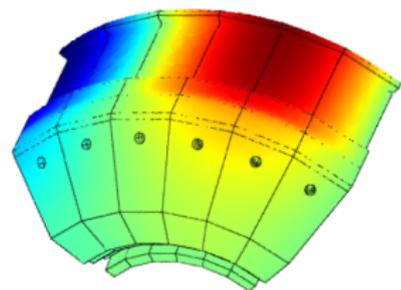


Figura: Mode shape per il modo  $n = 3$ , ottenuto a 150.5 Hz con COMSOL e 152 Hz con LOMTI.

## Modo a 196 Hz

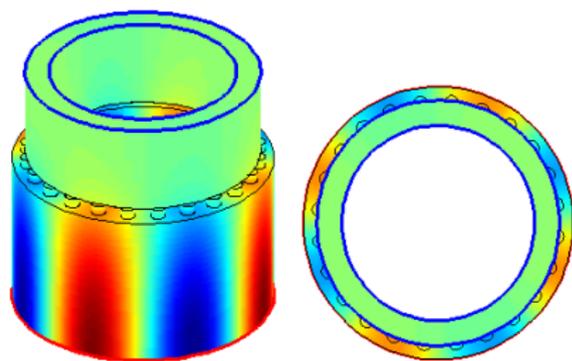
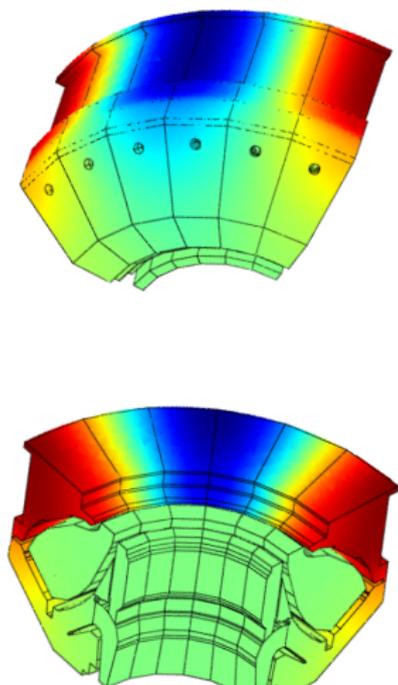


Figura: Mode shape per il modo  $n = 4$ , ottenuto a 196 Hz con COMSOL e 200 Hz con LOMTI.

## Modo a 202 Hz

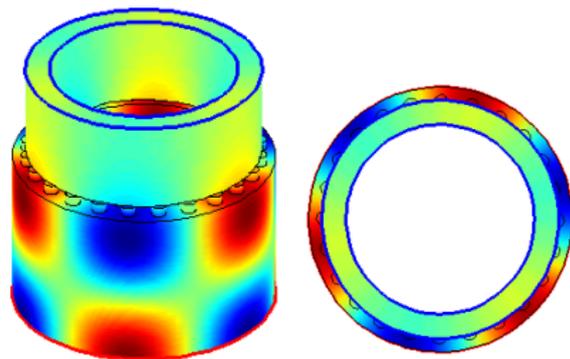
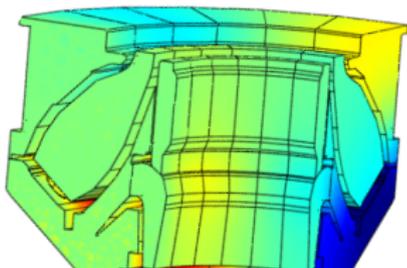
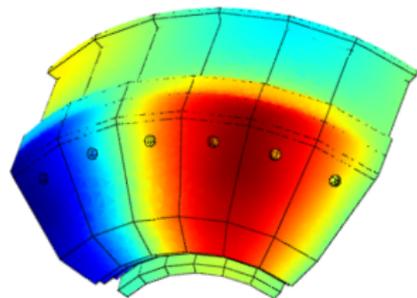
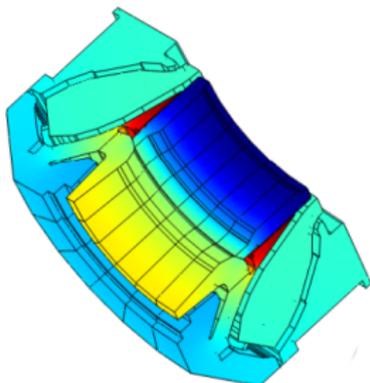


Figura: Mode shape per il modo  $n = 3$ , ottenuto a 196 Hz con COMSOL e 196 Hz con LOMTI.

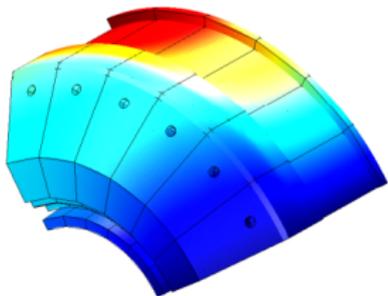
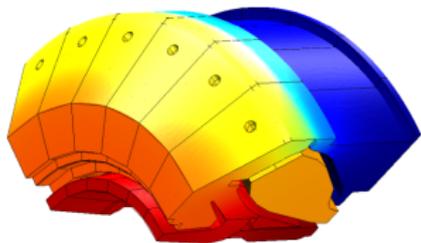
## Modi non rilevabili

### Attenzione...

Tre modi rilevati con COMSOL a 165, 188 e 206 Hz non sono rilevabili con LOMTI perché si sviluppano in un settore non rappresentato.



## Modi non rilevati



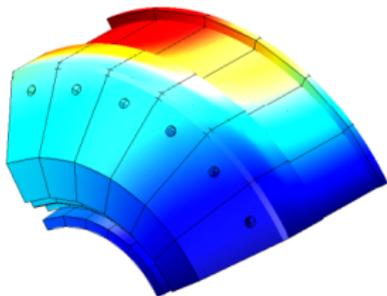
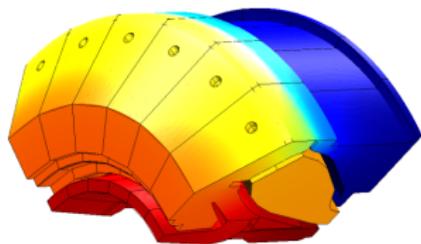
### Attenzione!

Due modi ottenuti con COMSOL non sono stati rilevati con LOMTI.

### Soluzione.

Sembrano comunque svilupparsi nelle zone non rappresentate.

## Modi non rilevati



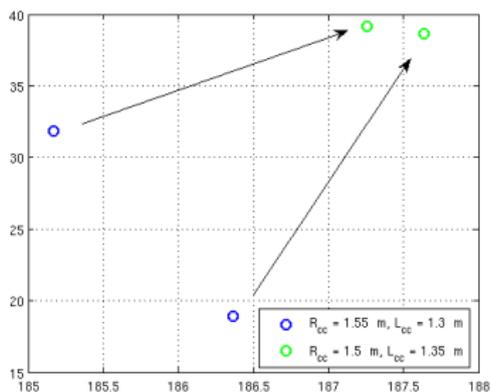
### Attenzione!

Due modi ottenuti con COMSOL non sono stati rilevati con LOMTI.

### Soluzione.

Sembrano comunque svilupparsi nelle zone non rappresentate.

# L'influenza delle dimensioni della camera di combustione



**Figura:** Modo vicino a 187Hz. Simultanea variazione di raggio e lunghezza.