



Ricerca di Sistema elettrico

Simulazione numerica del combustore di una μ TG Turbec T100 in regime di fuel- flexibility

A. Di Nardo, G. Calchetti, G. Messina

Simulazione numerica del combustore di una μ TG Turbec T100 in regime di fuel-flexibility
Antonio Di Nardo, Giorgio Calchetti, Giuseppe Messina
ENEA DTE-PCU-IPSE

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Generazione di energia con basse emissioni di carbonio

Progetto: Polo Tecnologico del SULCIS: Tecnologie e Metodologie "Low Carbon"

Parte A1 – Tecnologie per impiantistica energetica "low carbon"

Obiettivo: A.3 – Studi numerici e sperimentazione di 'fuel flexibility'

Task 2: Simulazioni numeriche per il passaggio da gas naturale a syngas sulla T100 di Zecomix

Responsabile del Progetto: Franca Rita Picchia, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DEI MODELLI UTILIZZATI.....	6
3 RISULTATI.....	10
4 CONCLUSIONI.....	17

Sommario

Nella precedente annualità si è iniziato ad affrontare il problema del passaggio da gas naturale a syngas di varia composizione, derivante ad esempio da gassificazione del carbone o dallo storage mediante Power2Gas. Sono state definite ed analizzate dal punto di vista della cinetica chimica (in particolare, per caratterizzarne la velocità laminare di fiamma) alcune tipologie di syngas (di diversa composizione); una di esse è stata selezionata. A partire dal funzionamento a solo gas naturale, sono quindi state effettuate alcune simulazioni RANS con funzionamento misto (gas naturale e syngas), fino a solo syngas al 100% del carico. Nella nuova annualità si intende proseguire il lavoro di simulazione con lo scopo di capire l'influenza della composizione della miscela combustibile e se la necessità di spillamento di aria continua ad essere un requisito fondamentale od è in qualche modo eliminabile.

1 Introduzione

Questo rapporto tratta lo studio della sezione combustore della micro turbina Turbec T100, già intrapreso nelle annualità precedenti. Il sistema Turbec T100 P MGT è stato progettato per funzionare a solo gas naturale. Il funzionamento in modalità Dual Fuel è possibile grazie al prototipo sviluppato da Ansaldo, denominato ARI 100 T2, e riportato nelle figure 1 e 2. Tale combustore è stato sviluppato per bruciare syngas ricchi di idrogeno e gas naturale, sia come combustibile secondario che come combustibile primario nella fase di avviamento. L'aria in uscita dal compressore entra nel combustore in controcorrente e viene addotta in camera di combustione con la funzione di comburente, di raffreddamento del liner e di raffreddamento dei prodotti della combustione prima di entrare in turbina. La testa del combustore ospita gli ugelli del combustibile ed i canali attraverso i quali fluisce una parte dell'aria, che è direttamente introdotta nella zona primaria. La sezione primaria premiscelata è provvista di uno swirler radiale e degli ugelli del combustibile. Sono presenti inoltre due serie di ugelli, una per il gas naturale ed una per il syngas. La sezione diffusiva si compone invece di 6 cannule per l'immissione del combustibile, di un flame holder, dei fori di immissione dell'aria e del sistema di ignizione. Essendo il combustore Dual Fuel provvisto di ugelli sia per il gas naturale che per il syngas, necessita di un sistema di alimentazione per il syngas appositamente progettato, da aggiungere a quello per il gas naturale. Un sistema di condizionamento esterno (ECS) è stato quindi installato tra il PLC della macchina ed i due sistemi di alimentazione in modo che la macchina stessa possa funzionare in modalità Dual Fuel.

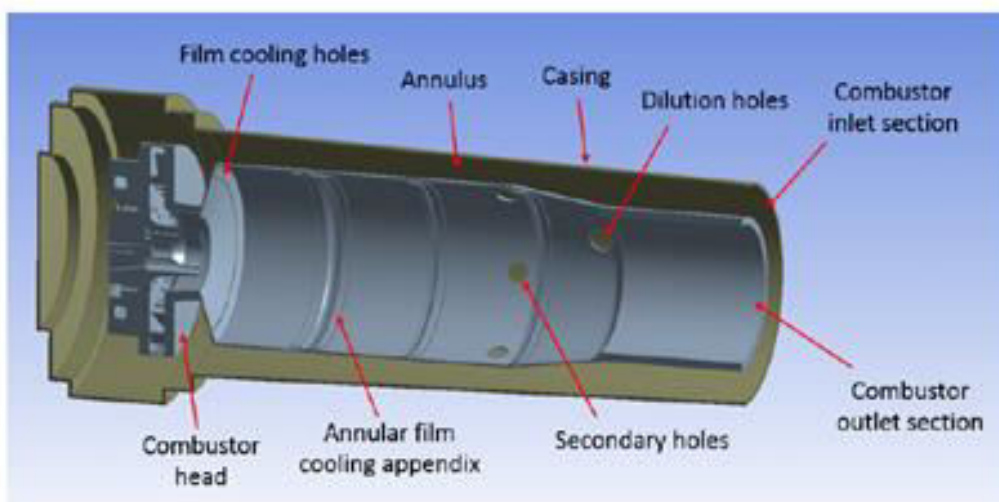


Figura 1. Sezione del combustore ARI 100 T2.

Nella precedente annualità si è iniziato ad affrontare il problema del passaggio da gas naturale a syngas di varia composizione, derivante ad esempio da gassificazione del carbone o dallo storage mediante Power2Gas. Sono state definite ed analizzate dal punto di vista della cinetica chimica (in particolare, per caratterizzarne la velocità laminare di fiamma) alcune tipologie di syngas (di diversa composizione); una di esse è stata selezionata. A partire dal funzionamento a solo gas naturale, sono quindi state effettuate alcune simulazioni RANS con funzionamento misto (gas naturale e syngas), fino a solo syngas al 100% del carico.

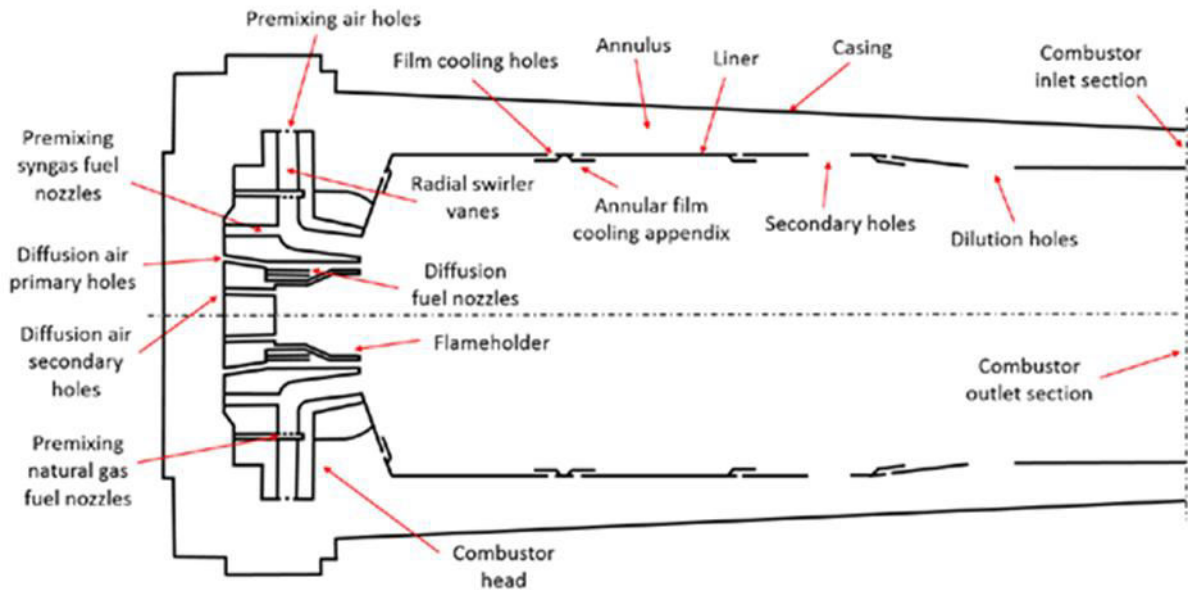


Figura 2. Schema del combustore dell'ARI 100 T2.

2 Descrizione dei modelli utilizzati

Nella nuova annualità si intende proseguire il lavoro di simulazione con lo scopo di capire se la necessità di spillamento di aria continua ad essere un requisito fondamentale od è in qualche modo eliminabile. Ripartendo dai risultati ottenuti nella precedente annualità, sono state effettuate una serie di simulazioni a pieno carico e a carico parziale (50 %), con e senza spillamento di aria e a diverse composizioni della miscela combustibile.

Entrando più nel dettaglio delle simulazioni, essendo il numero di Mach inferiore a 0.3 è stato utilizzato un approccio incompressibile. Per la turbolenza è stato utilizzato il modello Reynolds-Stress Model, che risulta essere il più adatto nel trattare flussi ad elevato numero di swirl, mentre il modello adottato per l'interazione chimica-turbolenza è il modello Eddy Dissipation Concept, in grado di modellare correttamente regimi di combustione sia premiscelati che diffusivi. Il meccanismo cinetico adottato prevede 46 reazioni chimiche e 17 specie. Le proprietà di trasporto sono state calcolate con la teoria cinetica e sono stati considerati sia i fenomeni di diffusione differenziale che l'effetto Soret, siccome si è in presenza di specie leggere come l'idrogeno. Per modellare l'irraggiamento termico si è scelto il modello Discrete Ordinates, fissando un'emissività globale pari a 0.862 per le superfici solide del combustore fatte di Hastelloy X.

Le simulazioni sono state condotte con il software ANSYS-FLUENT™, che è basato sul metodo dei volumi finiti. L'algoritmo SIMPLE, adatto per flussi incompressibili, è stato utilizzato per il calcolo della pressione, a partire da un'equazione di correzione della pressione ottenuta dall'equazione della continuità e della quantità di moto.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + & \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}) & \end{aligned} \quad (2.2)$$

dove u è la velocità media, u' la fluttuazione di velocità, p la pressione statica, μ la viscosità molecolare e ρ la densità. Per la turbolenza è stato utilizzato un approccio RANS, essendo quello LES non fattibile in questo caso così complesso. In particolare si è adottato il modello degli stress di Reynolds, che abbandonando l'ipotesi di turbolenza isotropa, risolve le sette equazioni di trasporto per gli sforzi di Reynolds e per il rate di dissipazione turbolento. Il modello offre una maggiore accuratezza rispetto ai classici modelli a due equazioni, in particolare per esempio per i flussi swirlati.

L'equazione di trasporto delle specie è:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_k) = \frac{\partial J_j^k}{\partial x_j} + R_k \quad (2.3)$$

dove Y_k è la frazione di massa e J_{jk} il flusso diffusivo turbolento:

$$J_j^k = - \left(\rho D_k + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \quad (2.4)$$

qui Sc_t è il numero di Schmidt turbolento, D_k il coefficiente di diffusione molecolare, μ_t la viscosità turbolenta e R_k il termine sorgente dovuto alle reazioni chimiche.

L'equazione di trasporto dell'energia totale E è:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = & \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_r & \end{aligned} \quad (2.5)$$

dove T è la temperatura, S_r è il termine sorgente dovuto alle reazioni e all'irraggiamento, τ_{ij} è il tensore degli stress e k_{eff} la conducibilità termica effettiva (molecolare più turbolenta):

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (2.6)$$

Per modellare l'interazione chimica-turbolenza è stato scelto il modello Eddy Dissipation Concept, insieme al meccanismo cinetico riportato sotto in dettaglio. Il modello assume che le reazioni avvengano nelle cosiddette strutture fini, dove l'energia turbolenta viene trasferita dalle scale di dimensione maggiore e dissipata e il mescolamento avviene a livello molecolare. Le strutture fini sono modellate come reattori perfettamente miscelati secondo la legge di Arrhenius. Le strutture fini si assume abbiano quindi la scala di Kolmogorov:

$$\xi^* = C_\xi \left(\frac{\nu \mathcal{E}}{k^2} \right)^{1/4} \quad (2.7)$$

$C_\xi=2.1377$.

Inoltre le reazioni chimiche avvengono su scala temporale:

$$\tau^* = C_r \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \tag{2.8}$$

dove $C_r=0.4082$, ν la viscosità cinematica ed ε il dissipation rate dell'energia cinetica turbolenta k . Il termine sorgente R_k nell'equazione delle specie è determinato come:

$$R_k = \frac{\rho \left(\frac{\xi^*}{\tau^*} \right)^2}{\tau^* \left[1 - \left(\frac{\xi^*}{\tau^*} \right)^3 \right]} \left(Y_{k^*} - Y_i \right) \tag{2.9}$$

dove Y_{k^*} è la frazione di massa dopo la reazione.

Per l'irraggiamento è stato applicato il modello Discrete Ordinates, che risolve l'equazione di trasferimento radiativo:

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (a + \sigma_s) \cdot I(r,s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s) \cdot \Phi(s \cdot s') \cdot d\Omega' \tag{2.10}$$

per un numero finito di angoli solidi Ω , ognuno associato ad una direzione fissata s rispetto al sistema di riferimento cartesiano globale. In questo modo vengono risolte un numero di equazioni per quante sono le direzioni. Nella precedente equazione I è l'intensità radiativa, n l'indice di rifrazione, a il coefficiente di assorbimento, T la temperatura, σ_s il coefficiente di dispersione, σ il costante di Stefan-Boltzmann e ϕ la funzione di fase. Le proprietà di assorbimento ed emissività del gas sono calcolate con il modello WSGG, con il quale la miscela gassosa è modellata come una miscela di gas grigi per quanto riguarda le proprietà di assorbimento ed emissione.

La mesh è stata realizzata a elementi tetraedrici, poi convertiti in elementi poliedrici, per un totale di circa dieci milioni di celle di calcolo (fig. 3). Uno dei principali vantaggi delle celle poliedriche è che ogni cella ha molte celle vicine (tipicamente dell'ordine dieci), quindi i gradienti possono essere approssimati molto meglio di quanto non avvenga con le celle tetraedriche. Anche lungo le pareti è probabile che una cella poliedrica abbia un paio di celle vicine. Il maggior numero di operazioni di calcolo e storage è poi compensato da una maggiore precisione e complessivamente comunque l'adozione di celle poliedriche consente di avere delle mesh con un numero totale di elementi molto inferiore, tipicamente dell'ordine di quattro/cinque ed una convergenza più rapida.

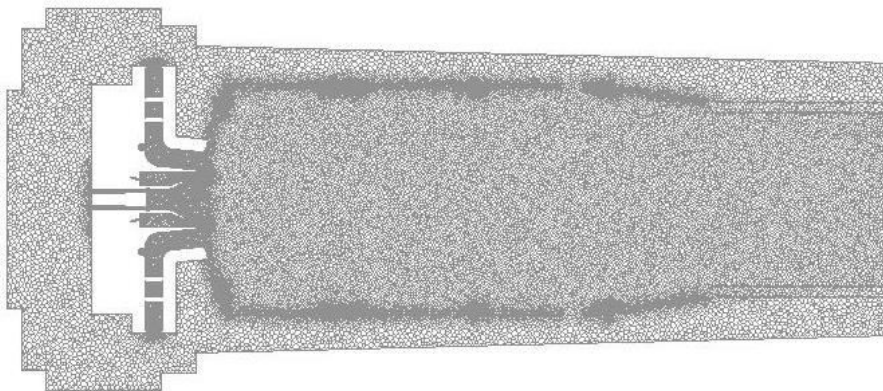


Figura 3. Mesh a elementi poliedrici.

MECCANISMO CINETICO

ELEMENTS

C H O N

END

SPECIES

CH4 CH3 H O2 HO2 H2 O OH H2O CH2O HCO CO CO2 CH3O N2 H2O2 N

END

THERMO

END

REACTIONS CAL/MOLE

! units are moles, cubic centimeters, seconds, Kelvins and calories/mole.

CH4+M=CH3+H+M	1.E+17	0.00	86000.0
CH4+O2=CH3+HO2	7.9E+13	0.00	56000.0
CH4+H=CH3+H2	2.2E+04	3.00	8750.0
CH4+O=CH3+OH	1.6E+06	2.36	7400.0
CH4+OH=CH3+H2O	1.6E+06	2.10	2460.0
CH2O+OH=HCO+H2O	7.53E+12	0.00	167.0
CH2O+H=HCO+H2	3.31E+14	0.00	10500.0
CH2O+M=HCO+H+M	3.31E+16	0.00	81000.0
CH2O+O=HCO+OH	1.81E+13	0.00	3082.0
HCO+OH=CO+H2O	5.E+12	0.00	0.0
HCO+M=H+CO+M	1.6E14	0.00	14700.0
HCO+H=CO+H2	4.E+13	0.00	0.0
HCO+O=OH+CO	1.E+13	0.00	0.0
HCO+O2=HO2+CO	3.E+12	0.00	0.0
CO+O+M=CO2+M	3.2E+13	0.00	-4200.0
CO+OH=CO2+H	1.51E+07	1.30	-758.0
CO+O2=CO2+O	1.6E+13	0.00	41000.0
CH3+O2=CH3O+O	7.E+12	0.00	25652.0
CH3O+M=CH2O+H+M	2.4E+13	0.00	28812.0
CH3O+H=CH2O+H2	2.E+13	0.00	0.0
CH3O+OH=CH2O+H2O	1.E+13	0.00	0.0
CH3O+O=CH2O+OH	1.E+13	0.00	0.0
CH3O+O2=CH2O+HO2	6.3E+10	0.00	2600.0
CH3+O2=CH2O+OH	5.2E13	0.00	34574.0
CH3+O=CH2O+H	6.8E+13	0.00	0.0
CH3+OH=CH2O+H2	7.5E+12	0.00	0.0
HO2+CO=CO2+OH	5.8E+13	0.00	22934.0
H2+O2=2OH	1.7E+13	0.00	47780.0
OH+H2=H2O+H	1.17E+09	1.30	3626.0
H+O2=OH+O	2.2E+14	0.00	16800.0
O+H2=OH+H	1.8E+10	1.00	8826.0
H+O2+M=HO2+M	2.1E+18	-1.00	0.0
H2O/21./ H2/3.3/ N2/0./ O2/0./			
H+O2+O2=HO2+O2	6.7E+19	-1.42	0.0
H+O2+N2=HO2+N2	6.7E+19	-1.42	0.0
OH+HO2=H2O+O2	5.E+13	0.00	1000.0
H+HO2=2OH	2.5E+14	0.00	1900.0
O+HO2=O2+OH	4.8E+13	0.00	1000.0
2OH=O+H2O	6.E+08	1.30	0.0
H2+M=H+H+M	2.23E+12	0.50	92600.0
H2O/6./ H/2./ H2/3./			
O2+M=O+O+M	1.85E+11	0.50	95560.0
H+OH+M=H2O+M	7.5E+23	-2.60	0.0
H2O/20./			
H+HO2=H2+O2	2.5E+13	0.00	700.0
HO2+HO2=H2O2+O2	2.E+12	0.00	0.0
H2O2+M=OH+OH+M	1.3E+17	0.00	45500.0
H2O2+H=HO2+H2	1.6E+12	0.00	3800.0
H2O2+OH=H2O+HO2	1.E+13	0.00	1800.0

END

3 Risultati

Dal punto di vista generale, il campo fluidodinamico è caratterizzato dalla presenza di un vortice toroidale immediatamente all'uscita del combustore, generato dal flusso swirlato premiscelato aria/combustibile (fig. 4). Altre formazioni vorticosi sono localizzate intorno al flusso d'aria di diluizione e raffreddamento, che è ad alta velocità, e negli angoli della camera di combustione, lato testa. Nella zona in cui è alloggiato il flame holder si evidenzino diversi hot spots (fig. 5), dovuti al ricircolo ed al ristagno di parte del combustibile del pilota, che probabilmente è iniettato ad una velocità di efflusso troppo piccola. Il combustibile iniettato dagli ugelli syngas tende invece a stratificare e non riesce a miscelarsi completamente con l'aria, prima di entrare in camera di combustione (fig. 6). Pertanto la reazione avviene in condizioni di rapporto di equivalenza più alto rispetto a quello che in teoria dovrebbe essere. Dalla distribuzione della temperatura sulle pareti (fig. 7, 8) si evidenzia una escursione massima di 243 °C, e le zone più calde risultano quella in cui impatta il getto premiscelato e quindi la fiamma e la parte terminale del liner, che non è provvista di film cooling. La temperatura nella sezione di uscita varia grosso modo in senso radiale e presenta invece una delta massimo di circa 200 °C (fig. 9).

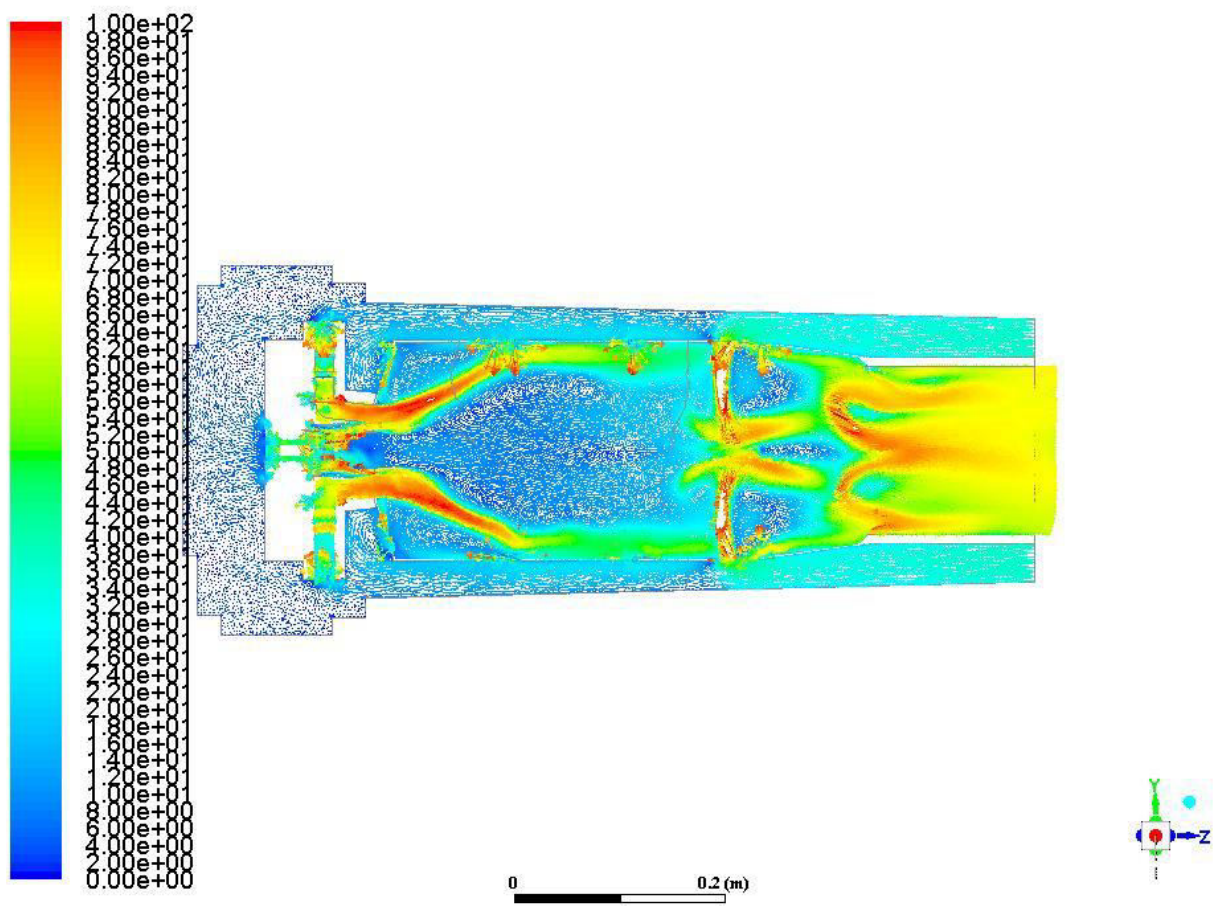


Figura 4. Campo di velocità (m/s).

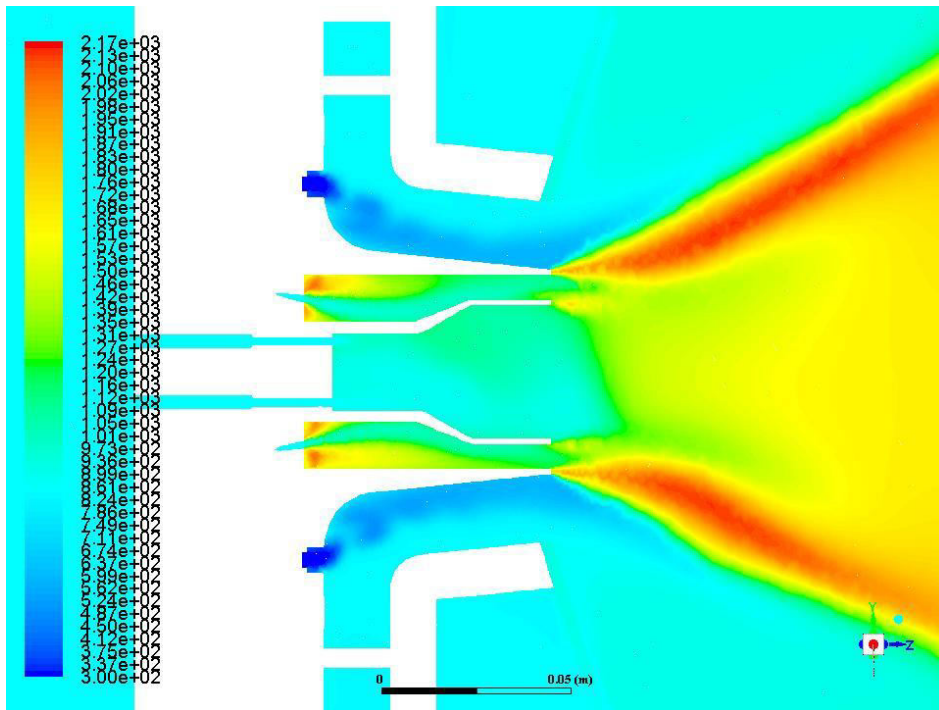


Figura 5. Temperatura (K).

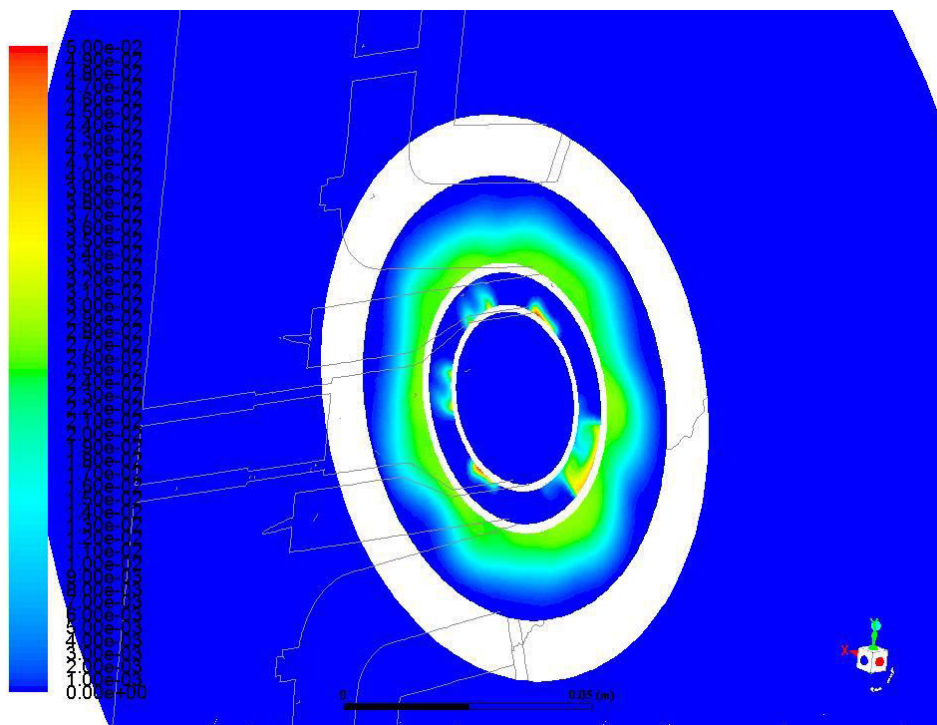


Figura 6. Frazione di massa di idrogeno.

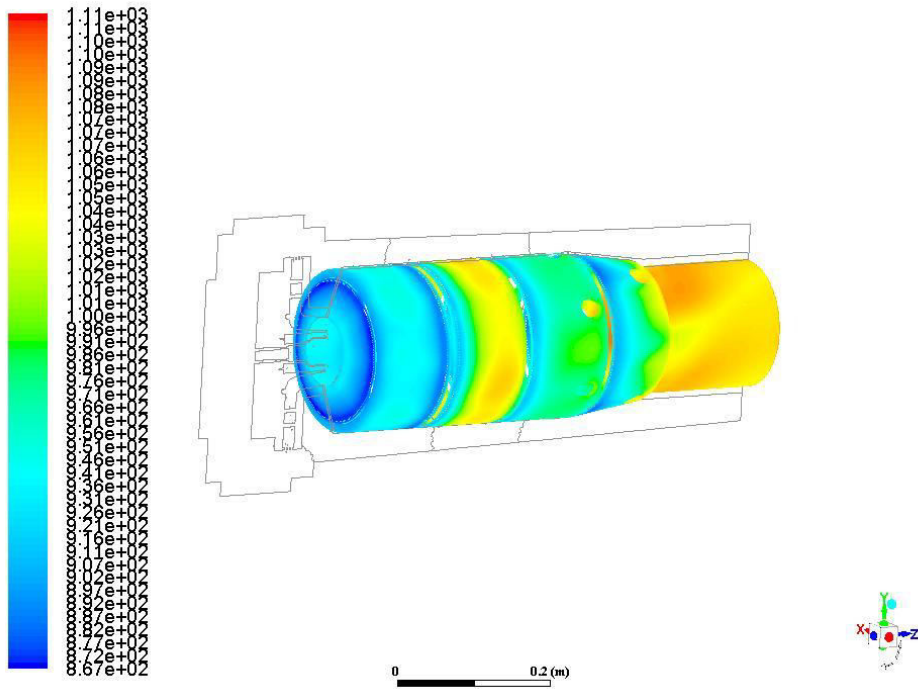


Figura 7. Temperatura (K) liner lato camera di combustione.

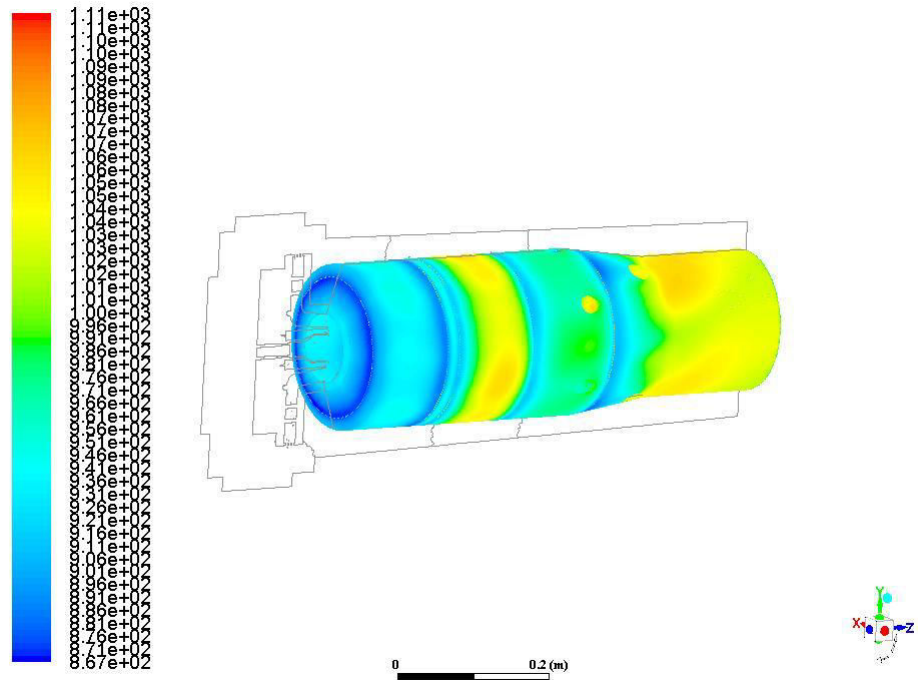


Figura 8. Temperatura (K) liner lato case.

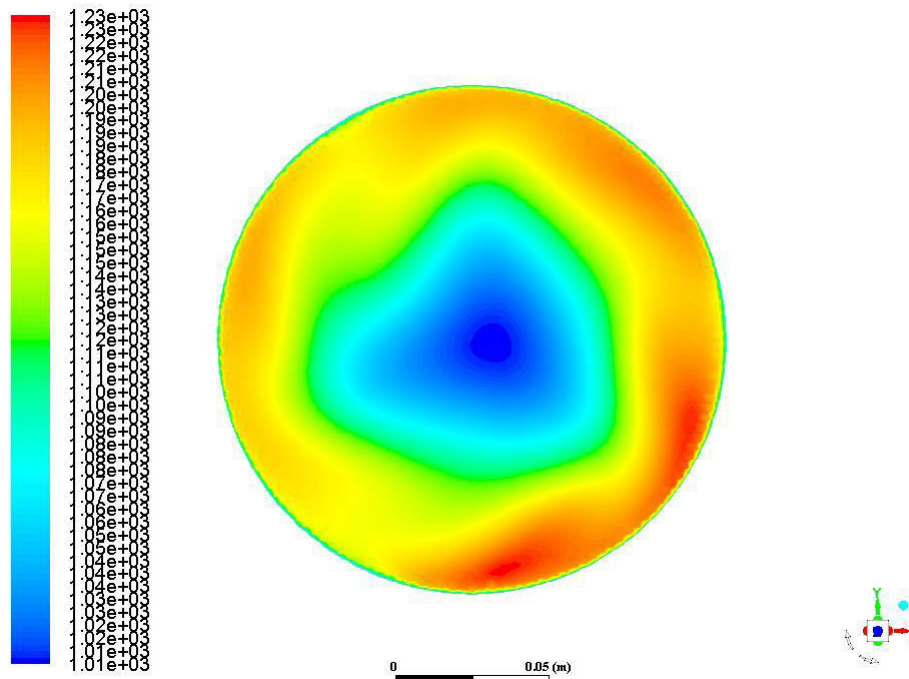


Figura 9. Temperatura (K) sezione di uscita.

Il quadro riassuntivo delle simulazioni effettuate è riportato nelle tabelle 1,2,3. Considerando la miscela combustibile individuata nello studio precedente, formata da 5% CH₄ 45% H₂ e 50% CO₂ in volume, caratterizzata da un indice di Wobbe 7.25 MJ/Nm³, è stata effettuata una prima simulazione (caso 2 tab. 1) senza spillamento di aria. La potenza assegnata al pilota è stata in tutti i casi fissata a 20 kW. Sebbene in queste condizioni la fiamma resti accesa, effettivamente l'efficienza di combustione e la concentrazione di incombusti allo scarico non sono ottimali. Incrementando la quantità di metano fino al 15% in volume (casi 3, 4 tab. 1) e riducendo la quantità di idrogeno, a parità di contenuto in volume di CO₂, il potere calorifico aumenta leggermente, ma la situazione peggiora nettamente, fino ad avere prestazioni molto scadenti nel caso di alimentazione a solo metano (caso 5 tab. 1). Nella simulazione 6 di tab.1 è stato rimosso pertanto completamente il metano e si è utilizzata una miscela costituita dal 50% di H₂ e dal 50% di CO₂. La qualità della combustione migliora decisamente, tant'è che l'efficienza stavolta raggiunge il 99.5% ed il CO allo scarico si riduce a 281 ppmv. Nella simulazione 7 di tab. 1 sono state variate le proporzioni di idrogeno e anidride carbonica, in modo da avere un indice di Wobbe pari a 7.25 MJ/Nm³, quello fissato inizialmente. In questa situazione l'efficienza di combustione e la concentrazione di monossido di carbonio in uscita migliorano ancora. L'impiego del syngas per il pilota, con il conseguente incremento delle velocità di efflusso, elimina il problema degli hot spots e comporta anche la diminuzione degli NO_x da 4.45 a 1.39 ppmv dry@15%O₂. Le considerazioni fatte per i casi al 100% del carico valgono qualitativamente anche per quelli al 50%, che evidenziano però efficienze più basse ed emissioni più alte.

Con la simulazione numero 8 di tab. 1 si è ridotta la portata di aria del 10%, si è quindi in presenza di spillamento, e si è utilizzata la miscela combustibile iniziale con il 5% di metano. In tali condizioni si registra un miglioramento dell'efficienza soprattutto a carico parziale, guadagnandosi più di tre punti percentuali ed un miglioramento in termini di emissioni di CO del 25-30%, per entrambi i carichi.

Nell'ottica di incrementare il contenuto di metano nella miscela e l'aliquota di potenza prodotta da esso, si è provato a ridurre la quantità di CO₂ in modo da ottenere un forte aumento del potere calorifico e della velocità laminare di fiamma. Nelle simulazioni 9 e 10 di tab. 2, relative al 50% del carico, la potenza generata dal metano passa per esempio dal 35% del caso 2 al 40 e 45% rispettivamente, con addirittura un miglioramento delle prestazioni del bruciatore, a discapito di un aumento delle temperature nella zona di reazione e degli NO_x (17.8 e 37.7 ppmv dry@15%O₂ rispettivamente). Si precisa che per le diverse miscele

analizzate, seppur l'indice di Wobbe vari anche notevolmente, le velocità di efflusso si attestano sempre su valori accettabili.

In ultima analisi, piuttosto che spillare aria, si è provato a ridurre la quantità di aria addotta ai condotti main nella testa del bruciatore, attraverso una riduzione della superficie forata disposta all'ingresso di questi (caso 1 tab.3, fig. 12, 13), nella condizione di carico parziale, che è quella più critica e con la miscela al 5% di metano in volume. In questo modo si ottiene una miscela aria/combustibile più ricca, quindi caratterizzata da un rapporto di equivalenza maggiore. Così facendo la portata di aria al main si riduce in effetti del 25%, ma non si registrano grossi miglioramenti della combustione. Ciò è dovuto probabilmente al fatto che, a parità di aria introdotta, la minor quantità di aria al main è compensata dalla maggior portata di aria ai fori di diluizione, che quindi contribuisce comunque a diluire e raffreddare la zona di reazione.

Tabella 1. Simulazioni al 100% del carico.

	Portata aria (kg/s)	Temperatura aria (°C)	Portata combustibile pilota (g/s)	Composizione combustibile pilota (%vol)	Portata combustibile main (kg/s)	Composizione combustibile main (%vol)			Efficienza %	CO ppmv dry@ 15%O ₂
						CH ₄	H ₂	CO ₂		
1	0.7941	561.4	0.4	CH ₄	0.05520	2	48	50	99.0	597
2	0.7941	561.4	0.4	CH ₄	0.04984	5	45	50	98.1	1096
3	0.7941	561.4	0.4	CH ₄	0.04319	10	40	50	97.1	1700
4	0.7941	561.4	0.4	CH ₄	0.03835	15	35	50	94.4	2691
5	0.7941	561.4	0.4	CH ₄	0.00630	100	-	-	66.2	6346
6	0.7941	561.4	3.8	50H ₂ /50CO ₂	0.05950	-	50	50	99.5	281
7	0.7941	561.4	3.0	56H ₂ /44CO ₂	0.04740	-	56	44	99.7	199
8	0.7147	561.4	0.4	CH ₄	0.04984	5	45	50	98.8	740

Tabella 2. Simulazioni al 50% del carico.

	Portata aria (kg/s)	Temperatura aria (°C)	Portata combustibile pilota (g/s)	Composizione combustibile pilota (%vol)	Portata combustibile main (kg/s)	Composizione combustibile main (%vol)			Efficienza %	CO ppmv dry@ 15%O ₂
						CH ₄	H ₂	CO ₂		
1	0.6286	480.5	0.4	CH ₄	0.02800	2	48	50	93.5	1240
2	0.6286	480.5	0.4	CH ₄	0.02531	5	45	50	91	2032
3	0.6286	480.5	0.4	CH ₄	0.02194	10	40	50	79.7	3496
4	0.6286	480.5	0.4	CH ₄	0.01948	15	35	50	66.1	4645
5	0.6286	480.5	0.4	CH ₄	0.00320	100	-	-	0	
6	0.6286	480.5	3.8	50H ₂ /50CO ₂	0.03021	-	50	50	95.1	506
7	0.6286	480.5	3.0	56H ₂ /44CO ₂	0.02400	-	56	44	96.8	416
8	0.5657	480.5	0.4	CH ₄	0.02531	5	45	50	94.2	1583
9	0.6286	480.5	0.91	13CH ₄ /67H ₂ /20CO ₂	0.00730	13	67	20	95.5	1742
10	0.6286	480.5	0.54	18CH ₄ /72H ₂ /10CO ₂	0.00440	18	72	10	94.4	2082

Tabella 3. Simulazioni al 50% del carico con testa bruciatore modificata.

	Portata aria (kg/s)	Temperatura aria (°C)	Portata combustibile pilota (g/s)	Composizione combustibile pilota (%vol)	Portata combustibile main (kg/s)	Composizione combustibile main (%vol)			Efficienza %	CO ppmv dry@ 15%O ₂
						CH ₄	H ₂	CO ₂		
1	0.6286	480.5	0.4	CH ₄	0.02531	5	45	50	92.6	1577

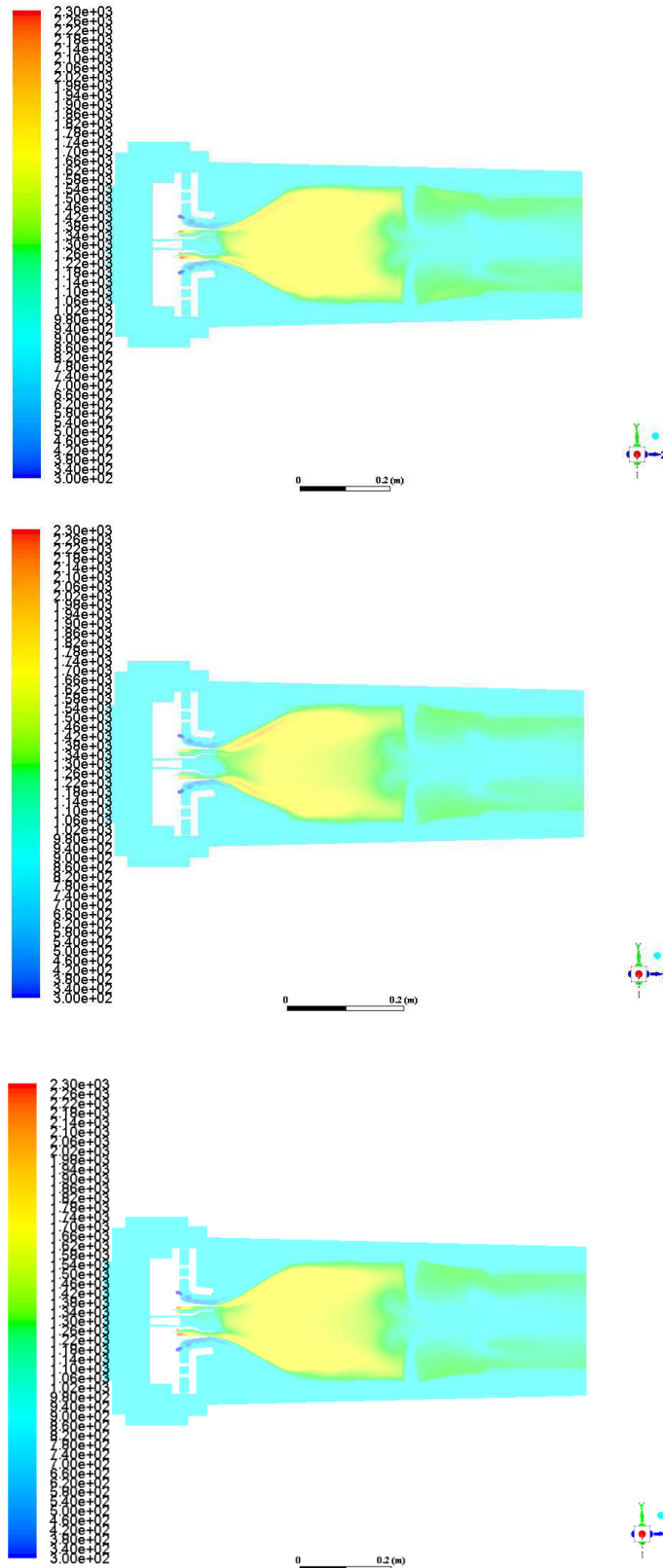


Figura 10. Campo di temperatura (K). Simulazioni 2, 7, 8, Tab. 1.

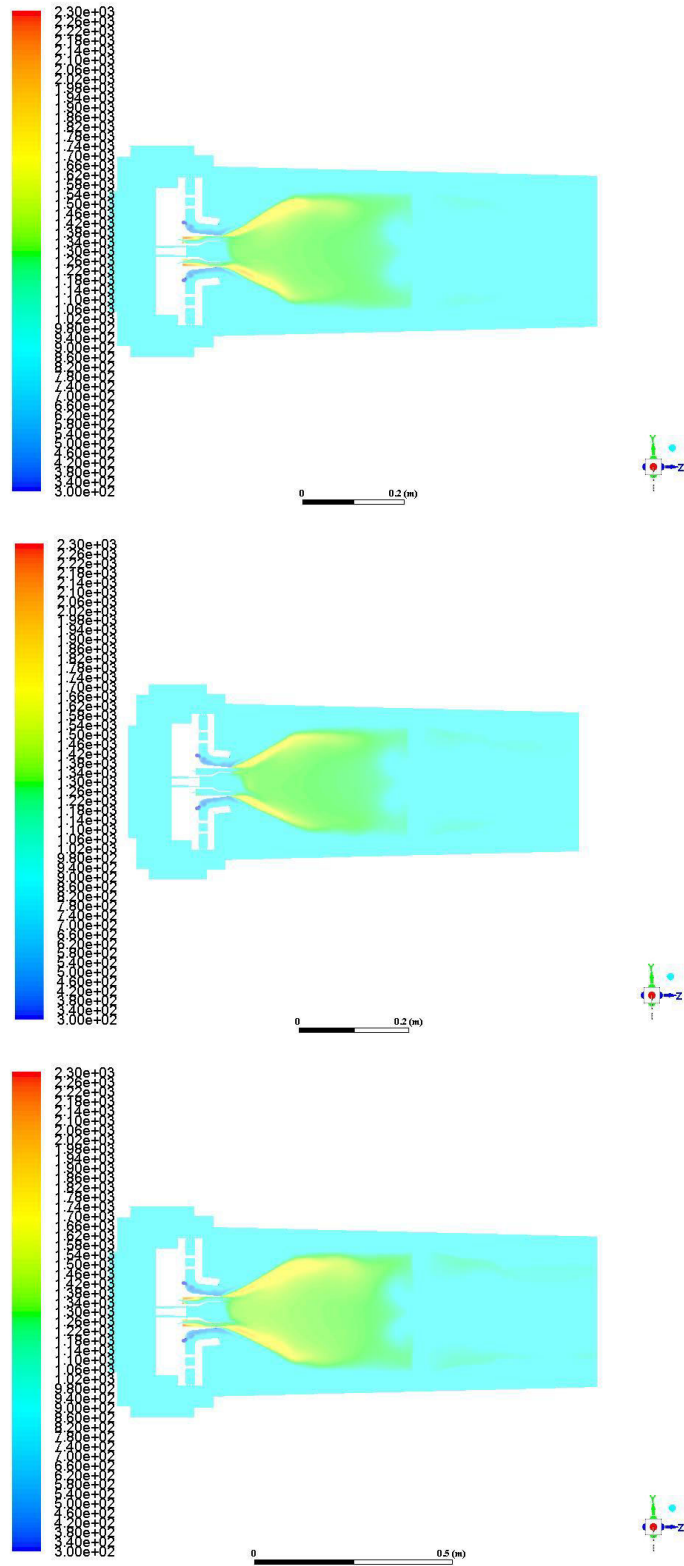


Figura 11. Campo di temperatura (K). Simulazioni 2, 7, 8, Tab. 2.

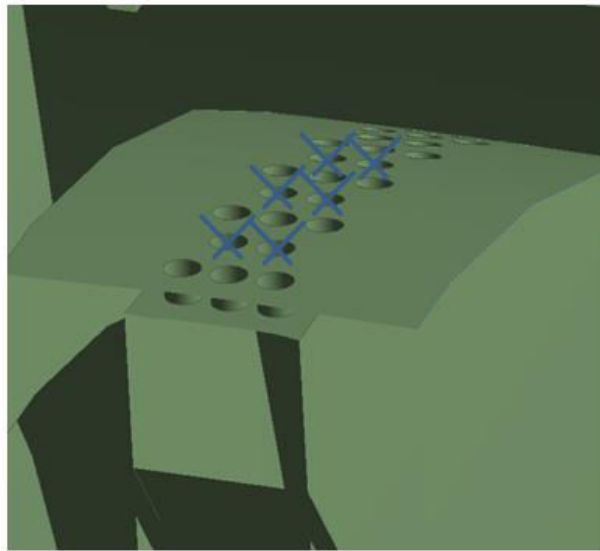


Figura 12. Riduzione superficie forata adduzione aria main. Simulazione 1, Tab. 3.

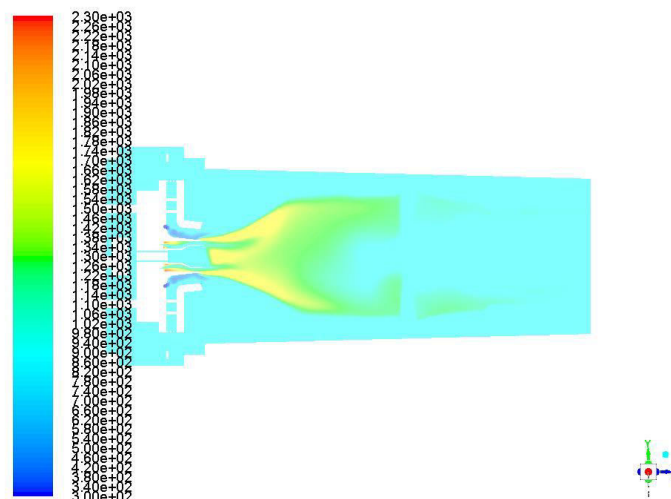


Figura 13. Campo di temperatura (K). Simulazione 1, Tab. 3.

4 Conclusioni

Sono state effettuate una serie di simulazioni con l'obiettivo di valutare l'influenza della miscela combustibile sulle prestazioni del bruciatore in esame. È emerso che la flessibilità del combustore in termini di varietà di miscele adoperate ad alto contenuto di CO_2 , rimane nei limiti in cui la percentuale di metano non superi orientativamente il 5 % in volume, senza spillamento di aria, laddove per contenuti superiori le prestazioni si riducono drasticamente. Tale contenuto in metano non è peraltro da considerarsi irrisorio, siccome contribuisce comunque a circa il 30 % della potenza tra pilota e main. Efficienze maggiori ed emissioni inferiori si registrano in assenza di metano e miscele di solo idrogeno e anidride carbonica o spillando aria. Contenuti di metano superiori sono possibili solo per miscele a più alto potere calorifico e quindi povere di CO_2 .

La riduzione di adduzione di aria al main, senza spillamento, attraverso la riduzione della superficie forata nella testa del bruciatore, con la conseguente formazione di una miscela più ricca, non si è rivelata di grande utilità.