



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Progetto di una camera di combustione per turbogas  
alimentata a syngas di tipo trapped-vortex

*A. Di Nardo, G. Calchetti, C. Mongiello*

PROGETTO DI UNA CAMERA DI COMBUSTIONE PER TURBOGAS ALIMENTATA A SYNGAS DI TIPO TRAPPED-VORTEX

A. Di Nardo, G. Calchetti, C. Mongiello – (ENEA UTTEI/COMSO)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: 2.2 – Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>

Responsabile Progetto: Antonio Calabrò, ENEA



Pag. di  
Copia di

Unità  
UTTEI - COMSO

Classificazione UTTEI-COMSO  
COMSO/2011/006/EL

Distribuzione:  
Esterna Libera

**Progetto**

Accordo di Programma MSE-ENEA – Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

**Parole chiave**

- Turbine a gas
- Trapped vortex
- Simulazione numerica CFD
- Syngas

**Attività**

2.2 – Utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO2

**Titolo**

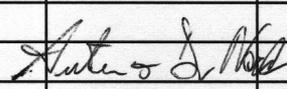
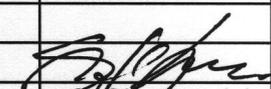
Progetto di una camera di combustione per turbogas alimentata a syngas di tipo trapped-vortex

**Autori**

A. Di Nardo, G. Calchetti, C. Mongiello

**Sommario**

I sistemi realizzati fino ad ora utilizzano la combustione in cavità come fiamma pilota per flussi premiscelati immessi a forte velocità. L'obiettivo è quello di ideare una apparecchiatura che funzioni interamente con il principio dei vortici intrappolati. Il sistema che si intende sperimentare realizza la combustione della parte pilota e della parte premiscelata all'interno di un unico volume, consentendo un più intimo e immediato contatto dei gas caldi con la miscela fresca. Lo studio è stato effettuato tramite analisi CFD.

4							
3							
2							
1							
0		A. Di Nardo		S. Giannmartini		S. Giannmartini	22/09/2011
Rev	Descrizione	Redazione	Data	Convalida	Data	Approvazione	Data

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 1	di 36
	Sigla	Rev.		

## INDICE

<b>1. INTRODUZIONE.....</b>	<b>pag. 2</b>
<b>2. SYNGAS E SCHEMA CINETICO.....</b>	<b>pag. 4</b>
<b>3. DESCRIZIONE E ANALISI DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>pag. 7</b>
<b>3.1. Funzionamento in regime premiscelato.....</b>	<b>pag. 12</b>
<b>3.1.1 Simulazioni Chemkin.....</b>	<b>pag. 19</b>
<b>3.2. Funzionamento in regime diffusivo.....</b>	<b>pag. 23</b>
<b>4. CONSIDERAZIONI SULLA DENSITA' DI POTENZA.....</b>	<b>pag.26</b>
<b>5. MODIFICHE ALL'IMPIANTO.....</b>	<b>pag. 27</b>
<b>6. MODIFICHE AL TVC ESISTENTE.....</b>	<b>pag. 28</b>

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 2	di 36
	Sigla	Rev.		

## 1. INTRODUZIONE

Le differenze di una combustione a syngas anziché a gas naturale sono principalmente due:

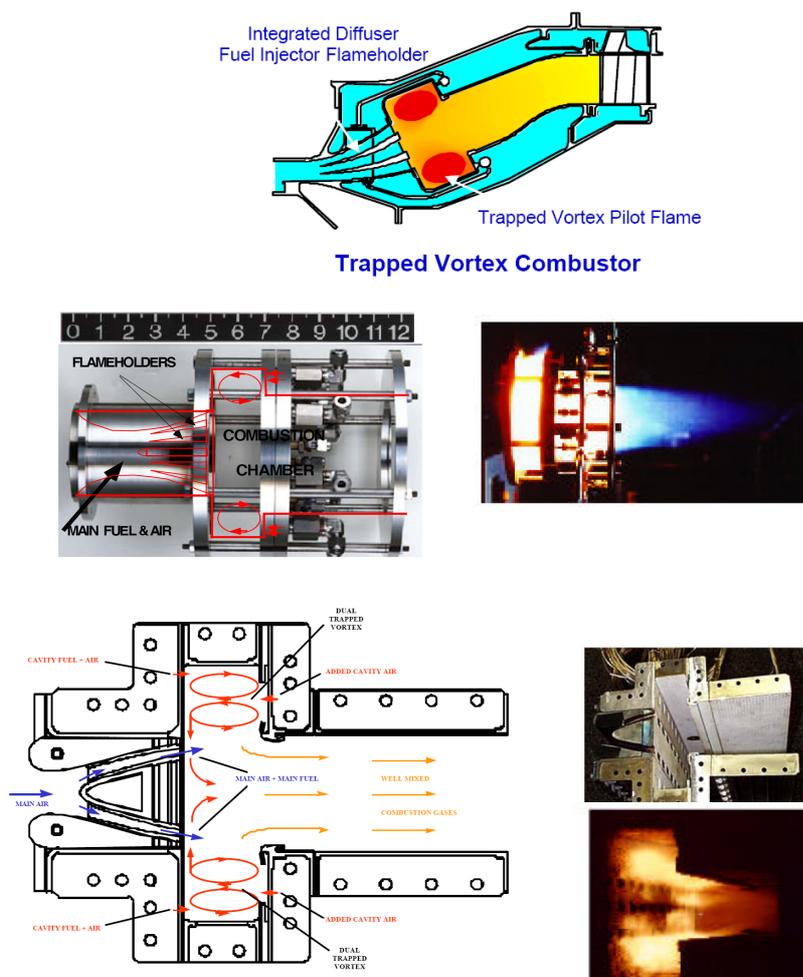
- A parità di potenza, la portata di combustibile deve essere 4-8 volte maggiore rispetto al gas naturale, a causa del più basso potere calorifico.
- La combustione premiscelata di gas naturale e aria è uno dei metodi più utilizzati per il contenimento delle emissioni di NO<sub>x</sub>, attraverso il mantenimento di temperature di fiamma sufficientemente basse. Questa tecnica non può essere utilizzata con il syngas per la presenza significativa di idrogeno ed il conseguente pericolo di ritorno di fiamma nei sistemi di iniezione. Per questo motivo è necessario ricorrere a fiamme diffusive non premiscelate, utilizzando diluenti come azoto, anidride carbonica e vapore, per contenere le temperature di fiamma e quindi gli NO<sub>x</sub>.

Entrambi i fattori comportano un incremento delle portate e creano problemi di esercizio al compressore.

Rispetto alle problematiche esposte, la tecnologia *trapped vortex* presenta diversi vantaggi:

1. È possibile bruciare una grande varietà di combustibili a medio e basso potere calorifico.
2. Si può operare in regime di combustione premiscelata povera di combustibile, data la capacità di sostenere velocità di immissione molto elevate, che scongiurano il pericolo di ritorno di fiamma.
3. Le emissioni di NO<sub>x</sub> raggiungono livelli estremamente bassi senza l'aggiunta di gas diluenti o di trattamenti di post-combustione.
4. Produce l'estensione dei limiti di spegnimento e una migliore stabilità di fiamma.

I sistemi realizzati fino ad ora utilizzano la combustione in cavità come fiamma pilota per flussi premiscelati immessi a forte velocità [1] (fig. 1). L'obiettivo del progetto è quello di ideare una apparecchiatura che funzioni interamente con il principio dei vortici intrappolati. Il sistema che si intende sperimentare realizza la combustione della parte pilota e della parte premiscelata all'interno di un unico volume, consentendo un più intimo e immediato contatto dei gas caldi prodotti con la miscela fresca, con l'intento di creare i presupposti per un regime di combustione fortemente diluito, al limite di tipo mild.



**Figura 1.** Esempi di bruciatore TVC.

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 4	di 36
	Sigla	Rev.		

## 2. SYNGAS E SCHEMA CINETICO

La composizione del syngas varia a seconda del tipo di carbone e dei trattamenti ai quali questo è sottoposto. Il rapporto volumetrico  $H_2/CO$  varia tra 0.33 e 40, i gas di diluizione sono compresi nel range 4% - 51% ed anche l'acqua varia tra lo 0% e il 40%.

Tutte le tecniche di gassificazione possono essere classificate in due gruppi principali a seconda del sistema di gassificazione: gassificazione vapore/aria e gassificazione vapore/ossigeno. La composizione del gas derivante da questi processi è diversa a seconda che si usi aria oppure ossigeno come fluido di gassificazione. Nel caso che venga utilizzata l'aria, il syngas presenta una elevata percentuale di azoto ed un basso potere calorifico. Se viene utilizzata la miscela vapore/ossigeno, la quantità di azoto è nettamente minore ed il potere calorifico è ovviamente maggiore. Chiaramente se nel processo di gassificazione si utilizza l'ossigeno, è necessario includere i costi della separazione dello stesso, nell'analisi economica di fattibilità.

La variabilità nella composizione del syngas influenza in modo sostanziale il processo di combustione. Diverse composizioni daranno differenti risultati per quanto riguarda l'instabilità di combustione, blowoff, flasback, la struttura della fiamma e la formazione di specie inquinanti. Questo aspetto è particolarmente importante nel caso dei turbogas, in quanto questi dispositivi sono generalmente ottimizzati per avere bassi livelli di emissione. Il problema del blowout (spegnimento) è rilevante nel caso dei combustori a bassa emissione, in quanto questi operano spesso molto vicini alla condizione di spegnimento. Per syngas con alte percentuali di idrogeno è presente il rischio di propagazione della fiamma controcorrente (flashback). Per questo motivo un combustore progettato per bruciare syngas povero di idrogeno, necessiterà di una riprogettazione nel caso lo si voglia esercire con syngas ricchi di idrogeno. Le alte temperature che si ottengono nel caso di combustione di  $H_2$  possono creare problemi di emissione di  $NO_x$ , per limitare le quali si può diluire con corrente

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 5	di 36
	Sigla	Rev.		

di vapore. Come noto, i turbogas operanti in condizioni di miscela premiscelata magra, abbattano fortemente la produzione di inquinanti; tuttavia sorgono problemi legati alla sicurezza dovuti alla instabilità della combustione.

Tutto ciò rende chiaro quanto sia importante la comprensione dei meccanismi di reazione chimica, finalizzata ad ottenere modelli che coprano un ampio range di condizioni di funzionamento, nello sviluppo di tecnologie per la combustione pulita di syngas. Per approfondire la conoscenza su questa tipologia di problemi, sono stati effettuati studi di cinetica chimica approfonditi sulla combustione della miscela H<sub>2</sub>/CO sia dal punto di vista teorico che sperimentale (fig. 2, 3 e tab. 1). Vediamo quale è l'influenza dei diversi componenti sui fenomeni di combustione.

L'aggiunta di CO nel caso di una fiamma di idrogeno diminuisce la velocità laminare di fiamma. In ogni caso il CO non è un mero diluente in quanto, sebbene abbia una velocità di fiamma molto bassa in aria "secca", partecipa alla cinetica chimica mediante la reazione:  $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ . Questa reazione è lenta se paragonata alle reazioni dell'idrogeno e avviene principalmente nella regione a valle della fiamma.

L'aumento di pressione comporta una diminuzione nella velocità di fiamma della miscela CO/H<sub>2</sub> a causa dell'incremento dell'efficienza delle reazioni del terzo ordine  $\text{H} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  e  $\text{H} + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{N}_2$ . Queste reazioni, che consumano il radicale H, sono reazioni terminali della catena; perciò l'incremento della loro efficienza porta ad una diminuzione della velocità di fiamma laminare.

L'aumento di temperatura provoca un rapido aumento della velocità laminare di fiamma, a causa dell'aumento della velocità di reazione di quasi tutte le reazioni ed una accelerazione del consumo di combustibile, dello scambio termico ed in generale di tutti i processi legati alla combustione stessa. L'aggiunta di N<sub>2</sub> provoca una diminuzione della velocità di fiamma laminare, in quanto

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 6 di 36
	Sigla	Rev.	

l'azoto agisce principalmente da diluente chimicamente inerte. Ciò comporta una diminuzione della temperatura adiabatica di fiamma e la promozione della produzione e consumo della specie HO<sub>2</sub>. L'N<sub>2</sub> agisce anche da terzo corpo nelle reazioni di ricombinazione.

La presenza di CO<sub>2</sub> nel combustibile influenza la fiamma e la sua velocità di propagazione laminare in diversi modi, determinando variazioni nel calore specifico della miscela, nella temperatura adiabatica di fiamma, nella velocità di reazione e nello scambio radiativo. La presenza di CO<sub>2</sub> determina una diminuzione della velocità di fiamma a causa dell'aumento dell'efficienza della reazione inversa  $CO+OH\rightarrow CO_2+H$  che consuma il radicale H. L' influenza della CO<sub>2</sub> è maggiore nel caso di alte pressioni in quanto aumenta la sua efficienza come terzo corpo.

L'effetto dell' H<sub>2</sub>O è simile a quello dell' N<sub>2</sub> in caso di piccole concentrazioni, ma se la sua concentrazione aumenta comincia a partecipare alla cinetica chimica agendo da terzo corpo, determinando un aumento del consumo di H mediante la reazione inversa  $OH+H_2\rightarrow H+H_2O$ .

L'aumento della concentrazione di H<sub>2</sub> nella miscela H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> porta ad un aumento esponenziale della velocità laminare di fiamma, a causa dell'aumento dell'efficienza del ramo ad alta temperatura della catena di reazione ed un aumento della reattività del sistema. L' H<sub>2</sub> reagisce principalmente con l' O<sub>2</sub> e produce il radicale H che partecipa alla reazione  $H+O_2\rightarrow OH+O$ . Questa reazione produce i radicali OH ed O necessari per la reazione di conversione  $CH_4\rightarrow CH_3$ .

Le velocità di fiamma laminare di metano puro (0.39 m/s) e del CO, in aria "umida", sono simili, ma per la miscela CO/CH<sub>4</sub> essa raggiunge un valore di 0.57 m/s per una composizione di 80%CO/20%CH<sub>4</sub>. La ragione per tale comportamento è che la presenza di combustibile C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> (in questo caso metano) inibisce l'ossidazione del CO fino a quando tutto il combustibile è esaurito. A questo punto, però, la concentrazione di OH aumenta rapidamente e la reazione  $OH+CO\rightarrow H+CO_2$

che consuma CO e produce CO<sub>2</sub> è accelerata, determinando un aumento della velocità laminare di fiamma.

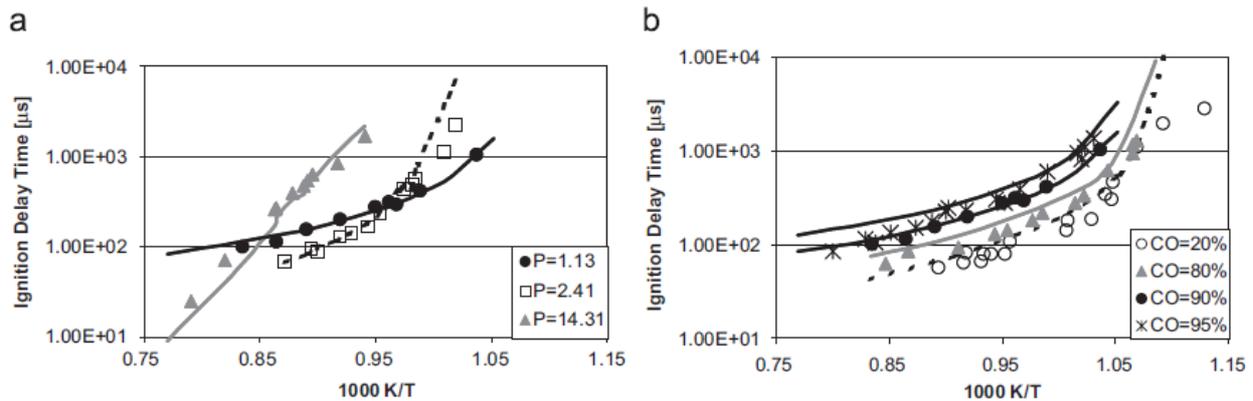


Figura 2. Ritardo di ignizione di una miscela CO/H<sub>2</sub> a  $\Phi=0.5$  [2].

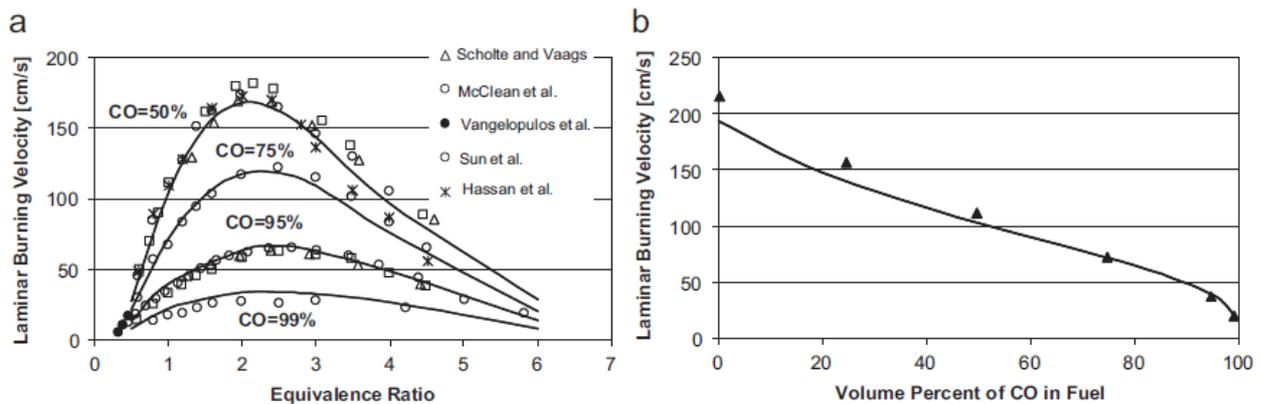


Figura 3. Velocità di fiamma laminare di syngas a 1 atm e 298 K [2].

### 3. DESCRIZIONE E ANALISI DEL PROTOTIPO

Il TVC progettato è rivolto alle turbine a gas che utilizzano camere di combustione anulari. Il target di potenza è stato fissato a 100 kW, date le caratteristiche dell'impianto sperimentale sul quale il prototipo verrà montato e provato, in condizioni di pressione atmosferica. L'aria di combustione sarà alimentata a 700 K, corrispondente ad un rapporto di compressione di circa 20 bar, per simulare le reali condizioni operative. Le due tipologie di syngas studiate sono:

19% H<sub>2</sub> – 31% CO – 50% N<sub>2</sub> LHV 6 MJ/kg (Syngas A)

33% H<sub>2</sub> – 67%CO LHV 13.76 MJ/kg (Syngas B)

e i risultati CFD sono relativi a  $\lambda=1.75$ .

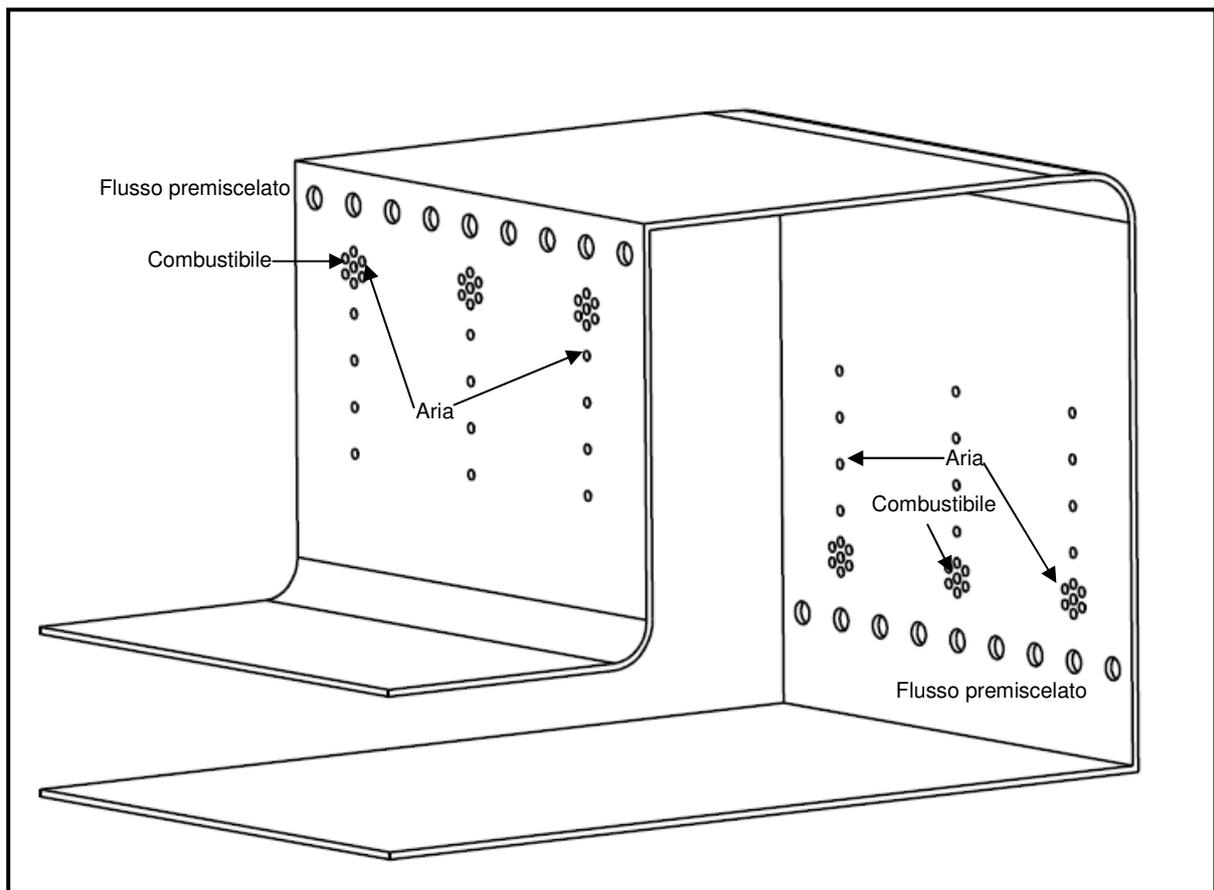
**Tabella 1.** Meccanismo di reazione del syngas [2].

CO/H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mechanism with rate coefficients in the form  $k = A \cdot T^n \cdot \exp(-E_a/RT)$

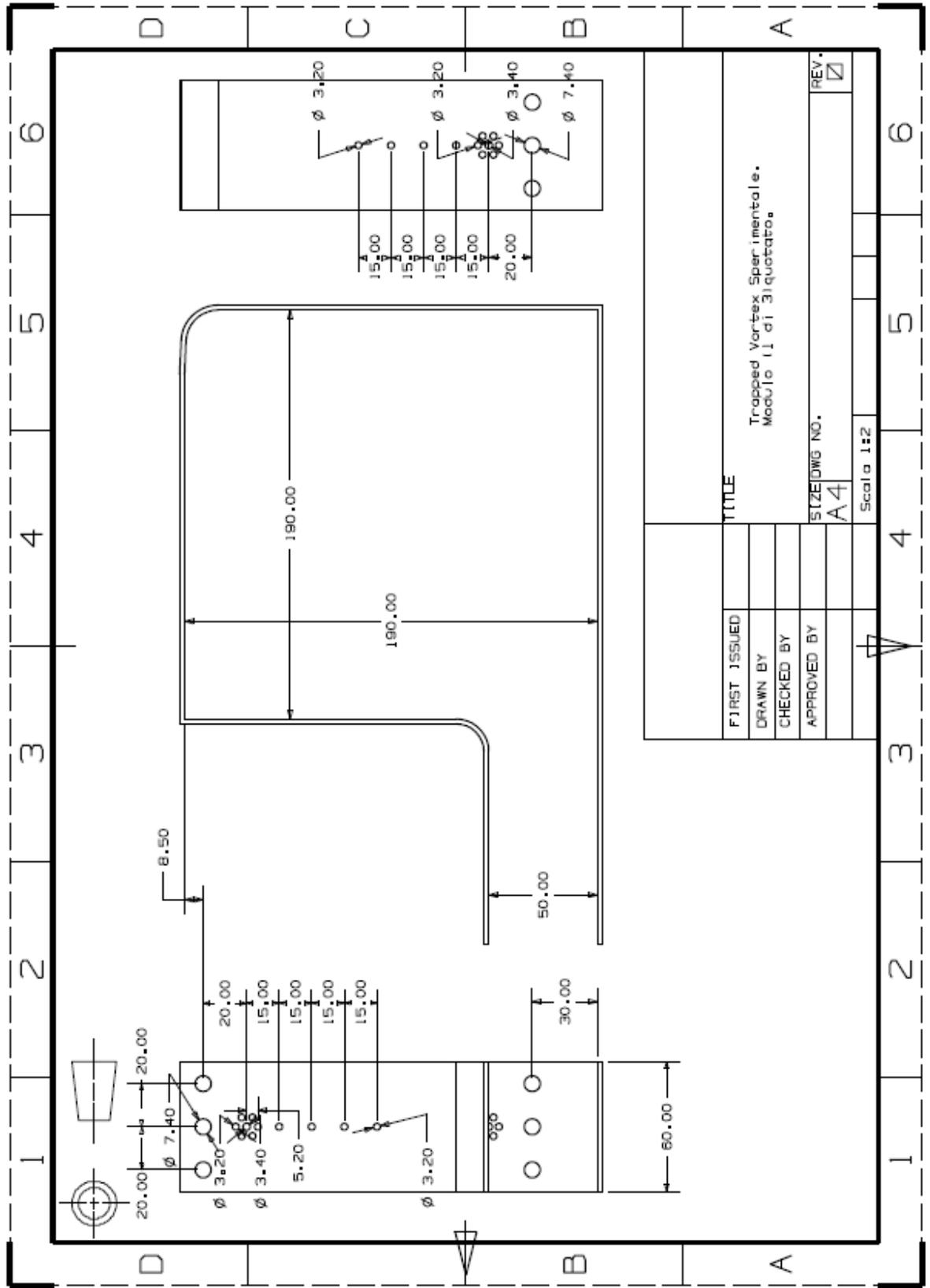
Reaction	A	n	E <sub>a</sub>
1 H + O <sub>2</sub> = OH + O	2.21E + 11	0	16 650
2 O + H <sub>2</sub> = OH + H	4.33E + 10	0	10 000
3 H + O <sub>2</sub> + [M] = HO <sub>2</sub> + [M]	4.65E + 09	-0.8	0
Low-pressure limit:	7.00E + 11	0.4	0
Trope parameters: 0.5, 1E - 30 1E + 30			
Enhanced third-body efficiencies: H <sub>2</sub> O = 18.0, H <sub>2</sub> = 2.5, N <sub>2</sub> = 1.26, O <sub>2</sub> = 0, Ar = 0.8, He = 0.8, CO = 1.2, CO <sub>2</sub> = 2.4			
H + O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> = HO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	8.90E + 08	0	-2822
4 OH + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	5.00E + 10	0	1000
5 H + HO <sub>2</sub> = OH + OH	2.50E + 11	0	1900
6 O + HO <sub>2</sub> = O <sub>2</sub> + OH	3.25E + 10	0	0
7 OH + OH = O + H <sub>2</sub> O	7.36E + 09	0	1100
8 H <sub>2</sub> + [M] = H + H + [M]	2.23E + 11	0	96 081
Enhanced third-body efficiencies: H <sub>2</sub> O = 12.0, H <sub>2</sub> = 2.5, CO = 1.9, CO <sub>2</sub> = 3.8, Ar = 0.5, He = 0.5			
9 O <sub>2</sub> + [M] = O + O + [M]	1.55E + 11	0	115 120
Enhanced third-body efficiencies: H <sub>2</sub> O = 12.0, H <sub>2</sub> = 2.5, CO = 1.9, CO <sub>2</sub> = 3.8, Ar = 0.2, He = 0.2			
10 H + OH + [M] = H <sub>2</sub> O + [M]	4.50E + 16	-2	0
Enhanced third-body efficiencies: H <sub>2</sub> O = 16.0, H <sub>2</sub> = 2.0, CO <sub>2</sub> = 1.9			
11 H + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	2.50E + 10	0	700
12 HO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	2.11E + 09	0	0
13 OH + OH + [M] = H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + [M]	7.40E + 10	-0.37	0
Low-pressure limit:	2.30E + 12	-0.9	-1700
Trope parameters: 0.7346, 94.00, 1756, 5182			
Enhanced third-body efficiencies: H <sub>2</sub> O = 6, H <sub>2</sub> = 2, CO = 1.5, CO <sub>2</sub> = 2.0, CH <sub>4</sub> = 2.0, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> = 3.0, Ar = 0.7, He = 0.7			
14 O + OH + [M] = HO <sub>2</sub> + [M]	1.00E + 10	0	0
15 H + H <sub>2</sub> O = H <sub>2</sub> + OH	4.00E + 07	1	19 000
16 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H = H <sub>2</sub> O + OH	2.41E + 10	0	3970
17 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H = H <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub>	6.03E + 10	0	7950
18 HO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + OH	5.39E + 05	2	28 780
19 OH + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O + HO <sub>2</sub>	3.20E + 05	2	-4170
20 O + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → OH + HO <sub>2</sub>	1.08E + 06	2	-1657
21 CO + O + [M] = CO <sub>2</sub> + [M]	9.64E + 07	0	3800
Low-pressure limit:	2.07E + 20	-3.34	7610
Enhanced third-body efficiencies: H <sub>2</sub> O = 12.0, H <sub>2</sub> = 2.0, CO = 1.5, CO <sub>2</sub> = 2.0, Ar = 0.5			
22 CO + OH = CO <sub>2</sub> + H	9.60E + 08	0.14	7352
	7.32E + 07	0.03	-16
23 CO + HO <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub> + OH	3.01E + 10	0	23 000
24 CO + H <sub>2</sub> O = CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	2.00E + 08	0	38 000
25 O <sub>2</sub> + CO = CO <sub>2</sub> + O	2.53E + 09	0	47 700
26 HCO + [M] = CO + H + [M]	1.20E + 14	-1	17 000
Enhanced third-body efficiencies: H <sub>2</sub> O = 5.0, H <sub>2</sub> = 1.9, CO = 1.9, CO <sub>2</sub> = 3.0			
27 HCO + O = CO <sub>2</sub> + H	3.00E + 10	0	0
28 HCO + H = H <sub>2</sub> + CO	1.00E + 11	0	0
29 HCO + OH = H <sub>2</sub> O + CO	5.00E + 10	0	0
30 HCO + HO <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + CO	4.00E + 08	0	0
31 O <sub>2</sub> + HCO = HO <sub>2</sub> + CO	1.00E + 09	0	0
32 HCO + HO <sub>2</sub> ⇒ H + OH + CO <sub>2</sub>	3.00E + 10	0	0

A units: mol/l/s/K; E<sub>a</sub> units: cal/mol.

Data la simmetria del problema, le simulazioni CFD sono state condotte solo su un settore dell'intera camera, con le relative portate di aria e combustibile (fig. 6-18). Si è adottata una griglia non strutturata tetraedrica, con un numero di celle compreso tra 250000 e 500000, a seconda dei casi. Le simulazioni sono del tipo RANS stazionarie ed i modelli adottati per la turbolenza e la reazione chimica sono il  $k-\epsilon$  realizzabile e l'EDC (con il meccanismo di tabella 1) rispettivamente. Per approssimazioni successive e passando attraverso diverse soluzioni, si è pervenuti alla configurazione riportata in figura (fig. 4, 5).



**Figura 4.** Complessivo trapped-vortex sperimentale. Funzionamento premiscelato.



**Figura 5.** Disegno quotato di un modulo (1 di 3).

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 11 di 36
	Sigla	Rev.	

Il prototipo da realizzare, per semplicità costruttiva e di misura, è costituito da un settore rettificato della camera anulare. È a sezione quadrata delle dimensioni 190x190 mm. Tale configurazione si è rivelata la più efficace rispetto agli obiettivi sopra esposti. La densità di potenza risulta di circa 15 MW/m<sup>3</sup> bar. Non è stato possibile incrementare ulteriormente questo valore, infatti per dimensioni inferiori del volume, non si riesce nella configurazione adottata a garantire la presenza del vortice.

La tecnica più ovvia per realizzare il vortice nel volume che rappresenta la camera di combustione è quella di immettervi uno o più flussi tangenziali. Si è pensato quindi di disporre due flussi tangenziali i quali promuovono la formazione del vortice, mentre altri flussi contrapposti distribuiti verticalmente ne alimentano il cuore. Un grosso sforzo è stato fatto per modulare opportunamente portate e velocità, e quindi quantità di moto relative, dei flussi nonché dimensioni minime della camera di combustione. Infatti nella configurazione adottata si è instaurato un perfetto equilibrio tra l'azione dei flussi tangenziali, che tendono a generare il vortice, e l'azione dei flussi verticali che tendono a distruggerlo. In questo senso è bene sottolineare che è soprattutto il flusso tangenziale più distante dall'uscita ad essere determinante. Gli effetti negativi sulla posizione e la dimensione del vortice conseguenti ad una riduzione di portata di quest'ultimo sono risultati evidenti. Il flusso tangenziale più vicino all'uscita è utile soprattutto ad incrementare la densità di potenza dell'apparecchiatura nel caso di funzionamento premiscelato. A tal proposito vale la pena di chiarire il fatto che la densità di potenza di un siffatto sistema non si attesta su valori molto elevati. Rispetto a sistemi a sviluppo assiale lo spazio minimo necessario allo sviluppo del vortice determina un incremento di volume e la riduzione della densità di potenza. D'altra parte il contenuto in monossido di carbonio, abbastanza lento a bruciare, impone tempi di residenza maggiori, rispetto ad una alimentazione a gas naturale. Sono state studiate due tipologie di funzionamento. Nella prima i flussi tangenziali sono premiscelati, mentre quelli verticali diffusivi alimentano la fiamma pilota del

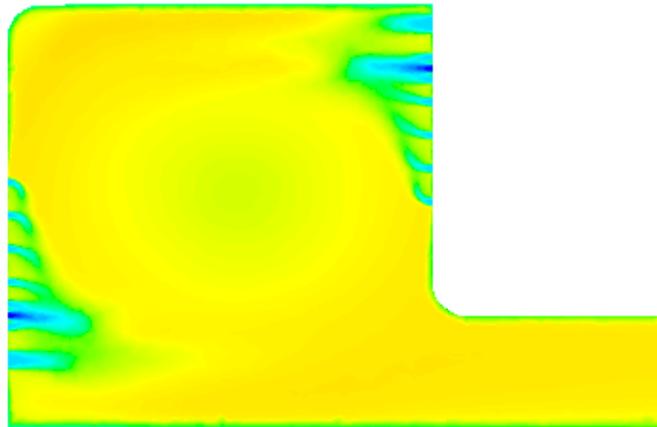
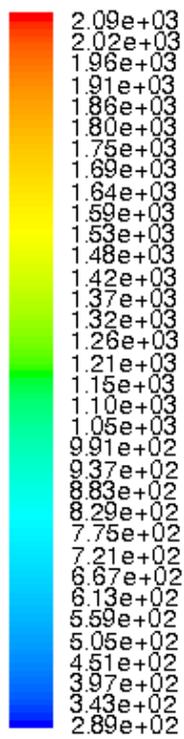
 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 12 di 36
	Sigla	Rev.	

sistema. Nella seconda invece tutto il combustibile ed una parte dell'aria vengono alimentati attraverso i fori verticali, mentre quelli tangenziali apportano la restante aria.

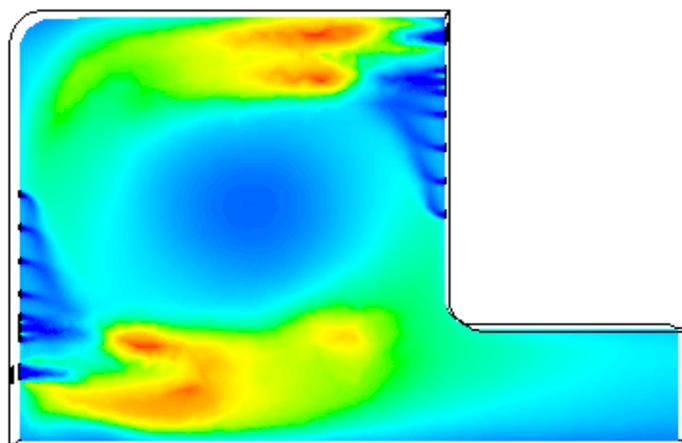
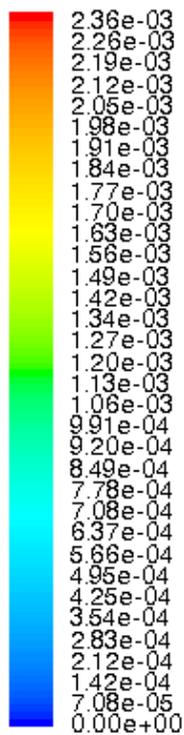
### 3.1 Funzionamento in regime premiscelato

Dovendo la parte pilota garantire il sostentamento della parte premiscelata, essa non poteva che essere diffusiva. L'idea di base è stata quindi quella di generare al centro del sistema un cuore caldo che potesse garantire l'accensione della parte premiscelata magra. Si è pensato pertanto di disporre l'immissione di aria e combustibile pilota sulle due facce verticali opposte come si evince dalla figura. Per problemi di sicurezza i due flussi premiscelati vengono iniettati a velocità superiori a 100 m/s. Le temperature massime raggiunte sono dell'ordine dei 1700 K per il syngas A e 2000 K per il syngas B, registrate in corrispondenza della parte diffusiva. La differenza è chiaramente attribuibile al maggiore contenuto di idrogeno. L'incremento dell'eccesso d'aria porta certamente ad una riduzione di tali picchi ma determina il peggioramento dell'efficienza di combustione. In generale si può affermare che se da una parte l'idrogeno brucia rapidamente, è responsabile dei valori massimi di temperatura e necessiterebbe di maggiori quantità di aria, dall'altra il monossido di carbonio è più lento a bruciare e richiederebbe temperature mediamente più elevate.

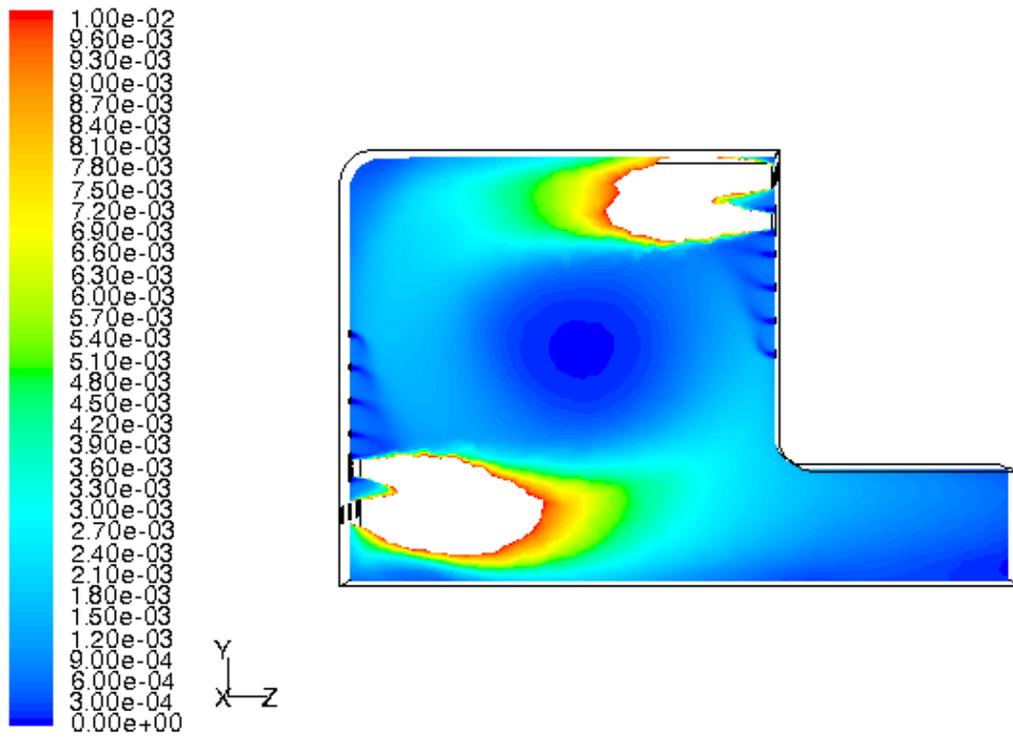
L'indice di emissione  $EINO_x$  ( $g/kg_{fuel}$ ) risulta praticamente nullo per entrambi i casi, mentre l'indice EICO vale  $1.76 g/kg_{fuel}$  per il caso A e  $5.84 g/kg_{fuel}$  per il caso B.



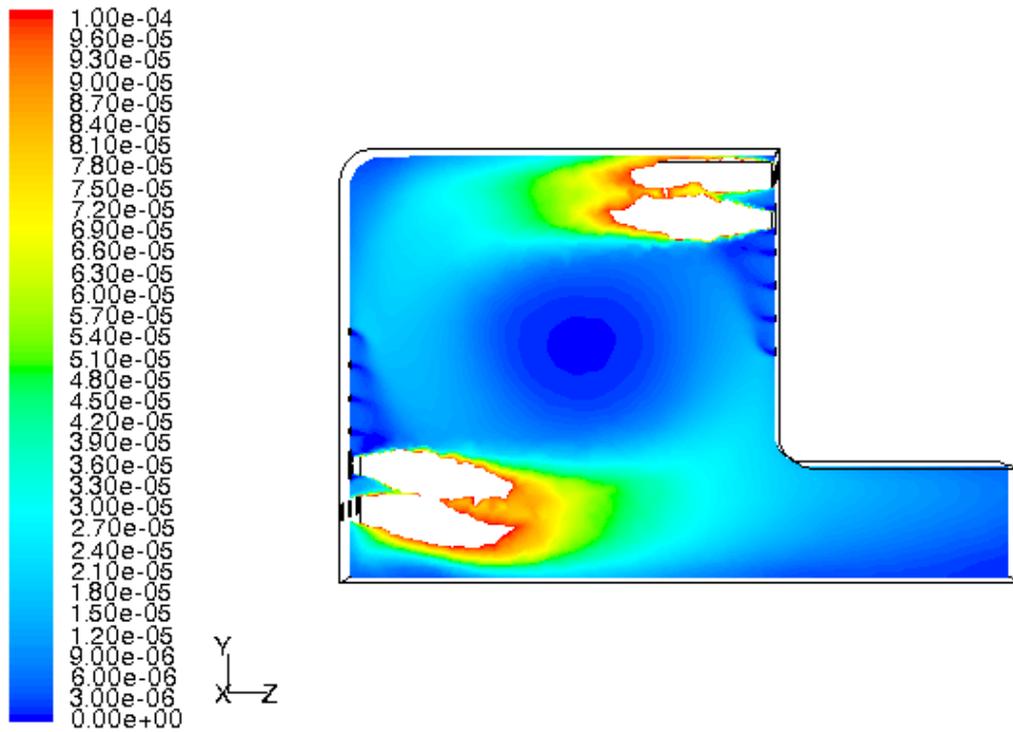
**Figura 6.** Temperature (K). Syngas A.



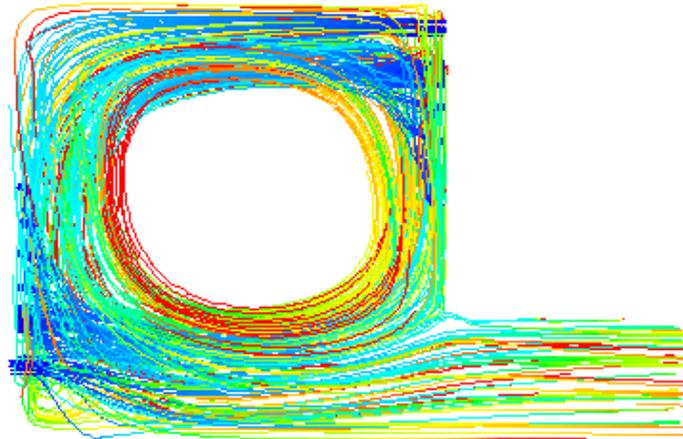
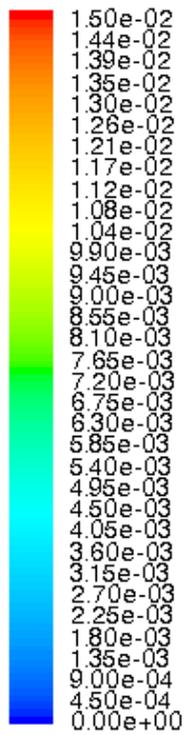
**Figura 7.** Frazione di massa di OH. Syngas A.



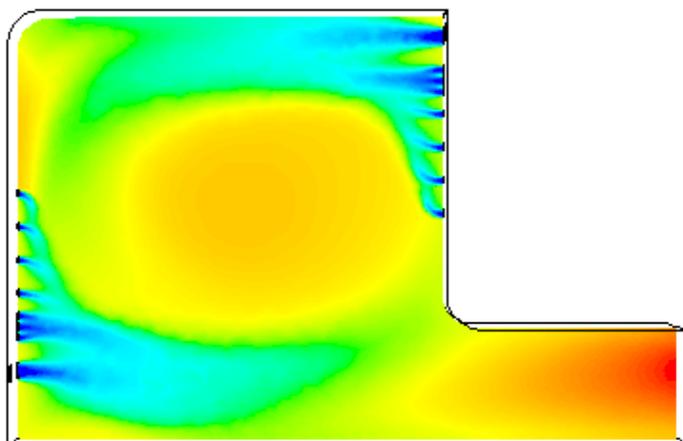
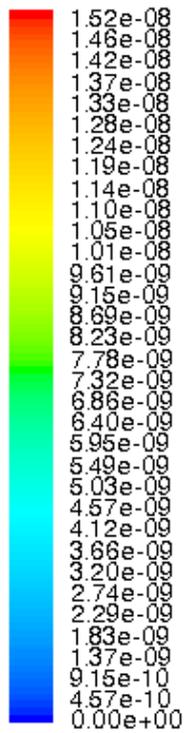
**Figura 8.** Frazione di massa di CO. Syngas A.



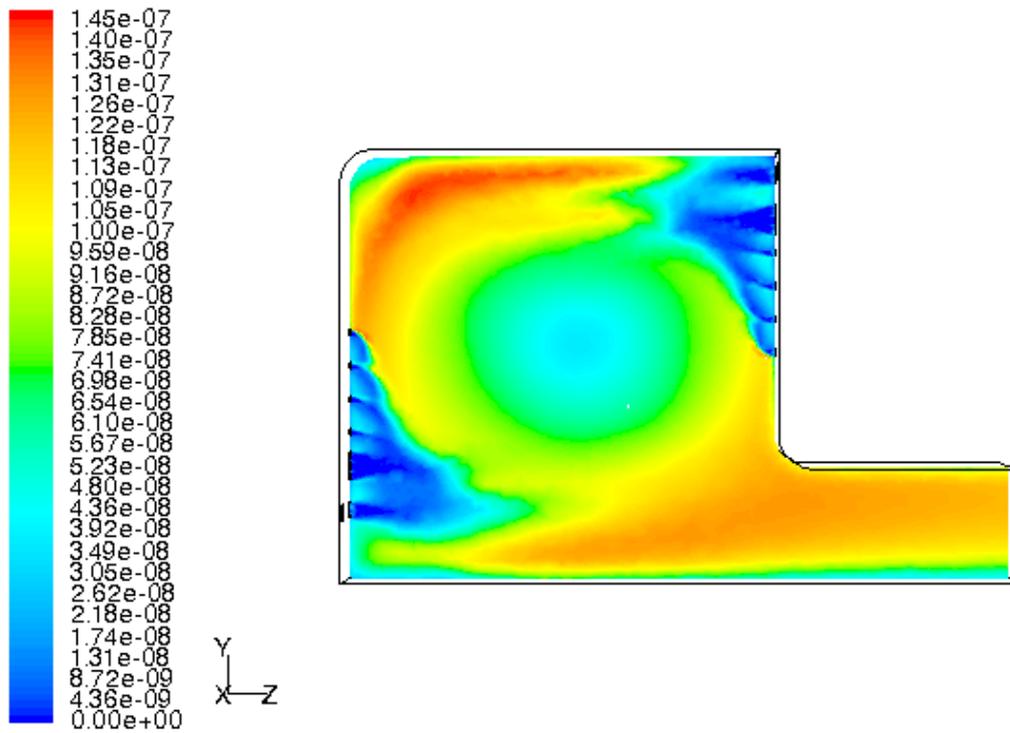
**Figura 9.** Frazione di massa di H<sub>2</sub>. Syngas A.



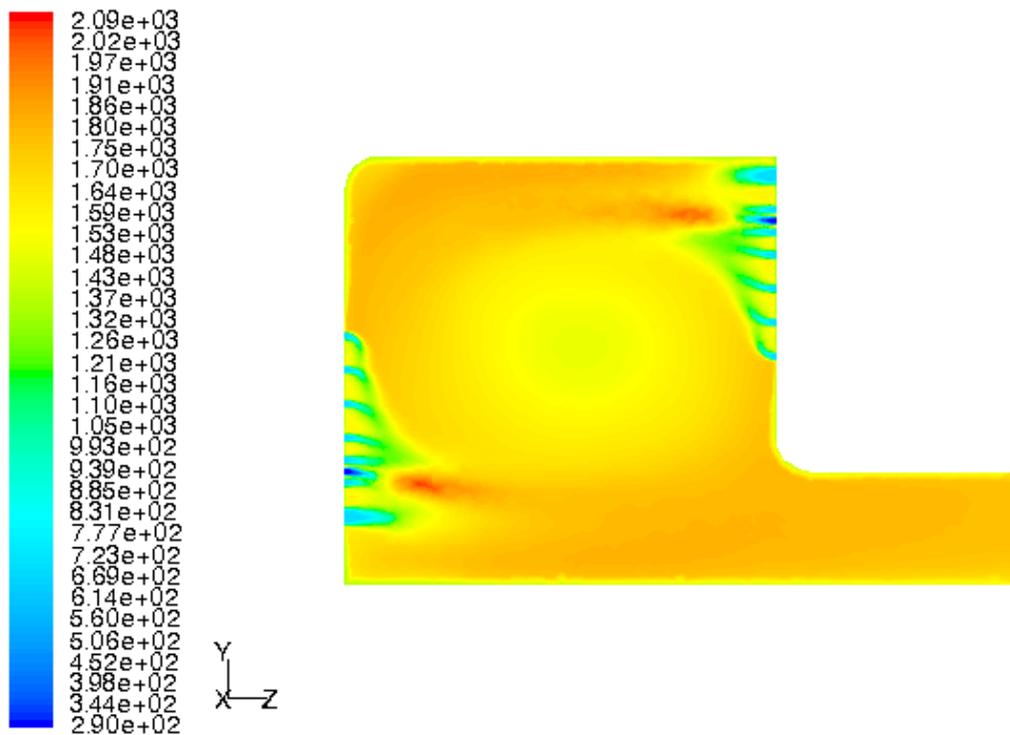
**Figura 10.** Path lines. Tempo di residenza (s). Syngas A.



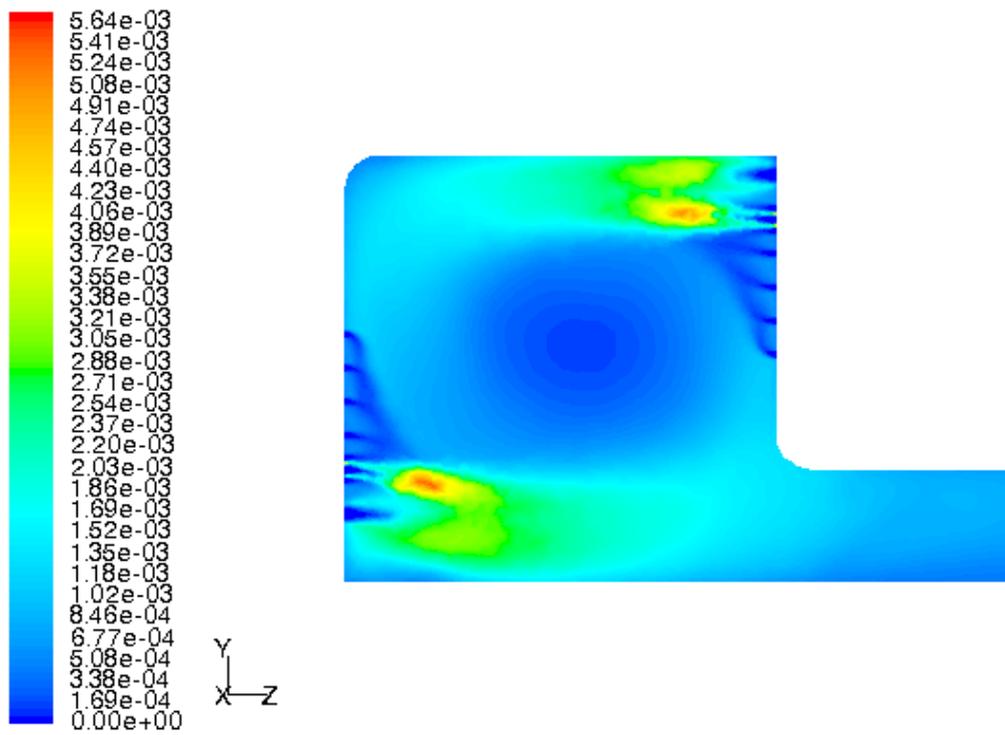
**Figura 11.** Frazione di massa di NO. Syngas A.



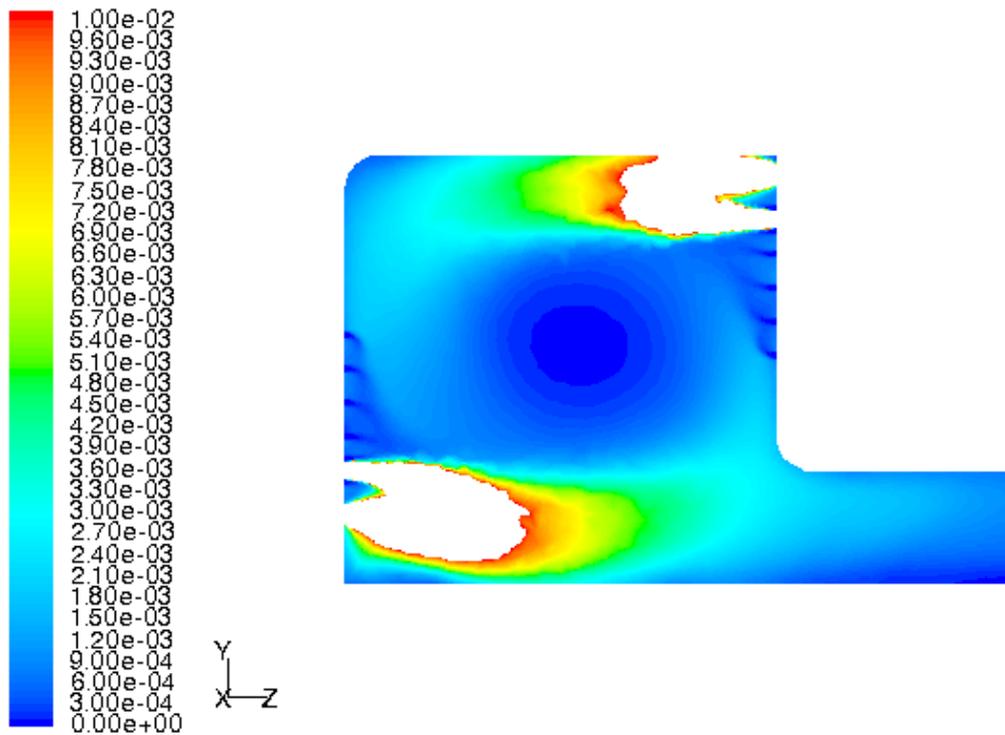
**Figura 12.** Frazione di massa di  $N_2O$ . Syngas A.



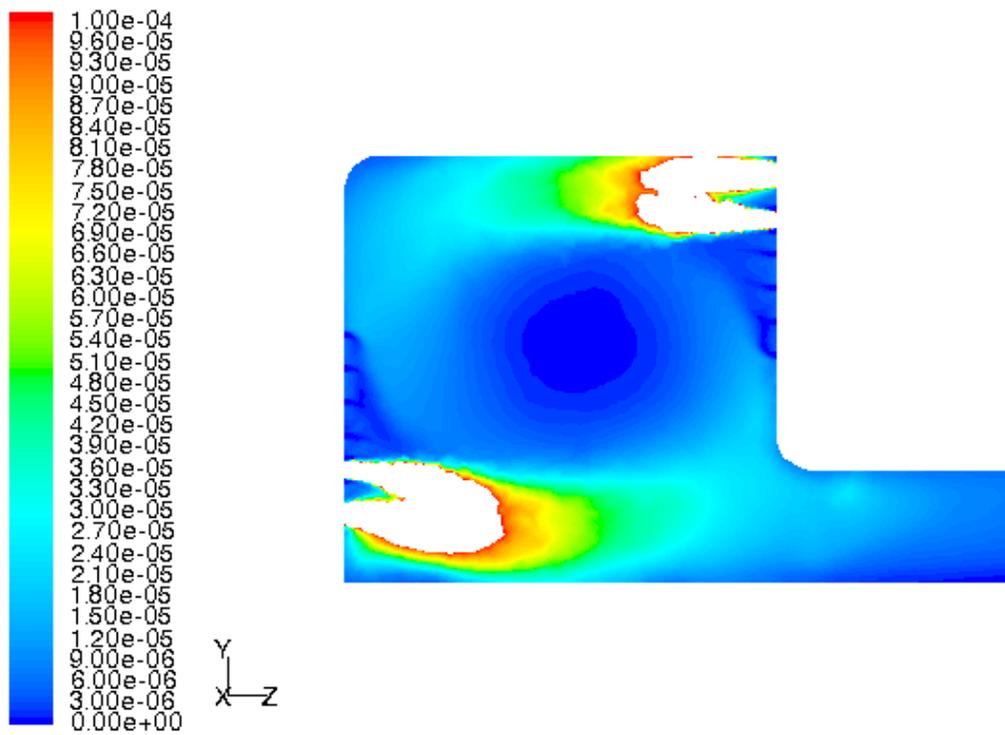
**Figura 13.** Temperature (K). Syngas B.



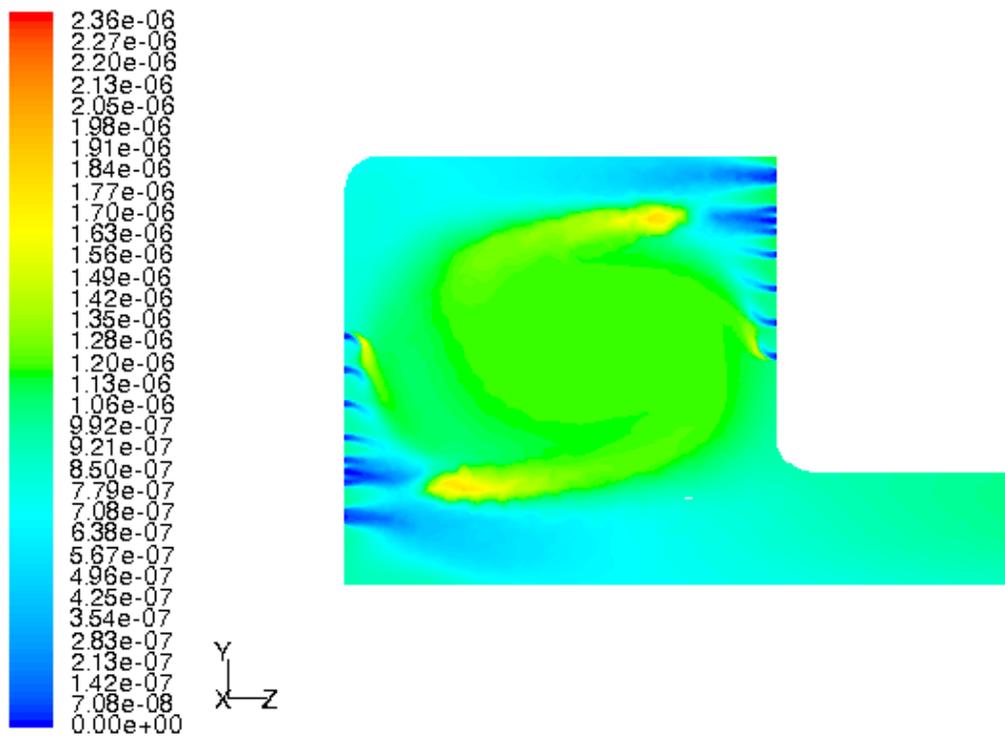
**Figura 14.** Frazione di massa di OH. Syngas B.



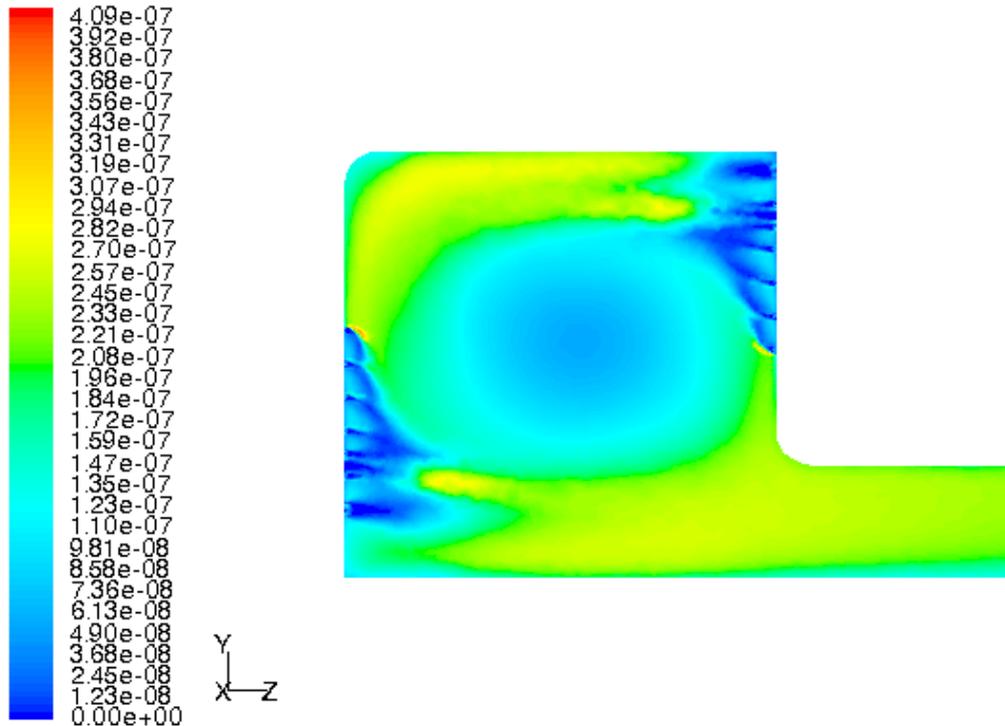
**Figura 15.** Frazione di massa di CO. Syngas B.



**Figura 16.** Frazione di massa di H<sub>2</sub>. Syngas B.



**Figura 17.** Frazione di massa di NO. Syngas B.

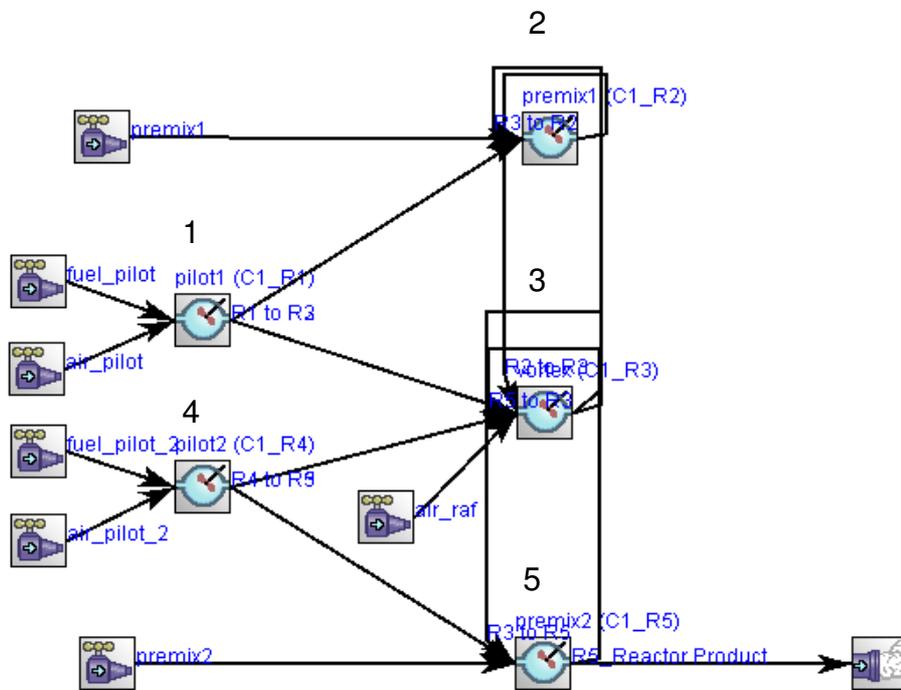


**Figura 18.** Frazione di massa di  $N_2O$ . Syngas B.

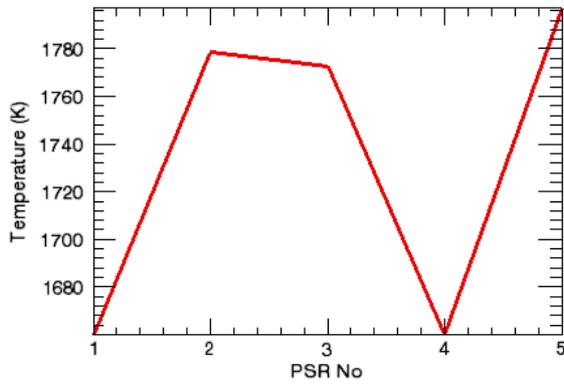
### 3.1.1 Simulazioni Chemkin

Solitamente nello studio di questi sistemi ci si avvale anche di modelli costituiti da network di reattori ideali del tipo PSR (perfectly stirred reactor) e PFR (plug flow reactor) [3, 4], con i quali è possibile studiare il comportamento del reattore utilizzando una chimica più sofisticata, sacrificando però la parte fluidodinamica. Il vantaggio risiede nel fatto che i calcoli sono molto più veloci ed è possibile ricavare informazioni complementari a quelle deducibili con l'analisi CFD. La costruzione di questo network può essere empirica, nel caso in cui si voglia modellare il sistema con un numero limitato di reattori, oppure più rigorosa avvalendosi di un numero elevato di reattori. La configurazione del network e la sua interconnessione si deducono partendo dall'analisi CFD e possono variare per uno stesso bruciatore, con le condizioni operative.

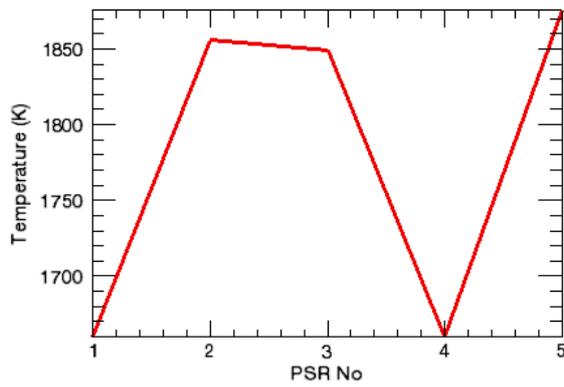
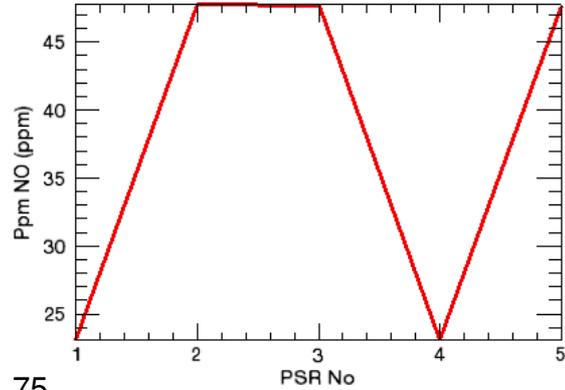
Nel caso in esame, il network ideato è quello riportato nella figura 19. I diversi reattori costituenti il network rappresentano le diverse parti della camera di combustione: ignizione, ricircolo, diluizione, etc. Il calcolo si basa sullo schema cinetico GRI-Mech 3.0 comprendente 53 specie e 325 reazioni. I risultati riportati nelle figure 20 e 21 sono generalmente in linea con quelli della simulazione CFD. Le temperature ottenute nelle diverse zone risultano di circa 150 K superiori a quelle ottenute dalla CFD, il che è probabilmente imputabile al sia modo approssimato in cui è stato fissato il network che alle ipotesi semplificative alla base di questa tipologia di analisi. Gli NO<sub>x</sub> sono comunque limitati, almeno nel caso di eccessi d'aria superiori. Come si è già detto al paragrafo precedente, una riduzione dell'eccesso d'aria comporta il repentino incremento dell'indice di emissione degli NO<sub>x</sub>. Una analisi del genere è certamente utile quando si voglia utilizzare una cinetica chimica molto dettagliata, non applicabile a simulazioni CFD per ragioni computazionali.



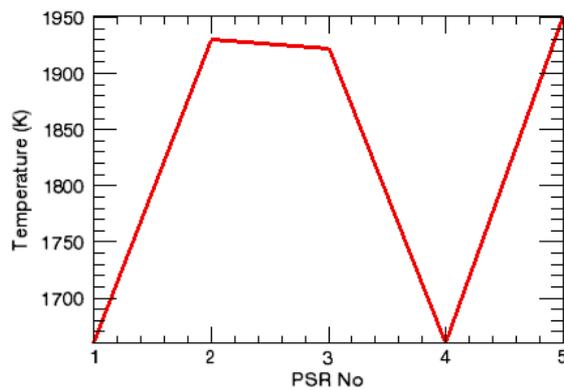
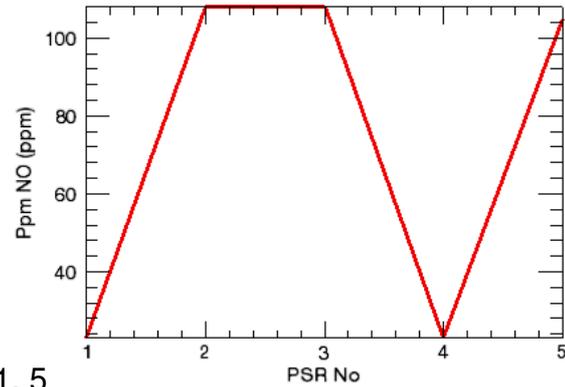
**Figura 19.** Reactors network del prototipo.



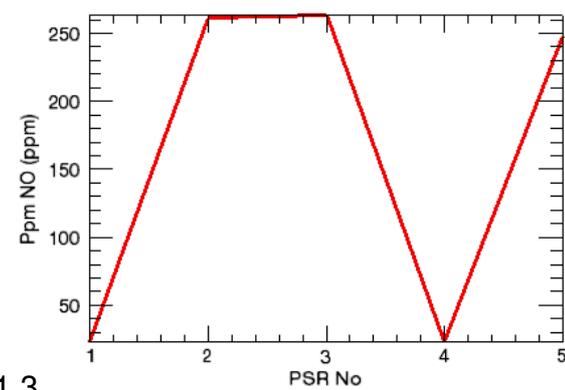
$\lambda = 1.75$



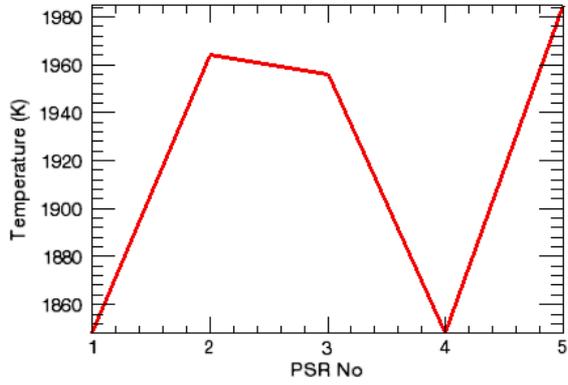
$\lambda = 1.5$



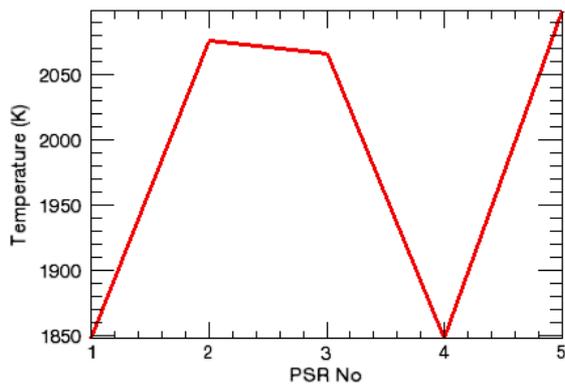
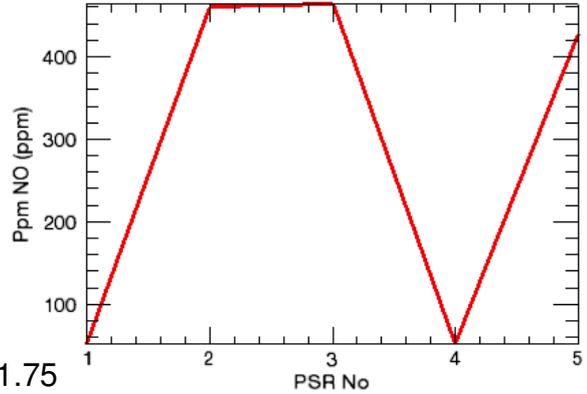
$\lambda = 1.3$



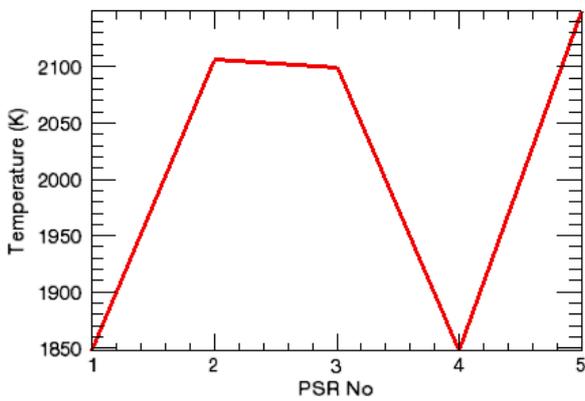
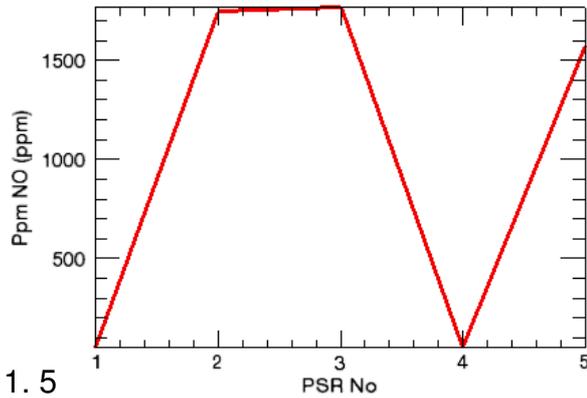
**Figura 20.** Risultati per il syngas con 19% H<sub>2</sub> – 31% CO – 50% N<sub>2</sub>.



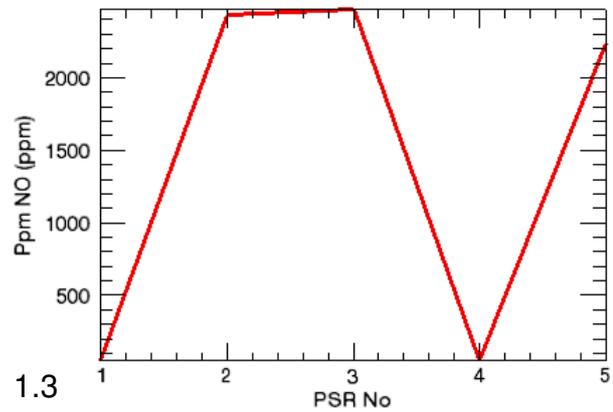
$\lambda = 1.75$



$\lambda = 1.5$



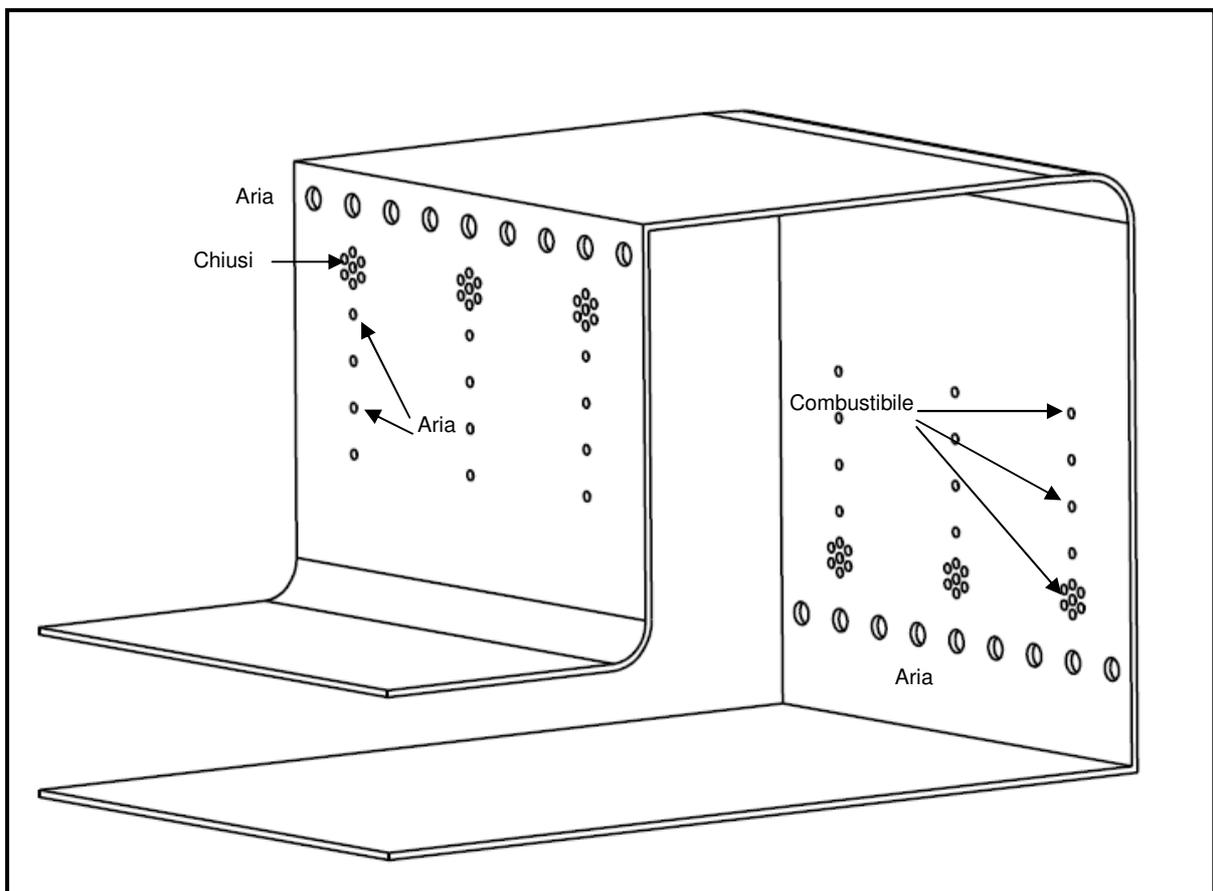
$\lambda = 1.3$



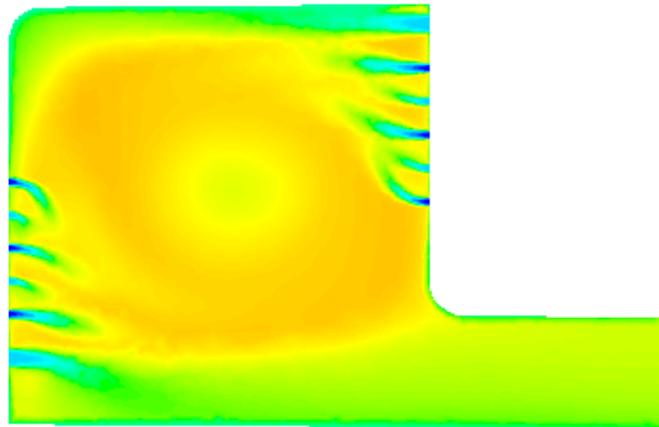
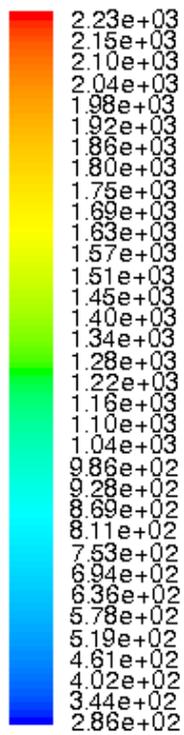
**Figura 21.** Risultati per il syngas con 33% H<sub>2</sub> – 67% CO.

### 3.2 Funzionamento in regime diffusivo

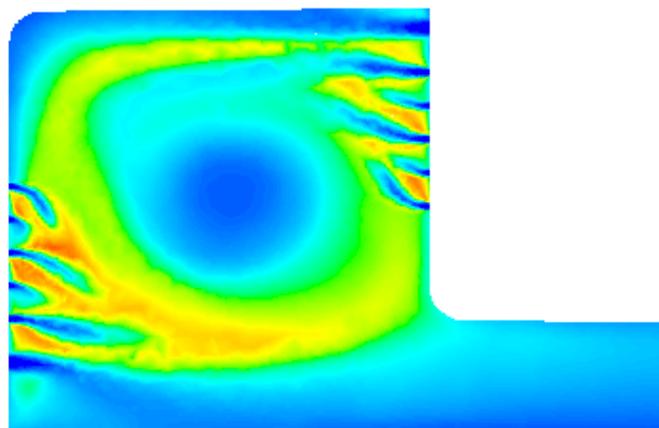
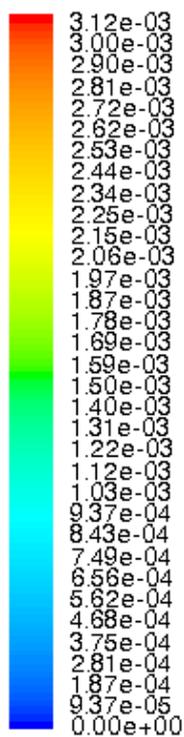
Nel funzionamento in regime diffusivo, i flussi tangenziali sono costituiti da sola aria, i fori disposti circolarmente sono chiusi, mentre dei rimanenti cinque fori verticali tre sono per il syngas e due per l'aria in maniera alternata (fig. 22). A differenza del caso precedente la reazione è concentrata verso il centro del sistema (fig. 23-26). Le temperature sono mediamente più alte. Chiaramente essendo in regime diffusivo, pur con lo stesso eccesso d'aria, il mescolamento dei reagenti non è perfetto e quindi esistono zone con concentrazioni più vicine allo stechiometrico rispetto al caso premiscelato. Nonostante ciò i livelli di  $\text{NO}_x$  registrati si mantengono su valori quasi nulli, mentre per il CO risultano pari a  $\text{EICO}=4.78$  e  $13 \text{ g/kg}_{\text{fuel}}$  (caso A e B rispettivamente). In questo caso inoltre la combustione appare maggiormente distribuita avvicinandosi di più al regime mild.



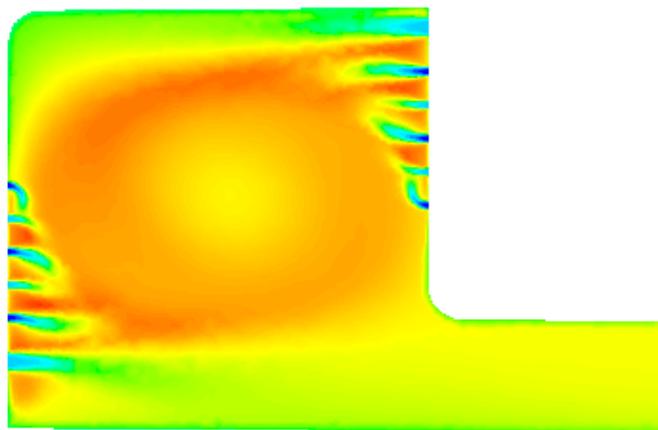
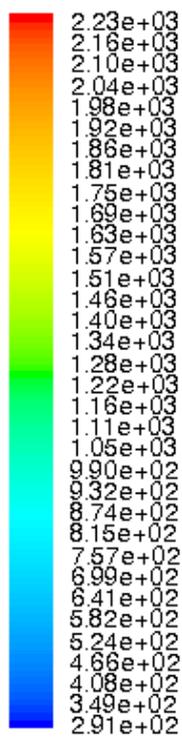
**Figura 22.** Complessivo trapped-vortex sperimentale. Funzionamento diffusivo.



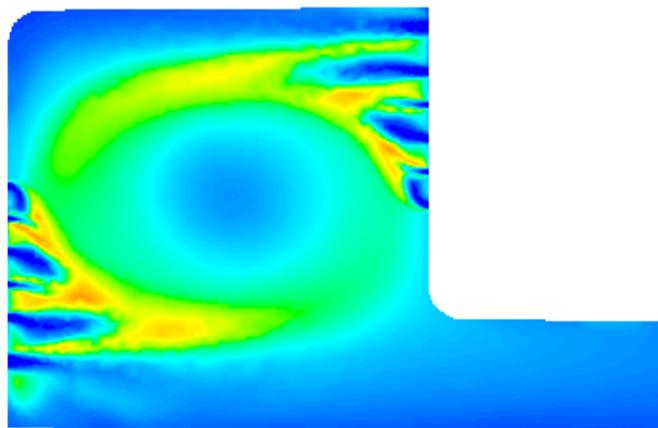
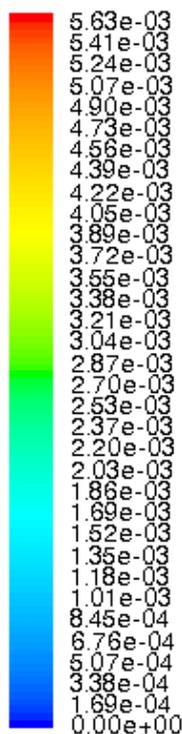
**Figura 23.** Temperature (K). Syngas A.



**Figura 24.** Frazione di massa di OH. Syngas A.



**Figura 25.** Temperature (K). Syngas B.



**Figura 26.** Frazione di massa di OH. Syngas B.

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 26	di 36
	Sigla	Rev.		

## 5. CONSIDERAZIONI SULLA DENSITA' DI POTENZA

Come è stato già detto, il sistema progettato, per il target di potenza fissato, è caratterizzato da una densità di potenza non molto elevata. A tal proposito sono stati studiati gli effetti sul comportamento dell'oggetto in questione nel caso di scalatura. In particolare si è scelto di scalare il sistema mantenendo costanti le velocità di immissione dei flussi coinvolti. Se si immagina di dimezzarne tutte le dimensioni, il volume risulterà ridotto di un fattore  $0.5 \times 0.5 \times 0.5 = 0.125$ , mentre le sezioni di  $0.5 \times 0.5 = 0.25$ . Considerando che le velocità sono rimaste costanti, le portate in gioco saranno quindi scalate di un fattore 0.25. Pertanto la densità di potenza (Potenza/Volume) aumenterà di un fattore  $0.25/0.125 = 2$ . Dalle simulazioni effettuate è risultato peraltro che il comportamento del bruciatore rimane invariato tanto che i campi di velocità, temperatura, specie etc. sono perfettamente sovrapponibili. In definitiva si può concludere che al diminuire della taglia complessiva della macchina e quindi di conseguenza delle dimensioni complessive della camera di combustione, la densità di potenza aumenta secondo la correlazione  $Pot^{-0.5}$ .

La camera di combustione è stata studiata e sarà effettuata la sperimentazione in condizioni di pressione atmosferica. In realtà le pressioni operative sono ben più alte e dipendono dal rapporto di compressione della macchina. Si è ritenuto quindi interessante verificarne il funzionamento in condizioni di pressione (circa 20 bar). L'aumento della pressione operativa da 1 a 20 bar, ragionando sempre a parità di velocità, comporta l'incremento della potenza di 20 volte, ma non della densità di potenza, che essendo valutata in  $MW/m^3bar$ , resta invariata. È utile sottolineare che lo schema cinetico adottato è ancora valido ed efficiente in queste condizioni. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono anche stavolta in linea con quelli già mostrati in condizioni atmosferiche per ciò che riguarda il campo di moto. Le temperature risultano invece sensibilmente più alte sia per il caso diffusivo che per quello premiscelato, pur senza causare indici di emissione degli  $NO_x$  elevati.

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 27 di 36
	Sigla	Rev.	

## 6. MODIFICHE ALL'IMPIANTO

L'alimentazione del combustibile sarà effettuata mediante bombole. Nella sperimentazione si indagherà, tra le altre cose, sull'effetto prodotto dall'utilizzo di diversi rapporti aria/syngas sia per il caso premiscelato che per quello diffusivo. Sarà necessario prevedere diverse linee di alimentazione, ognuna regolabile in maniera indipendente e installare un miscelatore syngas/aria immediatamente a monte dell'iniezione in camera di combustione, per motivi di sicurezza legati a possibili ritorni di fiamma. Dovranno essere predisposte le seguenti linee di alimentazione:

### Caso premiscelato

Linea1:

Aria flussi tangenziali con la possibilità di escludere una delle due parti (quella opposta al lato uscita)

Range portata aria: 0.0068 – 0.0480 kg/s; a 700 K 48.96-345.60 m<sup>3</sup>/h; a 273 K 19.12-135 Nm<sup>3</sup>/h

Linea2:

Aria flussi verticali con la possibilità di escludere una delle due parti (quella opposta al lato uscita)

Range portata aria: 0.0044 – 0.0265 kg/s; a 700 K 31.68-190.80 m<sup>3</sup>/h; a 273 K 12.37-74.53 Nm<sup>3</sup>/h

Linea3:

Syngas premiscelato con la possibilità di escludere una delle due parti (quella opposta al lato uscita)

Range portata syngas 0.0013 – 0.0150 kg/s; a 293 K 4.92-56.84 m<sup>3</sup>/h; a 273 K 4.60-53.12 Nm<sup>3</sup>/h

Linea4:

Syngas diffusivo con la possibilità di escludere una delle due parti (quella opposta al lato uscita)

Range portata syngas: 0.0004 – 0.0059 kg/s; a 293 K 1.61-22.28 m<sup>3</sup>/h; a 273 K 1.50-20.82 Nm<sup>3</sup>/h

### Caso diffusivo

Linea1:

Aria flussi tangenziali con la possibilità di escludere una delle due parti (quella opposta al lato uscita)

Range portata aria: 0.0068 – 0.0480 kg/s; a 700 K 48.96-345.60 m<sup>3</sup>/h; a 273 K 19.12-135 Nm<sup>3</sup>/h

Linea2:

Aria flussi verticali con la possibilità di escludere una delle due parti (quella opposta al lato uscita)

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 28 di 36
	Sigla	Rev.	

Range portata aria: 0.0011 – 0.0069 kg/s; a 700 K 7.92-49.68 m<sup>3</sup>/h; a 273 K 3.09-19.40 Nm<sup>3</sup>/h

Linea3:

Syngas con la possibilità di escludere una delle due parti (quella opposta al lato uscita)

Range portata syngas 0.0034 – 0.0210 kg/s; a 293 K 12.88-79.59 m<sup>3</sup>/h; a 273 K 12.03-74.34 Nm<sup>3</sup>/h

La temperatura dell'aria deve essere di circa 700 K. Sarà pertanto necessario dotare l'impianto di un sistema di preriscaldamento di tutta l'aria addotta, in un range 600-800 K, allo scopo di avere un certo margine di manovra. Uno scambiatore a resistenze elettriche è certamente il sistema più adatto alle esigenze. La potenza termica del preriscaldatore risulta di circa 40 kW.

È da valutare la necessità di predisporre il raffreddamento delle pareti del combustore onde preservarne l'integrità.

Le pareti laterali del combustore saranno realizzate in quarzo in modo da permettere l'accesso ottico, al fine di effettuare misure che prevedono l'uso di apparecchiature laser.

Le piastre forate destra e sinistra, saranno intercambiabili e potranno quindi essere sostituite.

Gli spigoli dell'oggetto in questione possono anche essere non arrotondati se particolari esigenze costruttive lo richiedessero.

## 7. MODIFICHE AL TVC ESISTENTE

È stato altresì approfondito lo studio del sistema trapped-vortex attualmente esistente. Il combustore era stato progettato per funzionare adducendo tutto il combustibile e parte dell'aria necessaria alla combustione all'interno della prima cavità. Un flusso anulare di sola aria garantiva la formazione del vortice nella stessa ed il completamento della combustione. Nella nuova modalità di

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 29	di 36
	Sigla	Rev.		

funzionamento studiata (fig. 27), all'interno della cavità viene realizzata una combustione pilota (da circa 20 kW), adducendo solo una piccola parte del combustibile e della relativa aria, sostituendo al flusso d'aria anulare un flusso premiscelato aria/combustibile, introdotto a forte velocità (circa 100 m/s). C'è da dire che rispetto al nuovo sistema la densità di potenza è circa cinque volte maggiore. Anche in questo caso lo studio è stato effettuato attraverso simulazioni CFD (con gli stessi modelli del caso precedente) (fig. 28-34) e CHEMKIN (con lo stesso meccanismo del caso precedente). Il network individuato è riportato in figura 35. Si è utilizzato in questo caso un PSR per la cavità ed un PFR per il flusso premiscelato, in modo da valutare ricavare l'andamento delle variabili di interesse in funzione della distanza dall'ingresso.

I risultati ottenuti si sono dimostrati abbastanza buoni. La fiamma pilota all'interno della cavità al riparo dal flusso anulare, consente l'accensione e la combustione del flusso premiscelato. Nonostante secondo noi la posizione dei fori ricavati nella piastra non sia ottimale, si evidenzia la presenza di un vortice decentrato verso l'esterno della cavità, più due piccoli ricircoli negli spigoli. Al rapido consumo dell'idrogeno, segue una più lenta conversione del CO, che si ultimava quasi verso l'uscita. Pertanto il bruciatore sfrutta quasi per intero la lunghezza del condotto in cui è inserito. Le simulazioni sono state effettuate fissando  $\lambda=1.75$  per il flusso anulare e i risultati riportati nelle figure successive si riferiscono al caso del syngas meno ricco di idrogeno, ma nella configurazione attuale per quel che riguarda la piastra forata. Dato il limitato contenuto di idrogeno, si riesce a contenere comunque i picchi di temperatura. Come si vede dalle immagini gli  $\text{NO}_x$  prodotti si attestano su livelli decisamente bassi e diventa consistente il contributo di  $\text{N}_2\text{O}$ , ma l'indice di emissione è molto vicino a zero. Per quel che riguarda il CO risulta invece pari a  $\text{EICO}=1.86 \text{ g/kg}_{\text{fuel}}$ .

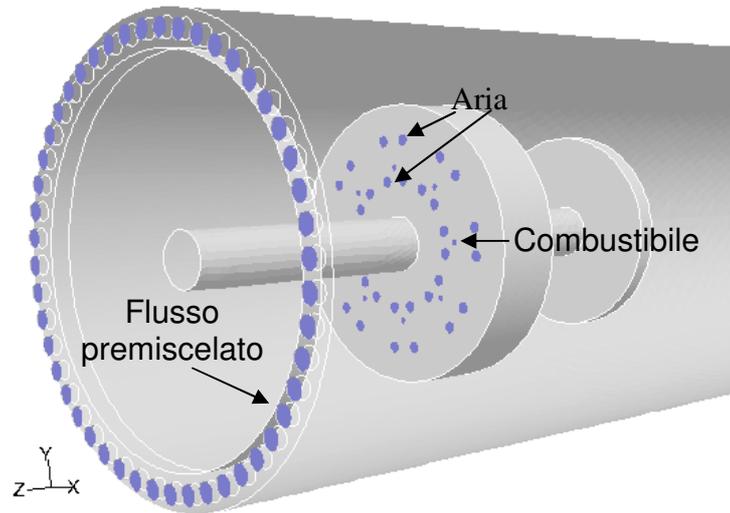
 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 30 di 36
	Sigla	Rev.	

Nel caso del syngas più ricco, la distanza dei fori dell'aria rispetto a quelli del combustibile non consente un rapido abbattimento delle temperature nella cavità, che risultano di circa 200 K più elevate.

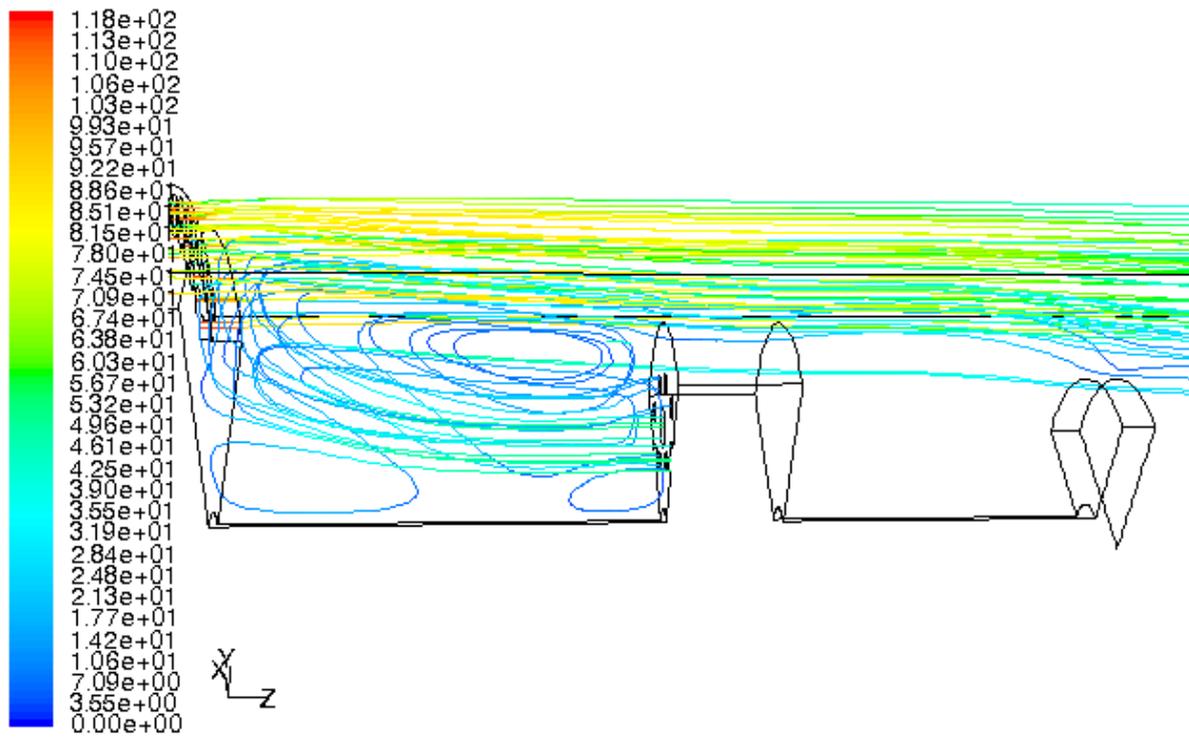
Sarà pertanto necessario apportare alcune modifiche al combustore oggi disponibile. In primo luogo dovrà essere realizzato un sistema di premiscelamento ed il flusso ottenuto verrà introdotto attraverso una corona circolare forata per ridurre la superficie di efflusso rispetto al vecchio sistema, in modo da realizzare velocità di ingresso dell'ordine di 100 m/s. La potenza complessiva è ancora di circa 100 kW.

Relativamente alla fiamma pilota, allo scopo di garantire velocità e rapporti di equivalenza adatti ad evitare picchi di temperatura, sarà necessario modificare per quanto possibile la piastra forata, disponendo i fori più esterni dell'aria vicino a quelli centrali del combustibile, allo scopo di smaltire rapidamente il calore sviluppato dalla reazione diffusiva. I fori dell'aria e del combustibile sono quindi differenti rispetto al vecchio caso, in numero e dimensione, ma si è cercato di conservare la distanza dei centri di ciascuno rispetto all'asse di simmetria del combustore, in modo da poter mantenere lo stesso sistema di distribuzione dei fluidi e poter sostituire solo la piastra forata (fig. 22).

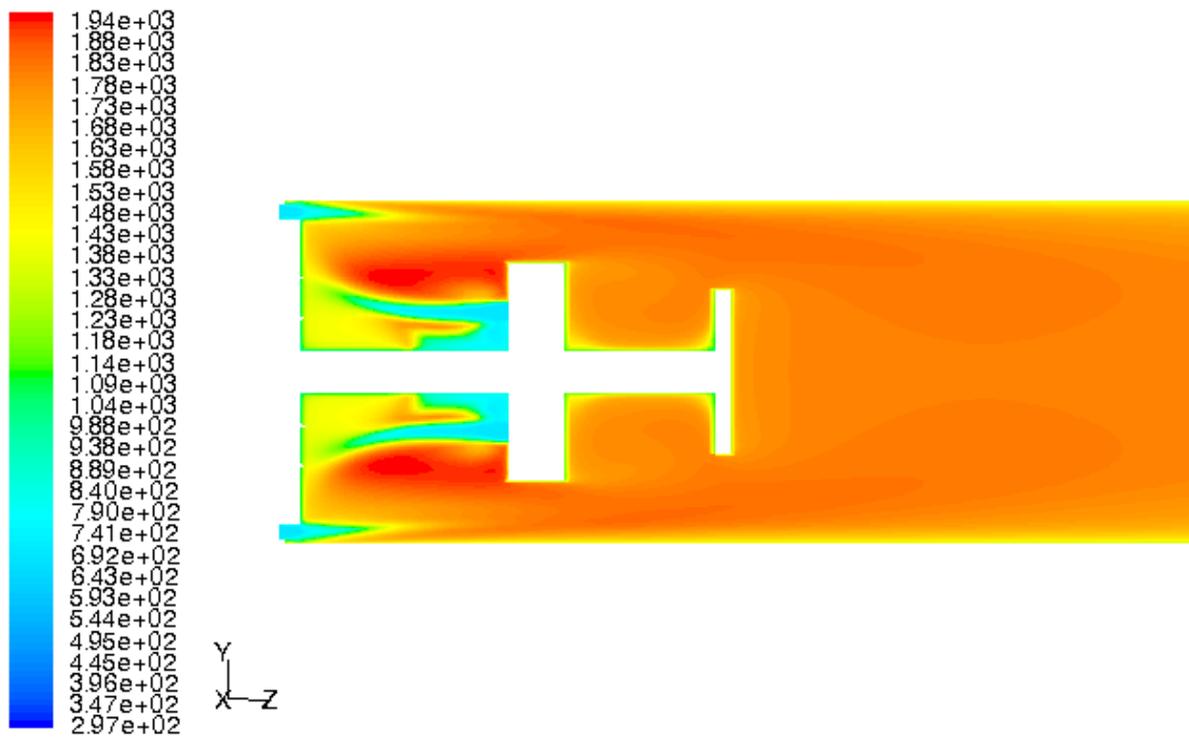
Ragionando con gli stessi combustibili, con la stessa potenza totale ed eccesso d'aria del caso del nuovo sistema descritto nel paragrafo precedente, ne conseguono gli stessi range di portate, con la differenza che ognuna delle quattro linee stavolta non è divisa in due (parte destra e sinistra), ma è addotta attraverso un unico set di fori.



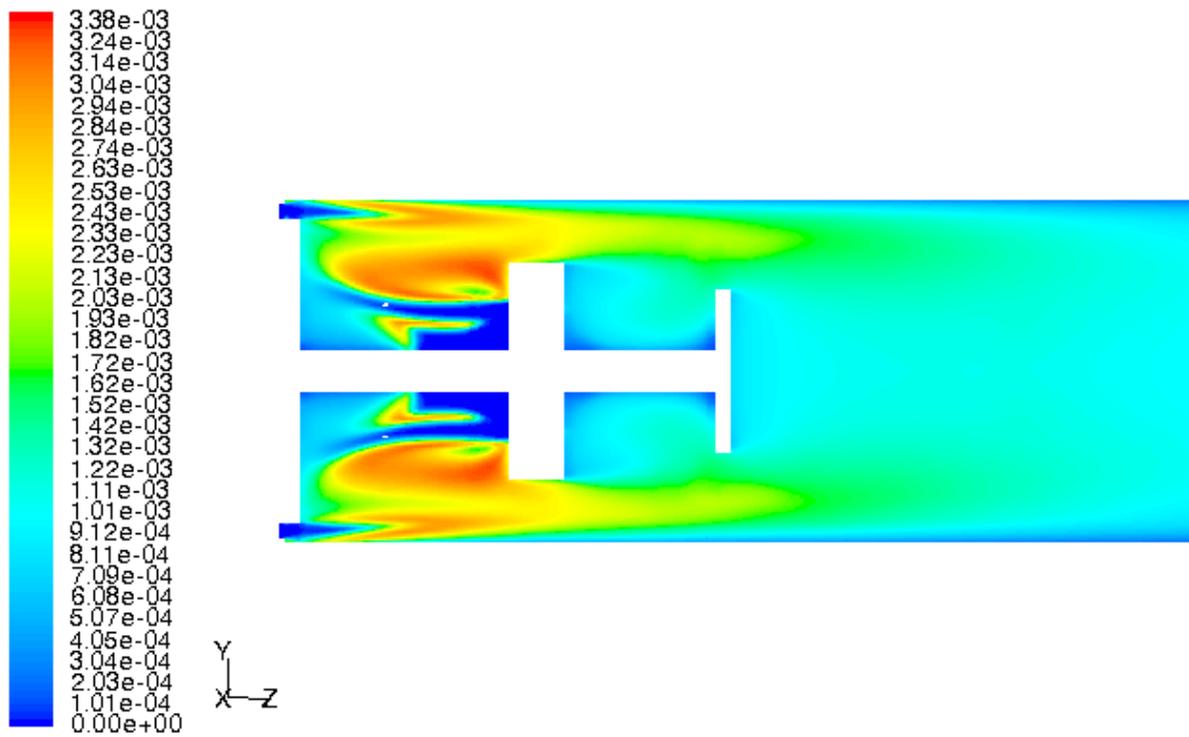
**Figura 27.** TVC modificato.



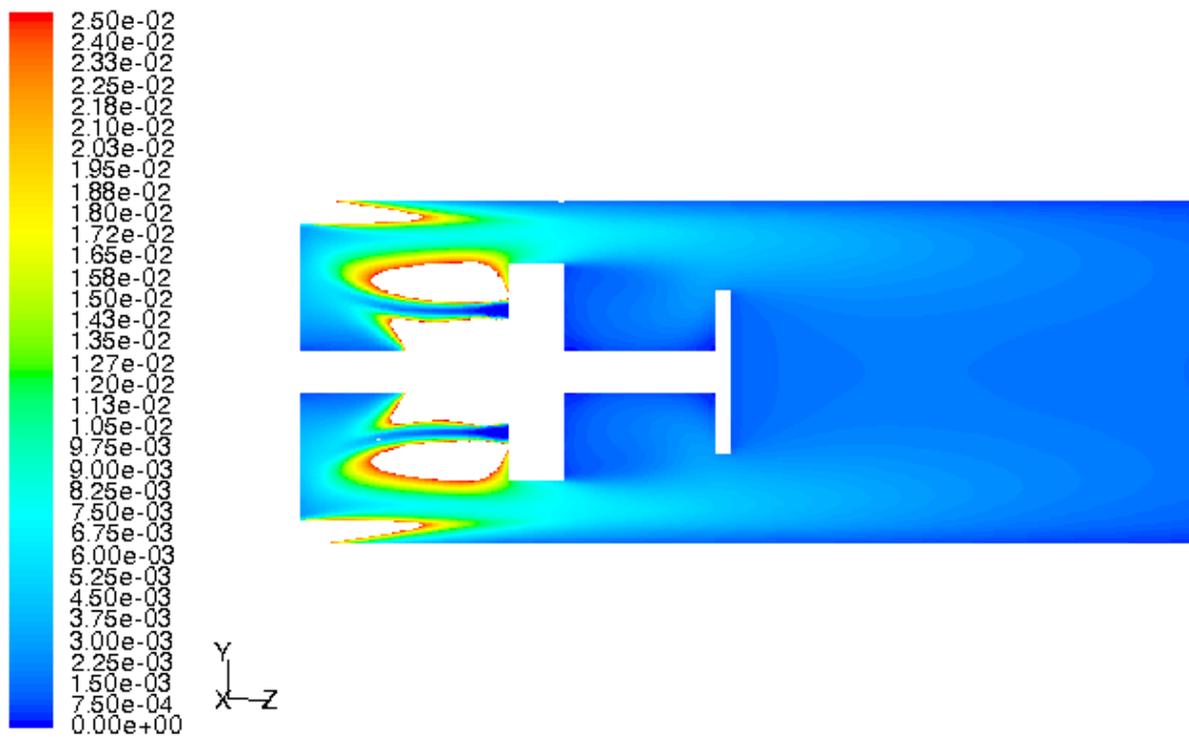
**Figura 28.** Path lines. Velocità (m/s). Syngas A.



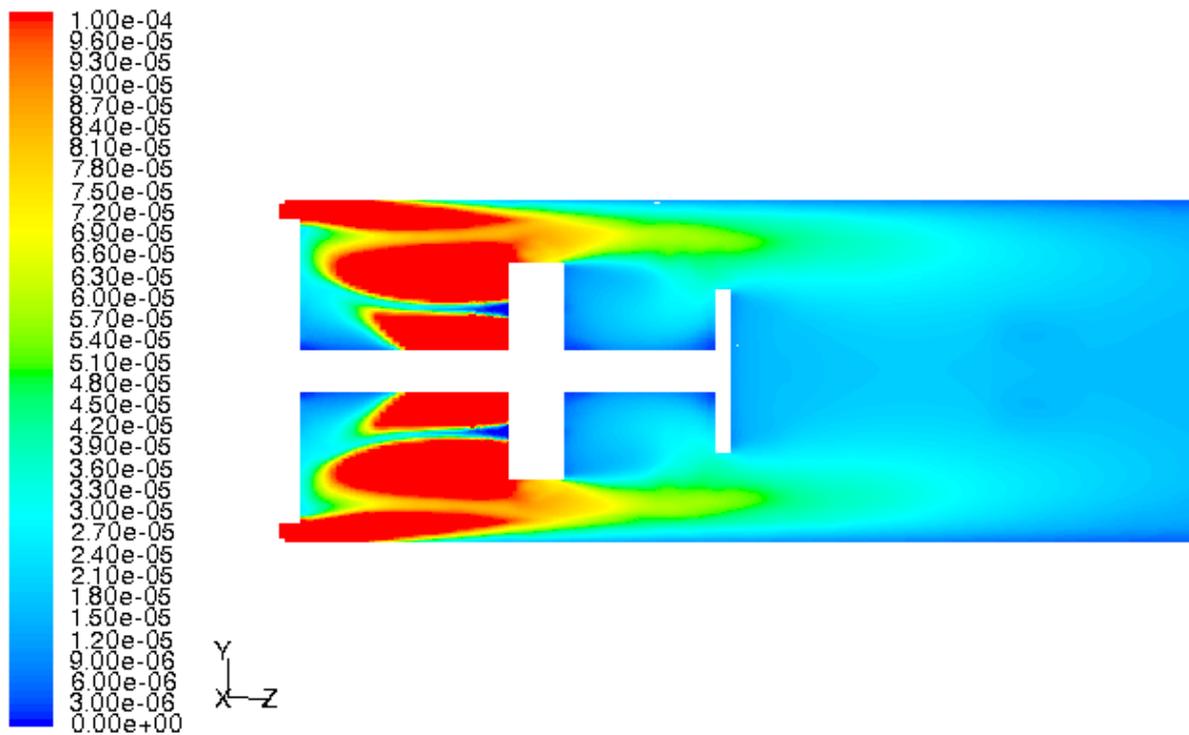
**Figura 29.** Temperature (K). Syngas A.



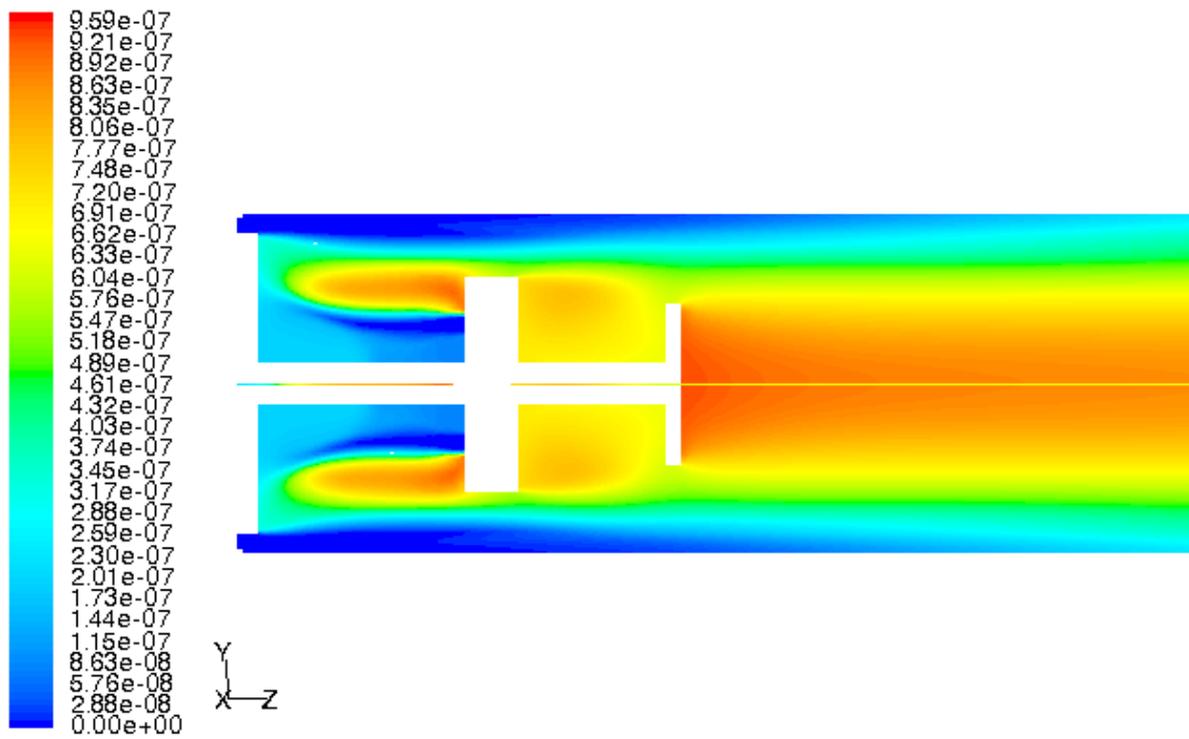
**Figura 30.** Frazione di massa di OH. Syngas A.



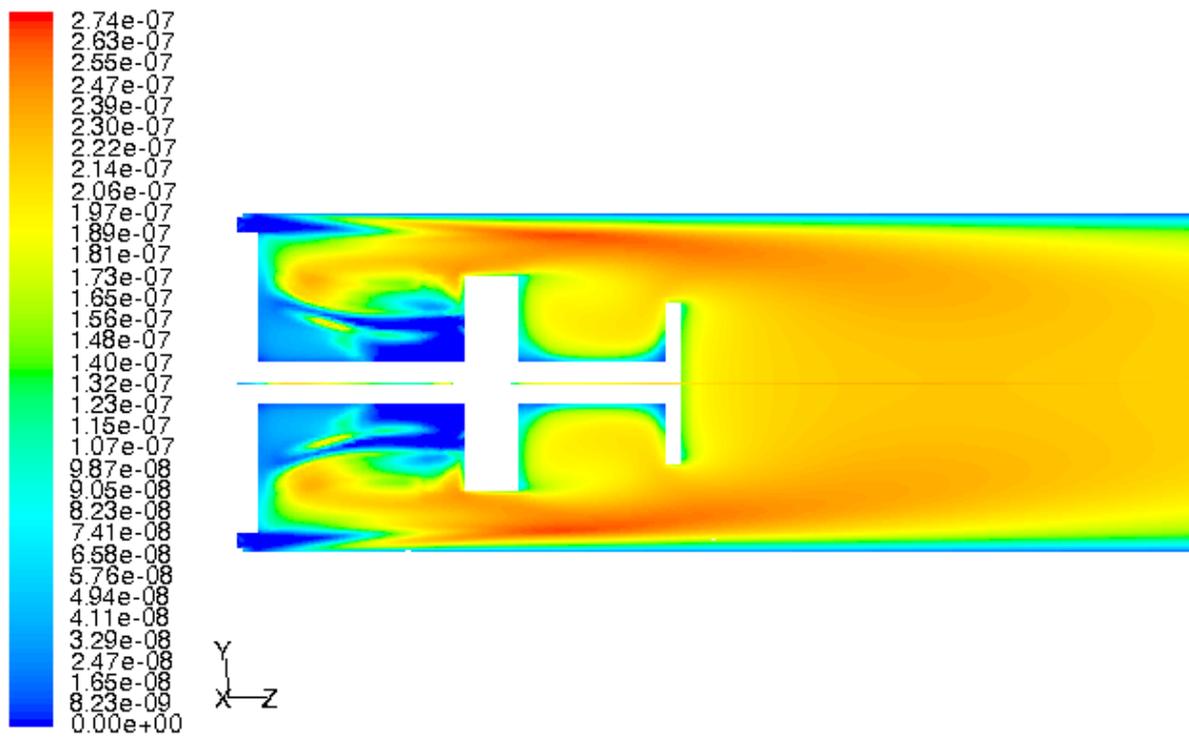
**Figura 31.** Frazione di massa di CO. Syngas A.



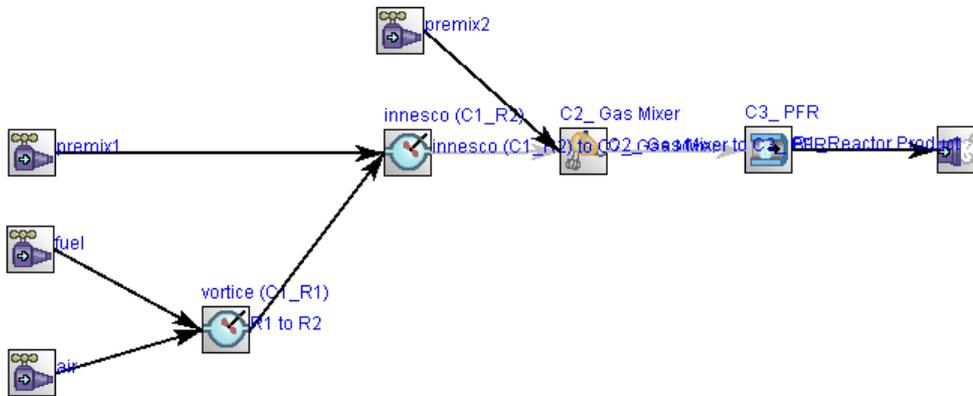
**Figura 32.** Frazione di massa di H<sub>2</sub>. Syngas A.



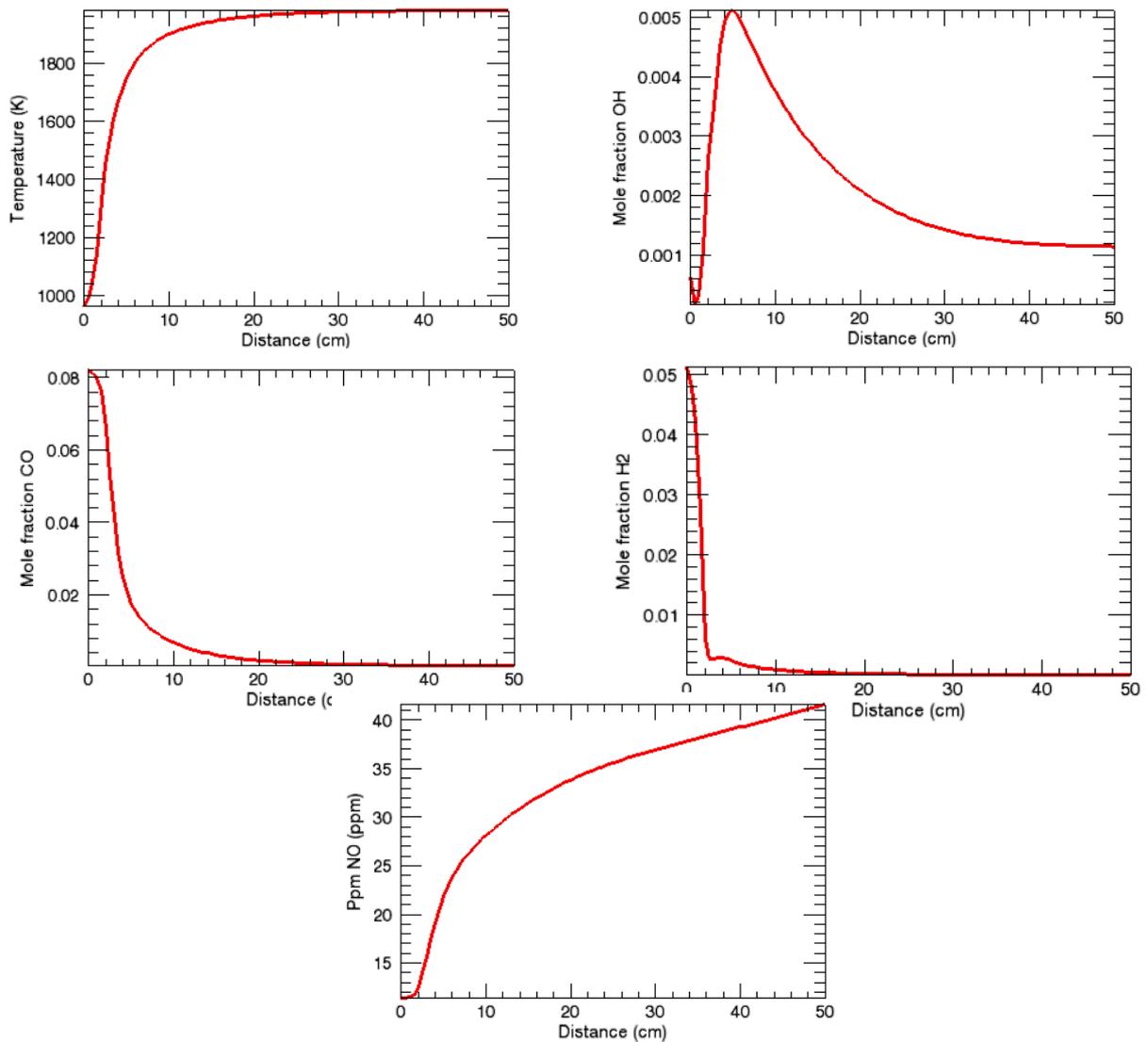
**Figura 33.** Frazione di massa di NO. Syngas A.



**Figura 34.** Frazione di massa di N<sub>2</sub>O. Syngas A.



**Figura 35.** Reactors network del TVC modificato.



**Figura 36.** Risultati simulazioni CHEMKIN. Syngas A.

 UTTEI-COMSO	Documento	Data	Pag. 36 di 36
	Sigla	Rev.	

## BIBLIOGRAFIA

[1] W. M. Roquemore, D. Shouse, D. Burrus, A. Johnson, C. Cooper, B. Duncan, H. Y. Hsu, V. R. Katta, G. J. Sturgess and I. Vihinen. Trapped Vortex Combustor Concept for Gas Turbine Engines. AIAA Paper 2001-0483, Reno NV, Jan. 8-11, 2001.

[2] A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi. The ignition, combustion and flame structure of carbon monoxide/hydrogen mixtures. Note 1: Detailed kinetic modeling of syngas combustion also in presence of nitrogen compounds. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 3471 – 3485.

[3] I.V. Novosselov, P.C. Malte, S. Yuan, R. Srinivasan, J.C.Y. Lee. Chemical Reactor Network Application To Emissions Prediction For Industrial DLE Gas Turbine. Proceedings of GT2006 ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air May 8-11, Barcelona, Spain 2006.

[4] T. Faravelli, L. Bua, A. Frassoldati, A. Antifora, L. Tognotti, E. Ranzi. A new procedure for predicting NOx emissions from furnace. Computers and Chemical Engineering 25 613–618, 2001.