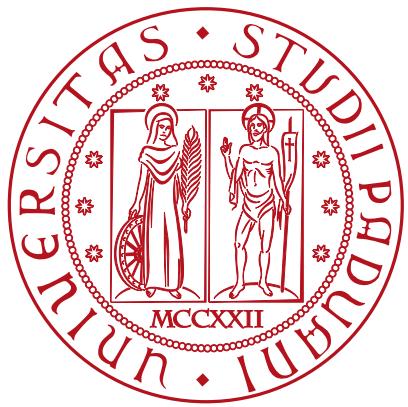


Università degli Studi di Padova
Laboratorio di Propulsione Aerospaziale 2020

SLD
Student Laboratory Documentation



Relazione conclusiva

Nome file: LPA2020_RC_20201108.pdf

Denominazione team: Gruppo Chimico 2

Nome prodotto:

HYdrogen PEroxide Micro Propulsion System for cubesats

Team	Nome	Università
Gruppo Chimico 2	Alberto Scomparin	Università di Padova
	Abdel Karim Oumami	Università di Padova
	Lorenzo Gerolin	Università di Padova
Versione	Data	Tipo documento
1	Quando sarà	Spec
		Valido da
		8 Novembre 2020

Indice

1 Sommario	3
2 Modello PDR	3
3 Strategia di simulazione	3
3.1 Flusso di lavoro	3
3.2 Software impiegato e parametri	4
3.3 Parametri fisici	5
3.4 Margini di sicurezza	5
3.5 Parametri di studio	5
4 Limiti progettuali	5
5 Simulazioni modello PDR	6
5.1 Risultati della simulazione	6
6 Studio sequenziale di ottimizzazione della camera	6
6.1 Modello 1: Riduzione volume camera e incremento angolo convergente	6
6.1.1 Risultati della simulazione	7
6.2 Modello 2: Swirl di ossidante e di combustibile - Aumento velocità iniezione combustibile, diminuzione velocità iniezione ossidante	8
6.2.1 Risultati della simulazione	8
6.3 Modello 3: Ulteriore rallentamento ossidante	8
6.3.1 Risultati della simulazione	9
6.4 Modello 4: Disaccoppiamento iniezione ossidante e fuel - Iniezione combustibile vicino a gola	9
6.4.1 Risultati della simulazione	10
6.5 Modello 5: Swirl da iniezione sia di ossidante che di combustibile	11
6.5.1 Risultati della simulazione	12
6.6 Modello 6: camera accorciata	13
6.6.1 Risultati della simulazione	13
6.7 Modello 7: doppio swirl injector	13
6.7.1 Risultati della simulazione	13
6.8 Modello 8: doppio swirl injector più veloce	13
6.8.1 Risultati della simulazione	13
6.9 Modello 9: iniezione ancora accelerata di ossidante	14
6.10 Modello 10: corona circolare di ossidante con impinging di fuel	15
6.10.1 Risultati della simulazione	16

7 Modello finale: iniezione ossidante a corona con impinging sfasato di fuel	17
7.0.1 Risultati della simulazione	18
8 Verifica tenuta	19
9 Verifica flussi termici	22
10 Conclusioni	25
11 Sviluppi futuri	26

1 Sommario

In questa relazione viene esposto il risultato delle simulazioni numeriche effettuate per studiare la fluidica interna e termica della camera di combustione e dell'ugello. Vengono intraprese principalmente due strade di simulazione. La prima indaga un flusso con iniezione tangenziale di combustibile freddo, oppure di ossidante, od entrambi, in diverse configurazioni. La seconda ipotizza un sistema di iniezione innovativo a corona circolare.

2 Modello PDR

La soluzione proposta nella PDR consiste in una camera di combustione lunga 25 mm e con diametro di 15 mm. Il convergente ha un angolo di 45°. L'iniezione di ossidante è assiale in testa alla camera di combustione, mentre l'iniezione di combustibile è perpendicolare all'asse e tangente alla parete della camera in modo da favorire flusso tangente alla parete per raffreddarla con il combustibile che entra a bassa temperatura.

In questa fase di progettazione è ancora ignota la distribuzione del flusso all'interno della camera, in quanto è stato modellato precedentemente solo come flusso totalmente assiale e perfettamente miscelato (senza variazione lungo le sezioni). L'obiettivo della simulazione numerica è di indagare la distribuzione delle temperature e ridurre il volume della camera in modo da verificare le prestazioni e ottimizzare il sistema, diminuendo la massa di materiale richiesta per il blocco camera-ugello-radiatore e di conseguenza la massa inerte.

3 Strategia di simulazione

3.1 Flusso di lavoro

Per la validazione del modello sviluppato in PDR e per i miglioramenti successivi, si è impiegato un approccio orientato prima alla fluidica e, successivamente, alle verifiche di tenuta e di distribuzione del flusso termico.

3.2 Software impiegato e parametri

La fluidica viene studiata in Ansys Fluent, versione 2020 R1 con una modellazione di turbolenza generale $k - \omega - SST$ senza specifiche funzioni di parete, ma sfruttando un'inflation mirata della mesh su tutte le pareti della camera tranne gli inlet e gli outlet. Il modello di combustione è la non-premixed combustion che sfrutta un database termochimico e le concentrazioni dei reagenti in ogni volume computazionale per fornire i risultati della reazione. Per semplificare e velocizzare la trattazione del problema si sceglie di limitare a 4 il numero di specie presenti nella simulazione. Fluent ricava i 3 prodotti più abbondanti oltre al propino C_3H_4 :

- H_2O
- CO_2
- CO

che vanno a ricoprire oltre il 90% dei prodotti di reazione. La pressione di funzionamento della camera viene impostata a 3.65 Bar come previsto dalla simulazione Matlab della gasdinamica del sistema. I parametri che sono stati presi in considerazione sono i residui delle varie grandezze in gioco. Questi sono ritenuti validi al di sotto di 10^{-4} per la grandezza che converge più lentamente che è generalmente l'energia.

La termica viene studiata in Patran Nastran. La condizioni al contorno sono state imposte per zone data la difficoltà di effettuare un'analisi termofluidica accoppiata e la difficoltà di traslare i risultati del dominio fluido sulla parete interna del dominio meccanico-termico, ovvero traslare mesh e risultati della parete esterna del dominio fluido sulla parete interna del dominio meccanico-termico. Si imposta quindi in fluent una temeratura di parete pari a 873 K, ovvero il limite massimo riportato in PDR per la lega di cui è fatta la camera. Si ricavano i flussi termici a parete da cui si ricavano i coefficienti h convettivi dell'equazione generale $q = hA\Delta T$. Questi coefficienti vengono ricavati mediati per 5 zone del motore:

- camera di combustione
- convergente
- gola
- inizio divergente
- sezione finale del divergente

e successivamente passati a Patran-Nastran insieme ai valori medi nelle stesse zone della temperatura del fluido a parete. Si ottiene quindi una simulazione che riproduce sufficientemente bene il fenomeno, anche se è presente un forte smoothing dei coefficienti nelle zone più estese. Considerando che dalle analisi le zone con i maggiori picchi termici sono il convergente e la gola, si sono prese le suddette zone su cui mediare i coefficienti con un'estensione minore rispetto alle zone più fredde della camera in cui uno smoothing non produce problematiche nei risultati della simulazione (i.e. spikes di temperatura non accettabili).

suddividendo la superficie interna in diverse zone nelle quali sono collocati i picchi e mediando su tali zone in modo da facilitare i calcoli. Questo procedimento si suppone accettabile vista l'alta conducibilità del materiale impiegato per il blocco camera-ugello-radiatore.

3.3 Parametri fisici

Visto il funzionamento intrinsecamente variabile del sistema nel corso del funzionamento, si è deciso di studiare il comportamento nella configurazione di temperatura media del serbatoio (quella a 20 °C) caratterizzata da portate di ossidante e combustibile rispettivamente pari a $36.6 \cdot 10^{-5}$ e $5.63 \cdot 10^{-5}$ kg/s, le quali, con simulazione di gasdinamica monodimensionale, portano ad una pressione in camera pari a 3,65 bar. La temperatura adiabatica di fiamma del propino è tra i 2700 K e i 2800 K nell'intervallo di pressioni massime e minime. Il numero di Reynolds, sul quale vengono poi basati i calcoli di flusso termico convettivo è fortemente dipendente dalla strategia di iniezione impiegata.

3.4 Margini di sicurezza

Per quanto riguarda i flussi termici, viene effettuata una verifica utilizzando un margine di sicurezza pari a 1.1.

La verifica della tenuta viene effettuata sulla pressione di esercizio massima pari a 9,15 bar, con un coefficiente di sicurezza di 1.1.

3.5 Parametri di studio

Una volta effettuate le simulazioni, i parametri su cui si è indagato per comprendere il risultato sono principalmente:

- Pressione: per lo studio di efficienza di combustione e per confronto con il valore ottenuto dalla gasdinamica semplificata
- Temperatura: per individuare successivamente i picchi di temperatura a parete del sistema in combustione
- Numero di Mach
- Concentrazione di propino, ossigeno e anidride carbonica: per visualizzare la distribuzione della reazione di combustione e per verificare la combustione completa del propino
- Linee di flusso: per visualizzare la traiettoria delle particelle del fluido qualora sia presente un flusso swirlato

4 Limiti progettuali

La modellazione del catalitico rimane preliminare poiché la caratterizzazione di un catalitico per l'impiego di dimensioni richieste non è trattato in letteratura. Si suppone quindi che l'ossidante entri come

decomposto alla temperatura di fiamma adiabatica del perossido di idrogeno di 1020 K con la portata regolata dal modello espresso nella PDR.

L'orifizio per l'iniezione del combustibile (decimo di millimetro) è molto vicino alla massima tolleranza raggiungibile per la stampa 3D del materiale della camera, e risulta dunque irrealizzabile una separazione in due orifizi di soffocamento. È tuttavia possibile suddividere il flusso successivamente all'orifizio di gola.

5 Simulazioni modello PDR

Nelle varie sezioni, fino a che non verrà fatta menzione specifica, **le temperature riportate sono quelle del gas a parete**. L'obiettivo delle simulazioni e delle successive modifiche è quello di ridurre per quanto possibile i due fattori che influenzano la temperatura della parete stessa ovvero la temperatura del gas e il coefficiente h di scambio termico tra gas e parete.

5.1 Risultati della simulazione

Model 0 - PDR model			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	3.54	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	94%	#	n.a.
Picco di temperatura a parete	3058	K	@ ugello e parete cc

Il modello iniziale rispetta i criteri stabiliti nella PDR per avere un motore che eviti il surriscaldamento. In particolare il picco a 3058 K viene considerato accettabile nonostante il limite di 2700 K posto in PDR per il fatto che in PDR venivano considerate temperature medie di 2700 K; un picco di temperatura non necessariamente diviene quindi problematico.

6 Studio sequenziale di ottimizzazione della camera

Per ognuno dei seguenti modelli la modifica è apportata rispetto al modello precedente della sequenza, a partire dal primo modello descritto nella PDR. Ogni modifica viene fatta tenendo a mente obiettivi precisi con lo scopo di migliorare un certo aspetto della simulazione precedente.

Un primo studio estensivo è stato svolto per indagare il comportamento a swirl del fuel, per poi analizzare una configurazione con iniezione a corona circolare del comburente sulle pareti dell'ossidante con impingement del combustibile.

6.1 Modello 1: Riduzione volume camera e incremento angolo convergente

L'obiettivo è il miglioramento del raffreddamento usando una camera meno ampia e un convergente che tenga il flusso confinato in cc. Avvicinando inoltre l'inlet al convergente (i.e. riducendo la camera) si suppone sia presente un miglior raffreddamento della parte bassa della cc.

- \varnothing cc 10 mm

- lunghezza 15 mm
- angolo del convergente a 60°
- fuel inlet 2 mm più vicino al convergente

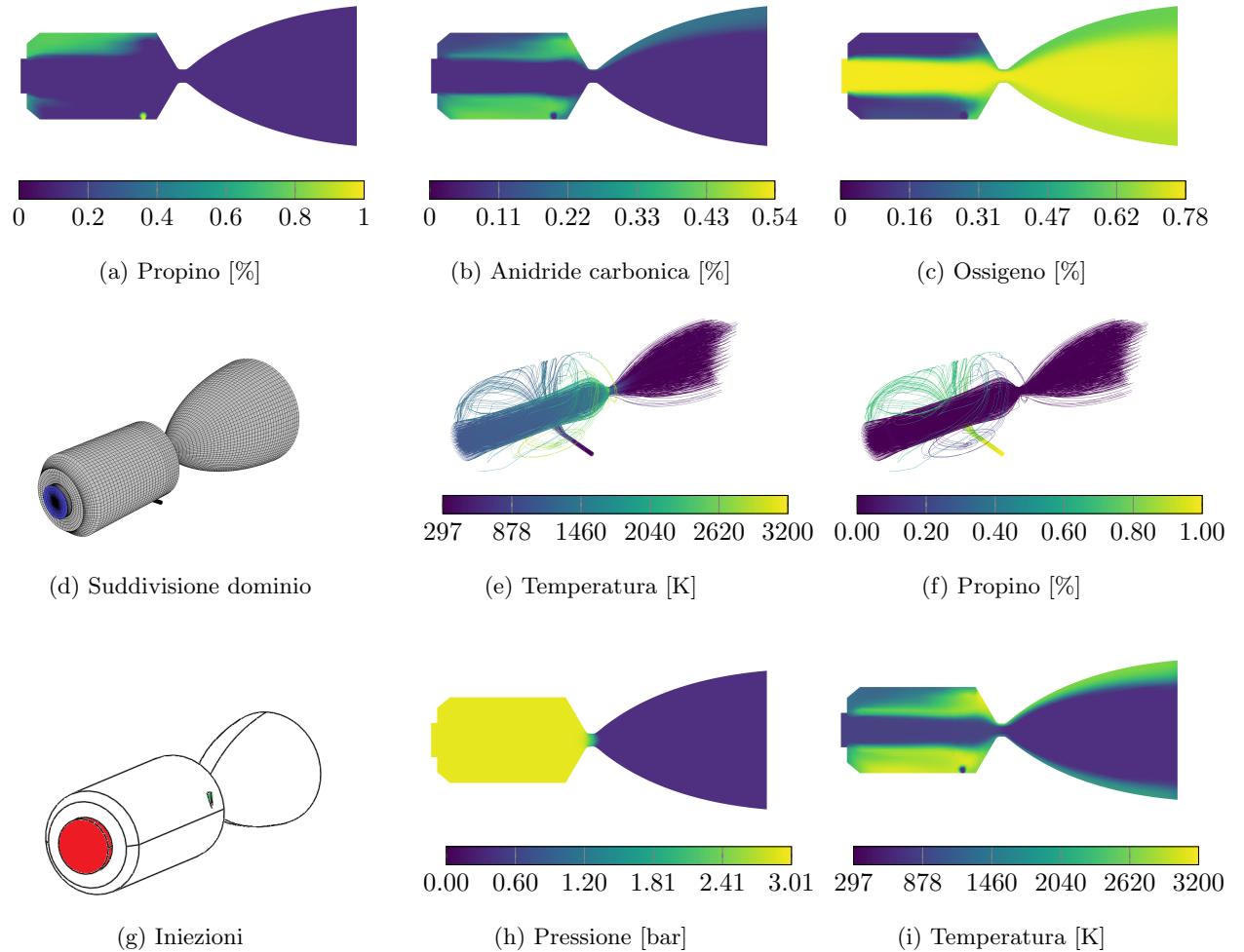


Figura 1: Risultati della simulazione numerica del modello PDR in Fluent

6.1.1 Risultati della simulazione

Model 1 - riduzione camera, aumento angolo convergente			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	3.01	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	82%	#	sensibile riduzione rispetto al caso precedente
Picco di temperatura a parete	2842	K	@ #

Lo swirl del fuel genera zone scoperte della parete della camera. Questo risale infatti elicoidalmente, lasciando scoperte alcune zone che quindi tendono a surriscaldarsi più facilmente. Il flusso di ossidante esce a 30m/s. È troppo veloce e non garantisce uniformità di combustione in camera. Lo swirl genera

delle non uniformità del flusso specifico di massa sull'outlet ($\dot{m}/A = \rho v_z$) ovvero si genera un momento sbilanciante in direzione perpendicolare all'asse del motore. Il risultato è simile al modello della PDR con però una minore efficienza dovuta all'accorciamento eccessivo della camera.

6.2 Modello 2: Swirl di ossidante e di combustibile - Aumento velocità iniezione combustibile, diminuzione velocità iniezione ossidante

Si sceglie di modificare il principio di funzionamento della camera di combustione. Anche se la dimensione dell'inlet dell'ossidante fosse esattamente corrispondente alla larghezza dell'intera camera di combustione il comburente entrerebbe a velocità troppo altra rispetto alle dimensioni della camera stessa (>10 m/s). Si preferisce iniettare quindi radialmente anche l'ossidante in modo da fornire un maggiore swirl number che permetta alla combustione di svilupparsi interamente all'interno della camera, lasciando uscire gas combusto ben mescolato e privo di stratificazioni. Il principio sfrutta la separazione dei due reagenti che si ottiene per un certo tempo grazie al differente momento (legato alla densità e quindi alla grande differenza di temperatura) e grazie al gradiente di accelerazione che si genera in camera proprio per via dello swirl e del differente raggio di iniezione rispettivamente di fuel e ossidante. Si accorcia la camera in modo da avere minore superficie da raffreddare e in modo da concentrare lo swirl in una zona a disco.

- lunghezza cc 9 mm
- \varnothing inlet combustibile 0.4 mm
- \varnothing inlet ossidante 2.5 mm

6.2.1 Risultati della simulazione

Model 2 - doppio swirl, camera accorciata			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	3.95	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	108%	#	sovrafflame legata al flusso swirlato [1]
Picco di temperatura a parete	2845	K	@ #

Il risultato è soddisfacente, unico miglioramento possibile è un miglioramento del raffreddamento a parete e una maggiore uniformazione del combusto. In particolare si osserva che la combustione è localmente ad alto numero di Reynolds per via dell'elevato swirl number, e si genera quindi un apporto convettivo di calore che se possibile andrebbe eliminato. Il flusso di ossidante ha momento talmente elevato che "fora" il layer generato dal fuel innescando la combustione e quindi un eccessivo surriscaldamento.

6.3 Modello 3: Ulteriore rallentamento ossidante

Per consentire un maggiore potere di raffreddamento del fuel si aumenta l'area di ingresso dell'ossidante a sezione rettangolare di 3.35 mm x 2 mm con un'area di 6.7 mm^2 che permette al flusso di avere una velocità pari al 73% di quella del modello precedente.

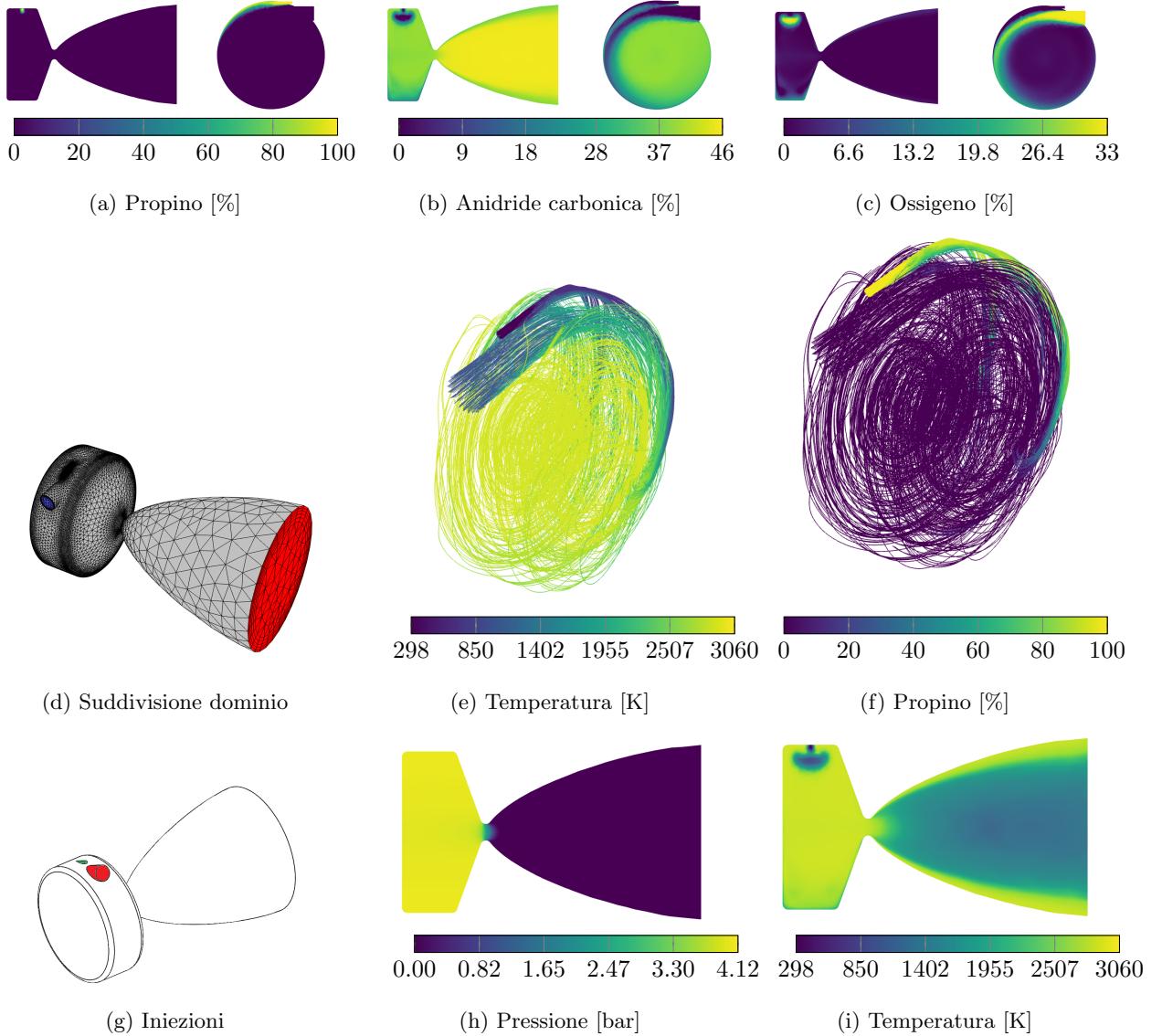


Figura 2: Risultati della simulazione numerica del modello 2 in Fluent

6.3.1 Risultati della simulazione

I risultati di questa simulazione sono pressoché identici alla precedente. Si nota solo una leggera riduzione della pressione legata alla riduzione dello swirl number. Manca ancora il potere di raffreddamento che si ricerca in questa serie di simulazioni.

6.4 Modello 4: Disaccoppiamento iniezione ossidante e fuel - Iniezione combustibile vicino a gola

Sfruttando il raffreddamento della camera da parte del fuel, si è pensato di provare a posizionale l'inlet del fuel nella parte del convergente più vicina alla gola.

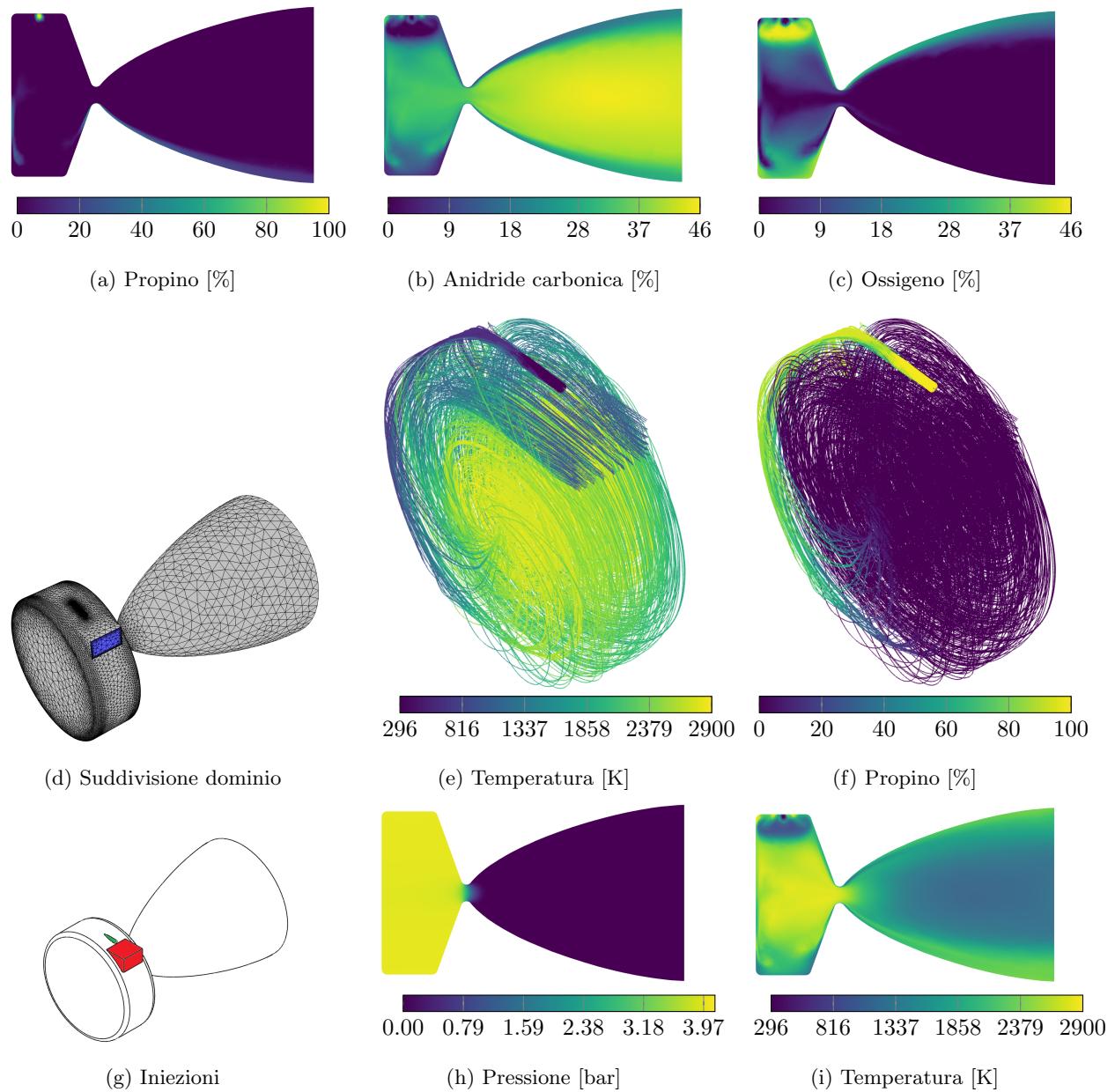


Figura 3: Risultati della simulazione numerica del modello 3 in Fluent

6.4.1 Risultati della simulazione

Il posizionamento dell'inlet del fuel all'interno di un ugello convergente deve avvenire rispettando l'accelerazione che subisce l'ossidante swirlato. Non avendo rispettato questa condizione, nella simulazione corrente si osserva che il flusso di ossidante trascina fuori dalla camera di combustione il fuel senza nemmeno lasciare il tempo per far avvenire la combustione, che inizia quindi nella seconda parte dell'ugello divergente. La simulazione quindi è praticamente quella di un motore a monopropellente ad acqua ossigenata con una minima portata di massa in aggiunta al flusso.

Model 4 - iniezione vicino a gola			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	2.65	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	63%	#	funzionamento a monopropellente
Picco di temperatura a parete	2950	K	#

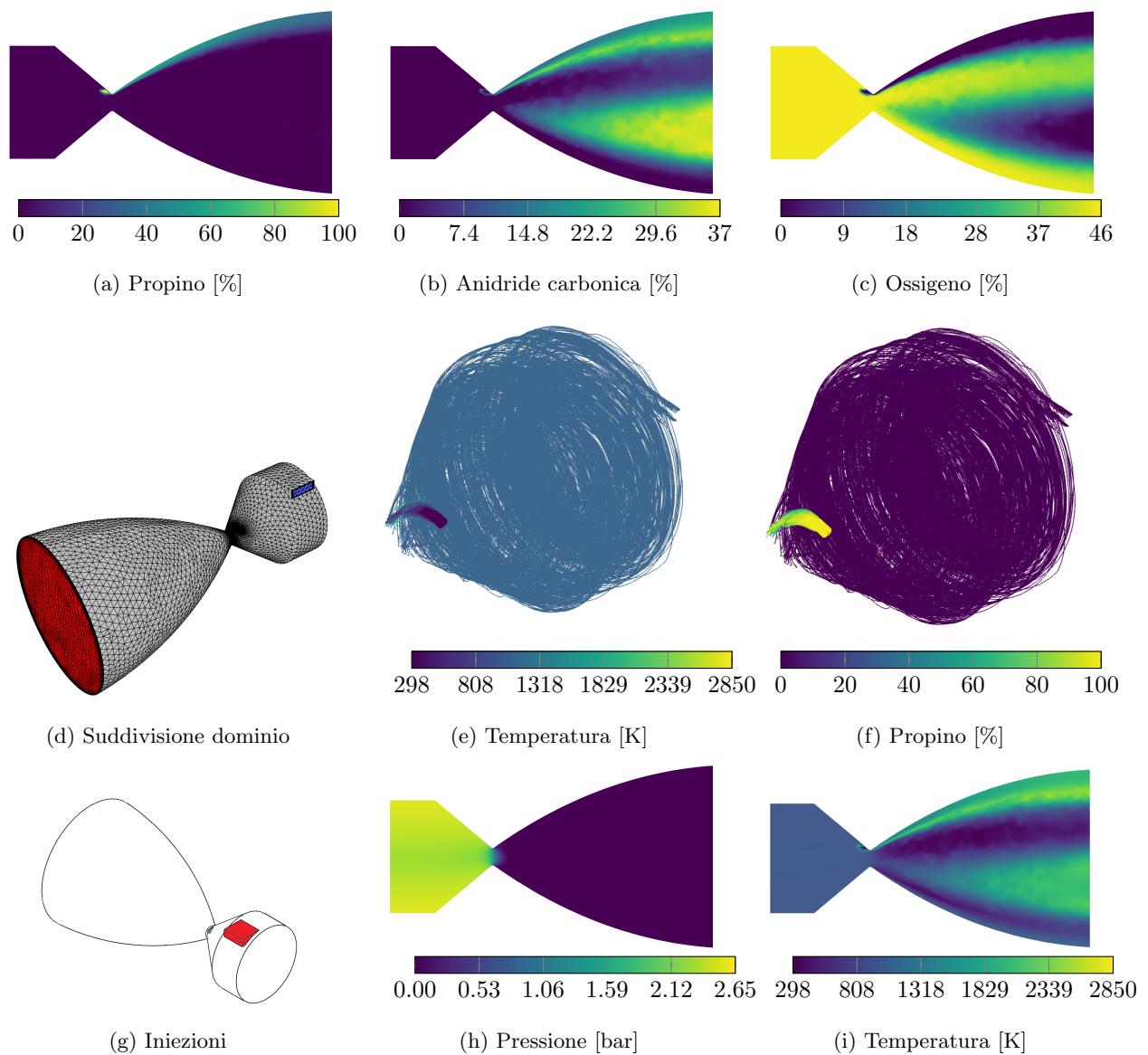


Figura 4: Risultati della simulazione numerica del modello 4 in Fluent

6.5 Modello 5: Swirl da iniezione sia di ossidante che di combustibile

Per ovviare alle problematiche insorte nella precedente simulazione, si sceglie di inserire un sistema che swirli l'ossidante inserendolo nella camera di combustione elicoidalmente, trascinando con sé il fuel senza

andare a forare il layer che esso forma. In questo modo si punta al mantenimento del layer freddo che venendo accelerato dall'ossidante dovrebbe permettere un migliore raffreddamento.

6.5.1 Risultati della simulazione

Si osservi nell'immagine del modello 5 l'andamento evidenziato nella tesi [2] ovvero un andamento divergente convergente del gas che se seguito anche nel profilo della camera, permette di risparmiare ancora massa.

Model 5 - swirl ox + fuel			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	3.45	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	94%	#	#
Picco di temperatura a parete	3070	K	#

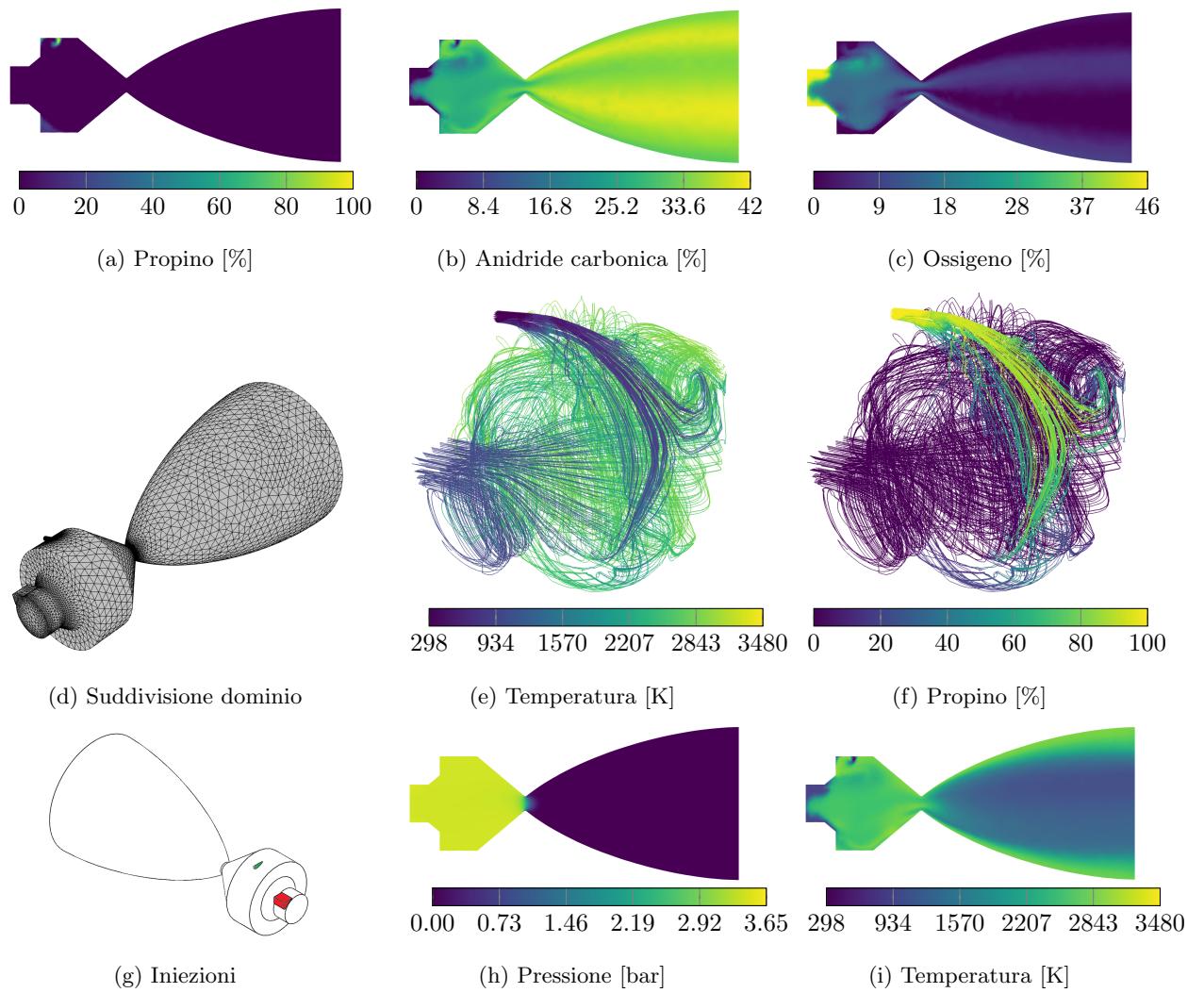


Figura 5: Risultati della simulazione numerica del modello 5 in Fluent

6.6 Modello 6: camera accorciata

Vedendo che il flusso si porta velocemente verso la gola si è fatta una simulazione per verificare il comportamento del flusso qualora la camera fosse stata ridotta, arrivando quindi ad un design della camera molto simile a quello proposto nella tesi di Powell.

6.6.1 Risultati della simulazione

Model 6 - camera corta			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	3.55	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	97%	#	#
Picco di temperatura a parete	2930	K	#

Il propino non resta nemmeno in questo caso confinato sulla parete della camera nonostante l'andamento dell'iniezione permetta al combustibile proprio di restare confinato in quella zona. Il raffreddamento non è ottimale.

6.7 Modello 7: doppio swirl injector

Si riduce quindi la velocità di iniezione dell'ossidante raddoppiando il numero di iniettori di ossidante.

6.7.1 Risultati della simulazione

Model 7 - doppio iniettore swirl ox			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	3.60	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	98.6%	#	#
Picco di temperatura a parete	2960	K	#

È ancora alta la temperatura del gas a parete.

6.8 Modello 8: doppio swirl injector più veloce

Si cerca in maniera opposta di aumentare la velocità dello swirl di ossidante in modo da accelerare anche il propino e permettergli di effettuare un giro completo della camera prima di entrare completamente in combustione. Si allunga il convergente diminuendone l'angolo poiché si osserva in sezione di uscita una disomogeneità nella densità del flusso. Questo fa sì che il flusso specifico per unità d'area sia differente tra due zone della sezione di uscita, generando quindi un momento. Allungare il convergente garantisce un maggior tempo di mescolamento.

6.8.1 Risultati della simulazione

La camera continua a restare a contatto con gas caldo, si nota un miglioramento nel mescolamento anche se le difformità in sezione d'uscita non sono state eliminate completamente.

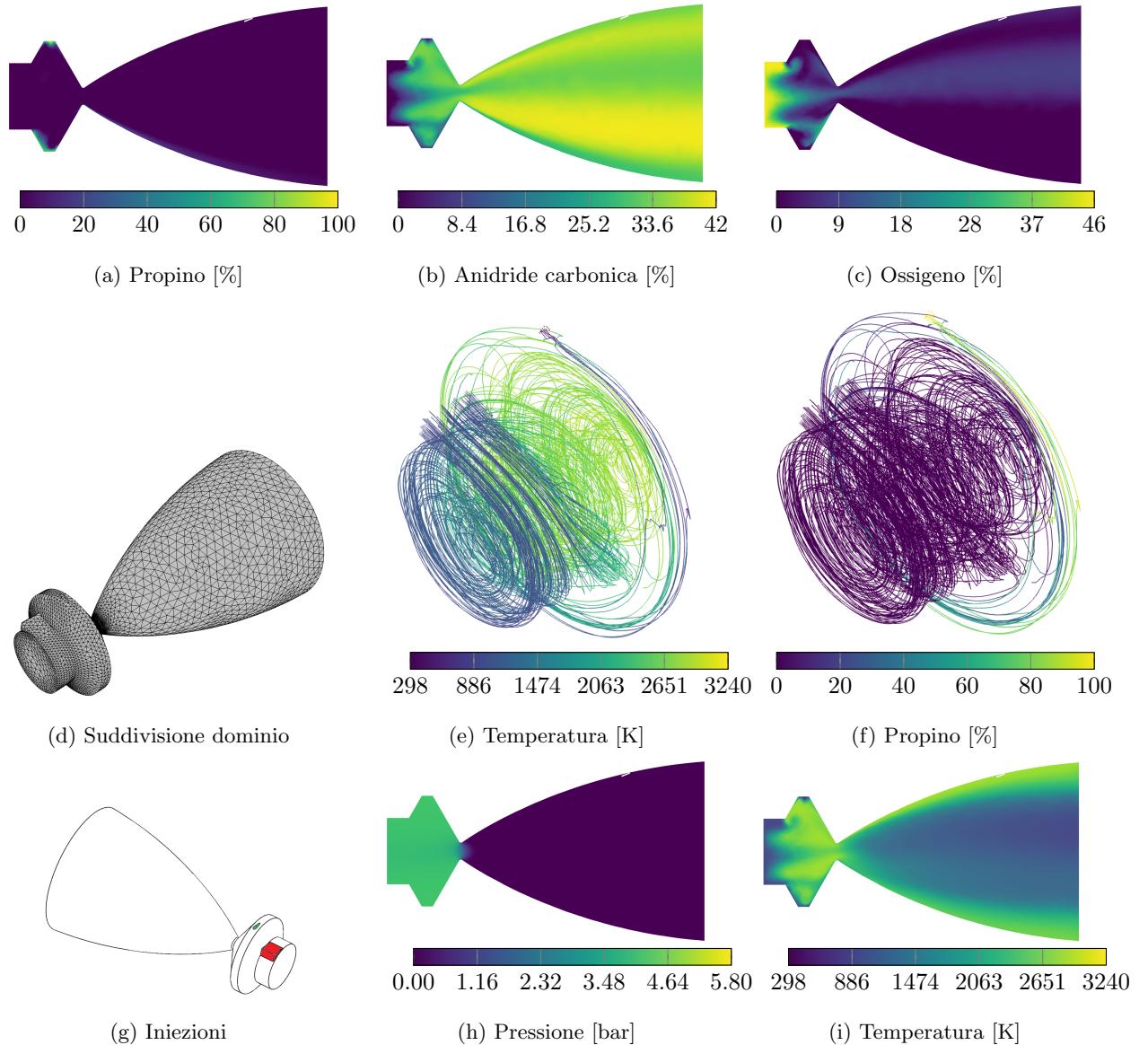


Figura 6: Risultati della simulazione numerica del modello 6 in Fluent

Model 8 - ox swirl veloce			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	3.33	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	91%	#	#
Picco di temperatura a parete	3050	K	#

6.9 Modello 9: iniezione ancora accelerata di ossidante

Le idee di base sono le stesse del modello 8, così come i risultati. Visti i risultati non ottimali dal punto di vista del raffreddamento con propino si sceglie di cambiare strategia a partire dal modello 10.

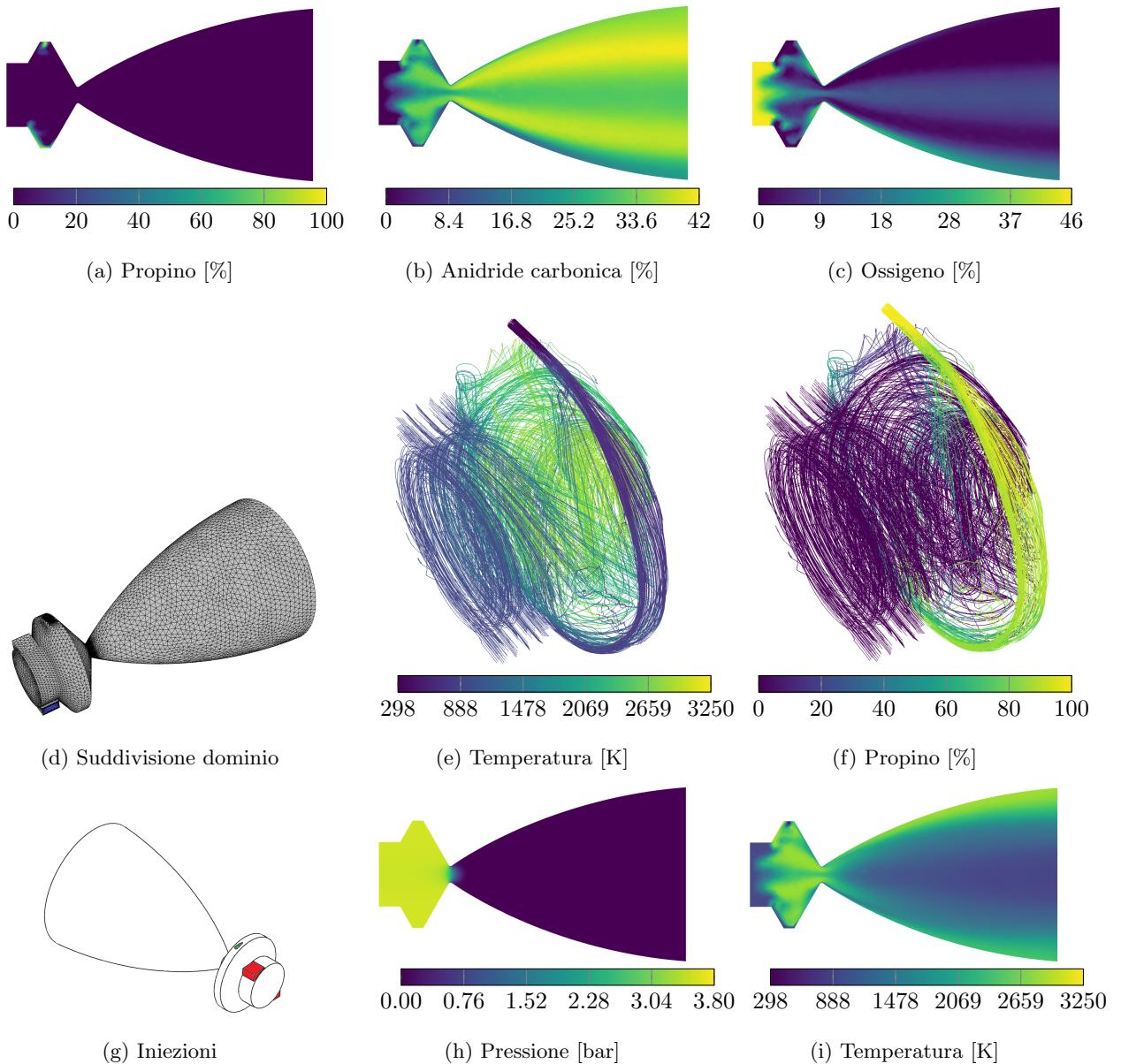


Figura 7: Risultati della simulazione numerica del modello 7 in Fluent

6.10 Modello 10: corona circolare di ossidante con impinging di fuel

Si cambia l'approccio. Dopo aver indagato il raffreddamento con propino, si sceglie di vedere il funzionamento del raffreddamento con ossidante a 1020 K. Si inietta quest'ultimo in corona circolare e al centro, con impinging, viene iniettato tramite due iniettori, il fuel. Il motore opera ad alto O/F il processo si rivela quindi conveniente.

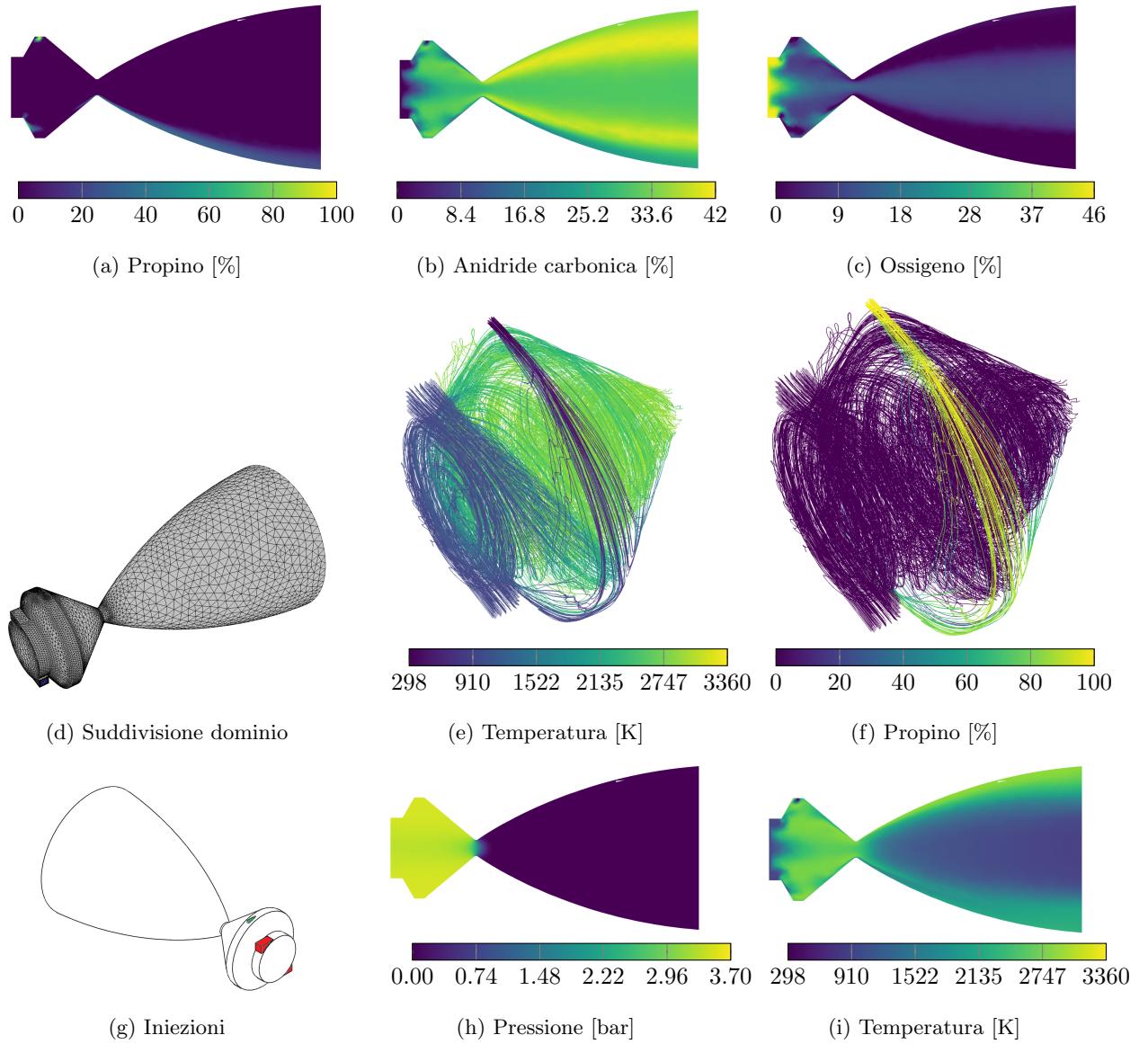


Figura 8: Risultati della simulazione numerica del modello 8 in Fluent

6.10.1 Risultati della simulazione

Model 10 - corona circolare di ossidante con impinging di fuell veloce				
Parametro	Valore	Unità	Note	
Pressione camera combustione	3.45	Bar	n.a.	
Efficienza di combustione	94.5%	#	#	
Picco di temperatura a parete	2470	K	#	

Il risultato della simulazione è ottimo dal punto di vista di efficienza e di raffreddamento. Il problema è che l'impinging apre il fuel in un getto planare. Si vuole ottenere invece un getto assialsimmetrico che dovrebbe garantire una maggiore efficienza di combustione.

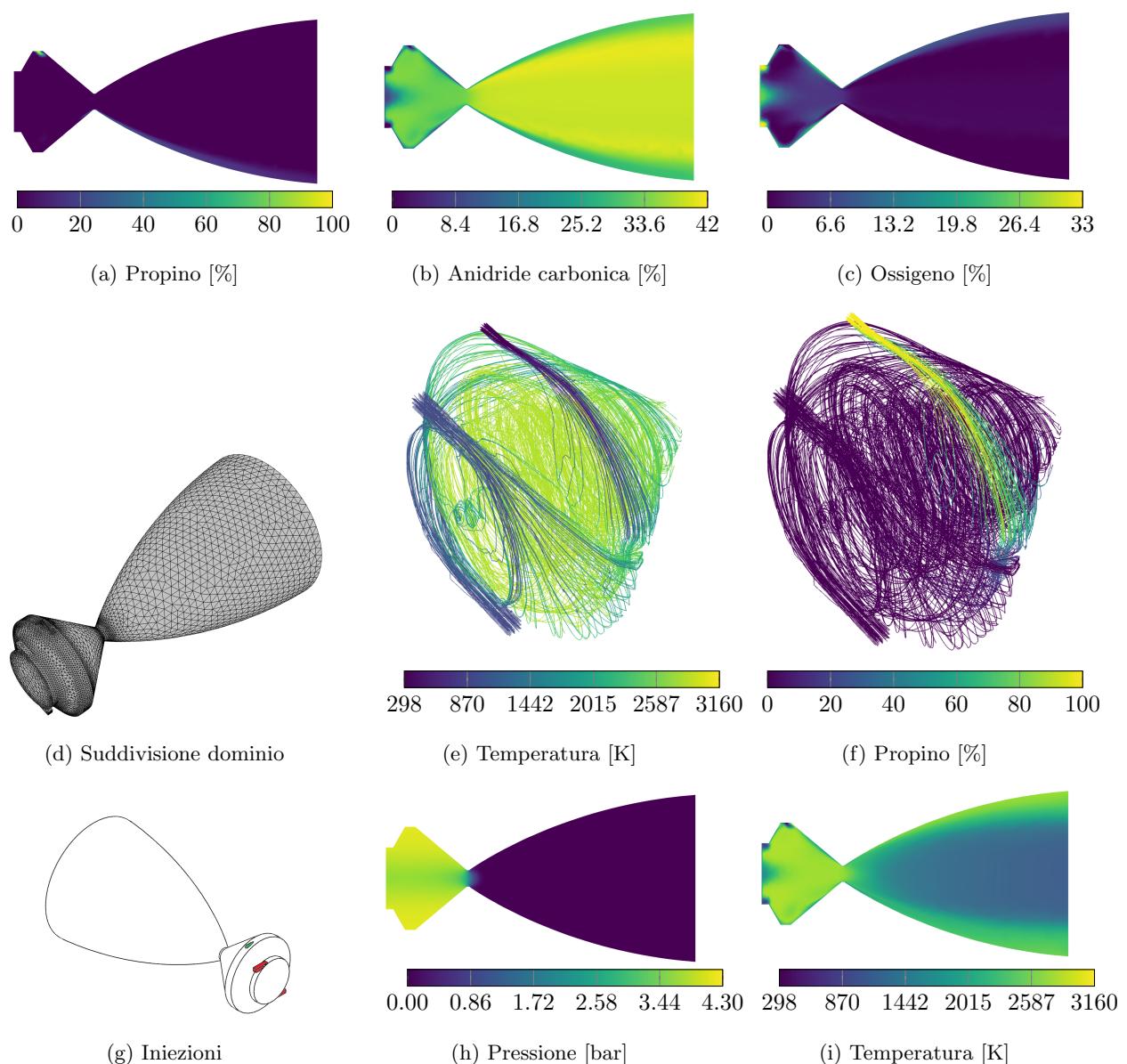


Figura 9: Risultati della simulazione numerica del modello 9 in Fluent

7 Modello finale: iniezione ossidante a corona con impinging sfasato di fuel

Si introduce allora uno sfasamento di 0.2 mm tra gli assi dei due iniettori di fuel in modo da creare uno swirl associato all'impinging. Questo aumenta la pressione massima in camera di circa 0.05 Bar e uniforma i gas in sezione di uscita.

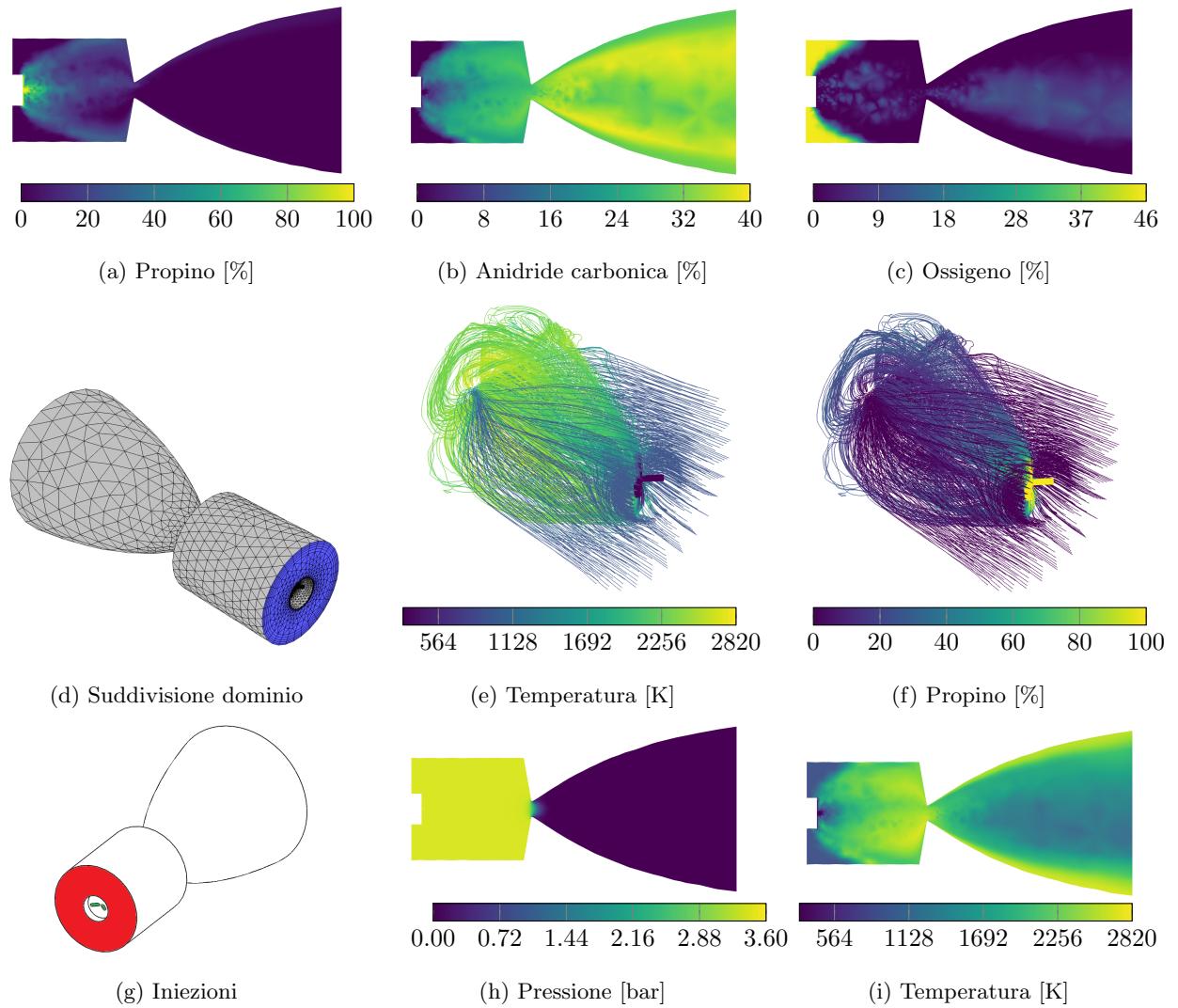


Figura 10: Risultati della simulazione numerica del modello 10 in Fluent

7.0.1 Risultati della simulazione

Model 10 - impinging sfasato			
Parametro	Valore	Unità	Note
Pressione camera combustione	3.38	Bar	n.a.
Efficienza di combustione	92.6%	#	#
Picco di temperatura a parete	2460	K	#

Considerato:

- il miglioramento di circa 600 K sulla temperatura del gas a parete
- l'efficienza di combustione sopra il limite minimo imposto dal committente
- l'assenza di momenti generati dalle disuniformità dei gas in uscita

si sceglie il corrente come modello finale da verificare in tenuta e termicamente per valutarne il funzionamento.

Il vantaggio rispetto ai modelli precedenti, e soprattutto rispetto a quelli con maggiore efficienza, risiede nella ridotta dimensione del motore e nella sua capacità di attuare un film cooling a vantaggio del risparmio di massa e di sicurezza.

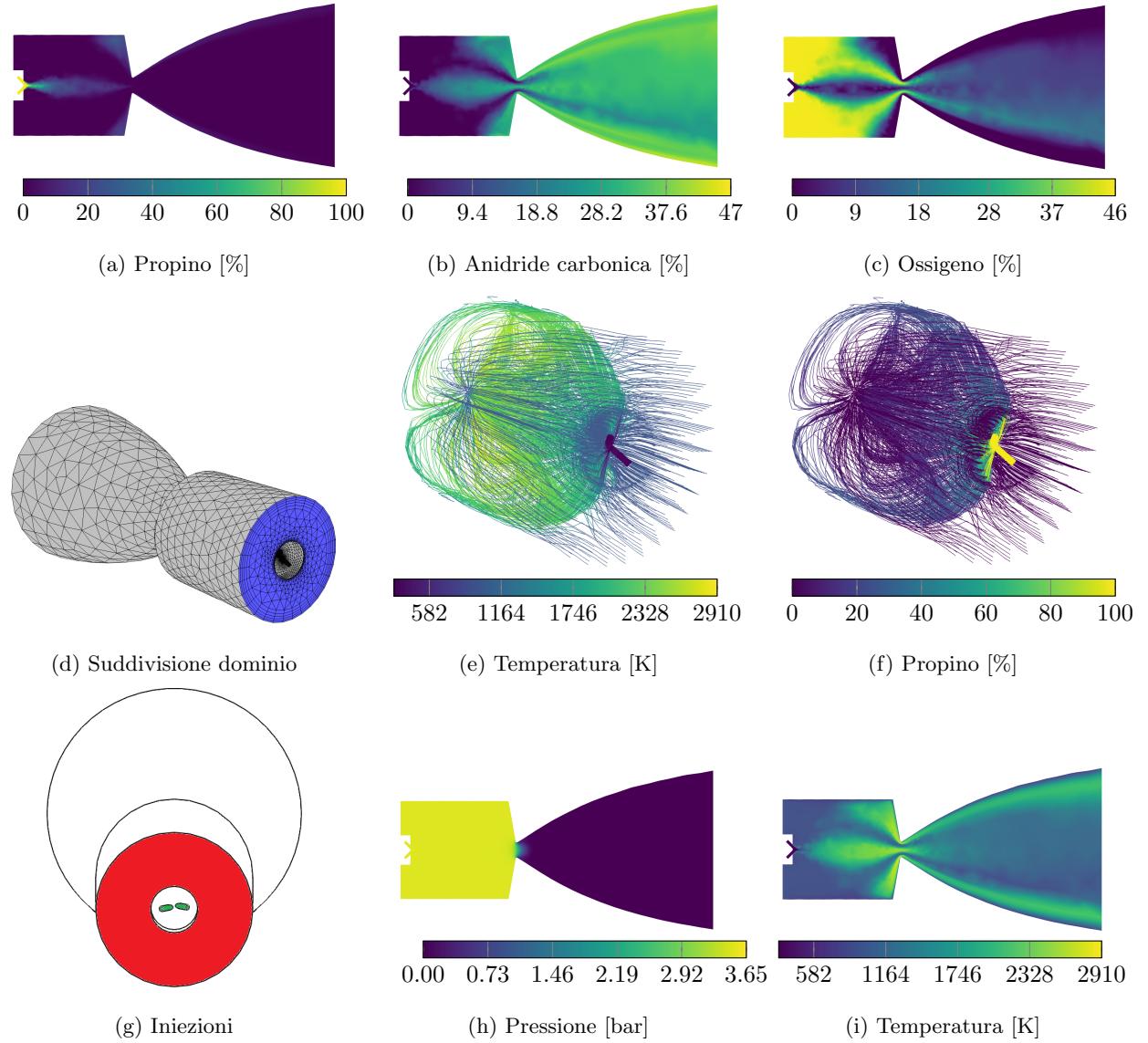


Figura 11: Risultati della simulazione numerica del modello 11 in Fluent

8 Verifica tenuta

Per la verifica a tenuta della camera di combustione è stato utilizzato il software agli elementi finiti MSC Patran/Nastran. Tenendo in considerazione le elevate temperature alle quali la camera è soggetta, si è deciso di effettuare un'analisi termomeccanica.

Si prederà in considerazione il modello finale. Le analisi fluidodinamiche sfruttano il volume interno della camera, è stato quindi necessario creare il modello della camera e del radiatore definendo gli spessori delle pareti e le dimensioni del radiatore.

Come si può osservare dalla tavola in **appendice A**. Lo spessore è variabile: per la testa della camera si ha uno spessore di 1.5mm, mentre si ha uno spessore massimo localizzato sulla sezione di gola di 6.4mm. Il materiale impiegato è la lega di rame **CuNi2SiCr**, che offre un'ottima combinazione di condutività elettrica e termica, accompagnata da elevata rigidità, anche a temperature elevate. Di seguito riportate le proprietà meccaniche:

ρ [kg/m ³]	E [GPa]	ν	Coefficiente di dilatazione termica [m/m°C]	Carico di snervamento [MPa]
8850	110	0.35	18e-6	180-630

Per effettuare la simulazione, è stata impiegata una mesh che discretizza il modello, impiegando circa 157000 elementi di natura tetraedrica a 4 nodi.

Parallelamente è stata effettuata un'analisi termica che ha permesso di determinare le temperature a regime dell'intero modello, precisamente il software associa ad ogni nodo della mesh un valore di temperatura. Attraverso un campo spaziale che permette di salvare i valori di un qualsiasi output (tensione, temperatura, spostamento) associandolo alla mesh, è stato possibile salvare questi valori di temperatura. Ecco l'importanza di realizzare le simulazioni con la medesima mesh.

A seguito dell'applicazione del campo di temperature, si è applicata una pressione interna variabile in base alla zona, si è deciso di mantenere la medesima suddivisione che è stata impiegata per lo studio della termica.

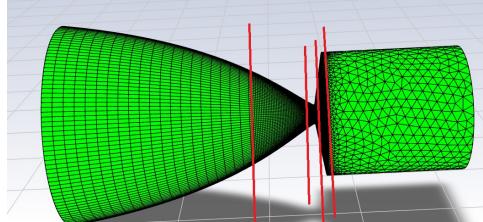


Figura 12: Suddivisione della camera di combustione

Di seguito i valori impiegati nelle varie zone ricavati dalle simulazioni fluidodinamiche:

Zona	Pressione [bar]
Camera di combustione	9.15
Convergente	4.128
Gola	1.548
Inizio divergente	0.13800
Sezione finale del divergente	0.01284

I valori riportati tengono conto già del coefficiente di sicurezza di 1.2 (questo coefficiente non è stato applicato alla pressione che si ha nella zona della camera, poiché esso rappresenta il valore massimo di esercizio estrapolato dai modelli matlab, che è comunque al di sopra di quello medio operativo).

Per quanto riguarda le condizioni di vincolo, si è deciso di non imporre alcun vincolo sfruttando la condizione di Inertia relief evitando che eventuali vincoli vadano ad alterare quelle che sono le deformazioni ed i valori di stress che la camera subirebbe.

Dalla simulazione si ottengono i valori di stress per il criterio di Von Mises, che fornisce un risultato più accurato di altre formulazioni le quali andrebbero a sottostimare o sovrastimare le tensioni, portando a un design non ottimizzato.

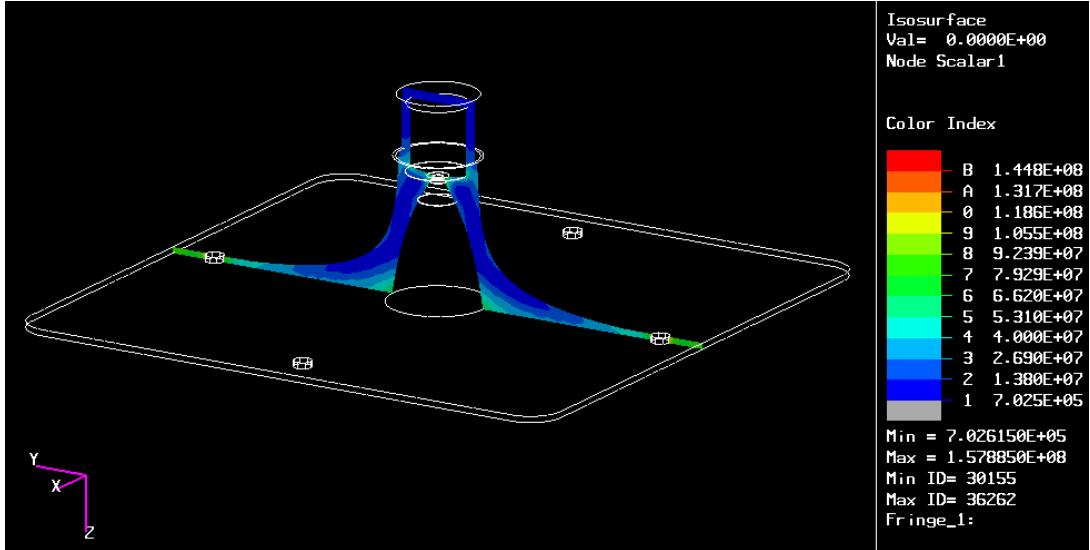


Figura 13: Contour delle tensioni sulla sezione

Il valore di tensione massimo che si ottiene è di $1.448\text{e}+08$ Pa, questa zona maggiormente sollecitata è in corrispondenza della gola questo dovuto al fatto che è la zona a più elevata temperatura.

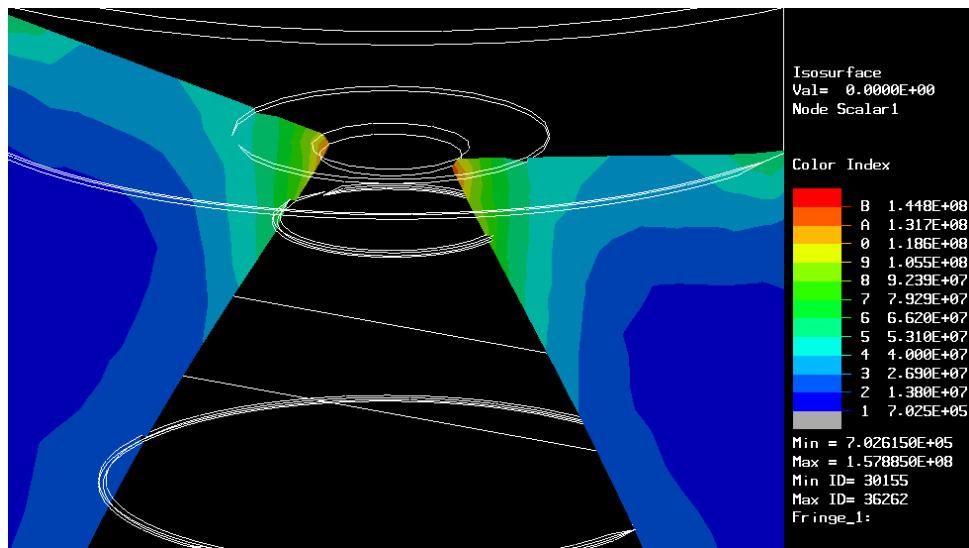


Figura 14: Tensioni in corrispondenza della sezione di gola

Il valore è al disotto della tensione di snervamento che si aggira attorno ai 180 MPa e può arrivare a un valore di 630 MPa tramite un processo di indurimento per precipitazione.

In conclusione, è importante tener presente che i valori di tensione di snervamento sono forniti a seguito di test a temperatura ambiente, poiché la temperatura di gola è elevata (intorno ai 700°C) essa andrà ad alterare quelle che sono le proprietà meccaniche.

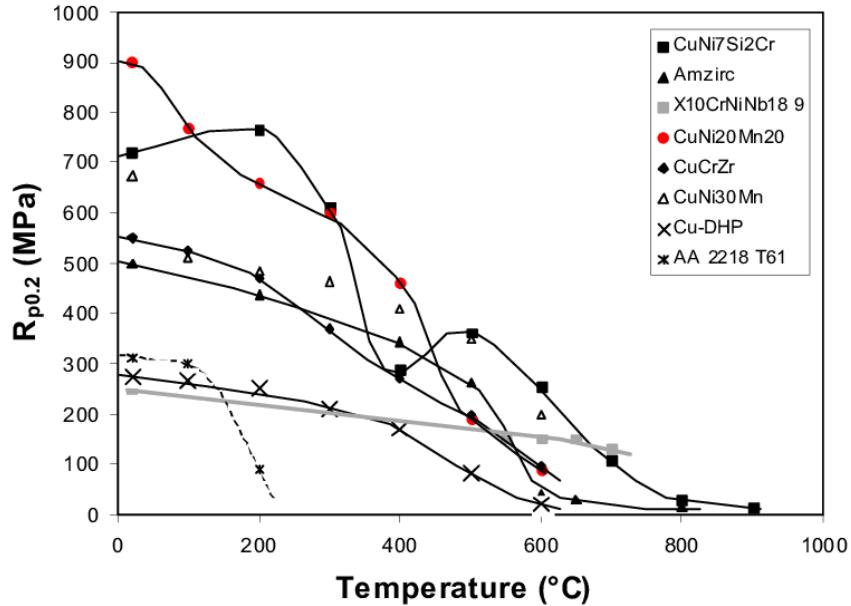


Figura 15: Tensione di snervamento in funzione della temperatura

Come si può vedere dal grafico nell'immagine 15, il valore di tensione a snervamento per una lega simile (la CuNi7Si2Cr che presenta i medesimi elementi lega) ad una temperatura che si aggira attorno ai 700°C, scende fino a circa 100 MPa. Sarà necessario, quindi in futuro, effettuare dei test sulla lega impiegata per determinare in funzione della temperatura la tensione a snervamento, in modo tale da assicurarsi che non scenda al disotto della tensione massima. Per essere in completa sicurezza uno studio analogo si dovrebbe condurre sul valore del modulo elastico e di come i processi di indurimento influiscano alle elevate temperature.

9 Verifica flussi termici

Lo scopo della seguente analisi termica, tramite l'utilizzo di un software agli elementi finiti, è quello di verificare che la temperatura a parete della camera sia in un range ragionevole, lontano da quella che è la temperatura di fusione del materiale.

In passato la temperatura di parete è stata stimata tramite un modello monodimensionale, questo ci ha permesso di capire nonostante le grosse approssimazioni se il radiatore fosse in grado di raffreddare la camera di combustione.

La temperatura di parete più alta che venne calcolata, per una condizione a regime, era attorno ai 580°C inoltre il sistema raggiungeva l'equilibrio in circa 300s. Questi dati indicativi ci permettono di avere una linea guida su quelli che saranno poi i risultati che l'analisi ci fornirà. Tramite l'uso del medesimo

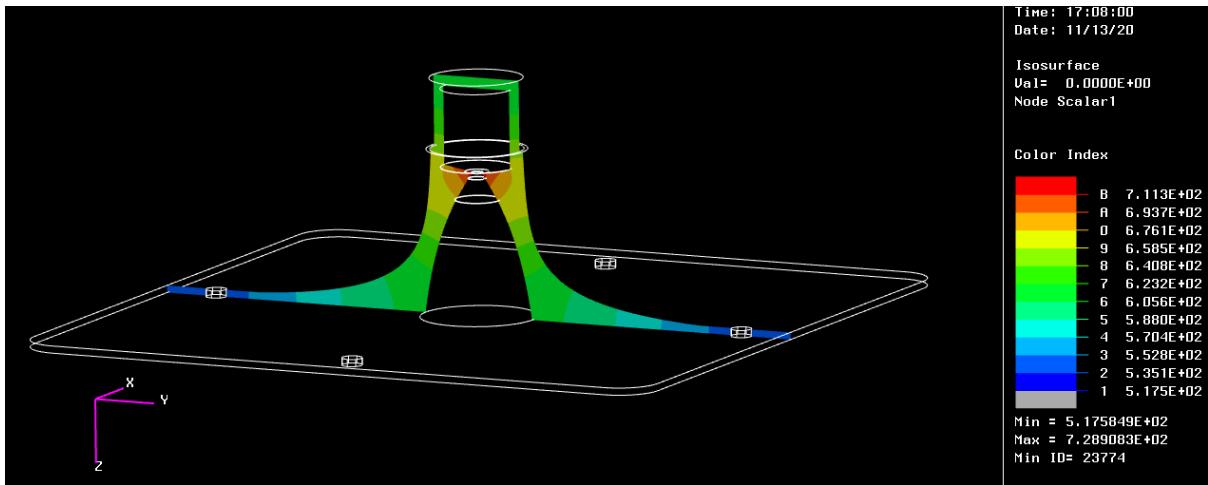


Figura 16: Vista in sezione della distribuzione di temperatura [°C]

modello CAD impiegato per la verifica a tenuta, si è impiegata una mesh di circa 157000 elementi di natura tetraedrica a 4 nodi.

Per quanto riguarda le proprietà fisiche del materiale questa volta sono di nostro interesse:

ρ [kg/m ³]	Conducibilità termica [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Calore specifico [J/Kg°C]	T _{fusione} [°C]
8850	190	420	1050

A causa delle difficoltà riportate nel trasferire i risultati dalla mesh che interessa il volume della camera a quella che è la mesh che interessa la parete, si è deciso di impostare un scambio convettivo, attraverso i risultati ottenuti da Fluent, è stato possibile ricavare sia i coefficienti convettivi h che le rispettive temperature del gas nelle varie zone, le stesse impiegate nella analisi a termomeccanica come riportato nell'immagine 12.

Di seguito i dati riguardanti le varie zone:

Zona	h [W/m ² K]	T _{gas} [°C]
Camera di combustione	2946	545
Convergente	5557	1063
Gola	3727	1701
Inizio divergente	1431	1228
Sezione finale del divergente	394	941

Per quanto riguarda lo scambio radiativo che effettua il radiatore, sono stati imposti:

Emissività	Coefficiente di assorbimento	Temperatura ambiente esterno [°C]	Fattore di vista
0.8	0	-40	1

Nella quale la temperatura di -40°C è la temperatura equivalente che viene impostata come corrispettivo ad emissività 1 del gas di scarico a 1000°C (temperatura all'uscita del divergente) ed emissività 0.09. In questo modo si semplifica notevolmente il modello termico, introducendo un errore di linearizzazione che come si vedrà nei risultati porta in ogni caso a soluzioni coerenti con tutti gli altri modelli.

Sono state effettuate due analisi: una steady, per poter determinare la temperatura a regime del sistema, ed una transient, per determinare in quanti secondi il sistema raggiunge la condizione di equilibrio. Entrambe le simulazioni sono state effettuate imponendo una temperatura iniziale di 15°C per l'intero modello.

Osserviamo nell'immagine 17 quello che è il contour della temperatura ottenuta dalla analisi steady. La temperatura più alta che si rileva è di 729°C essa è in prossimità della zona della gola.

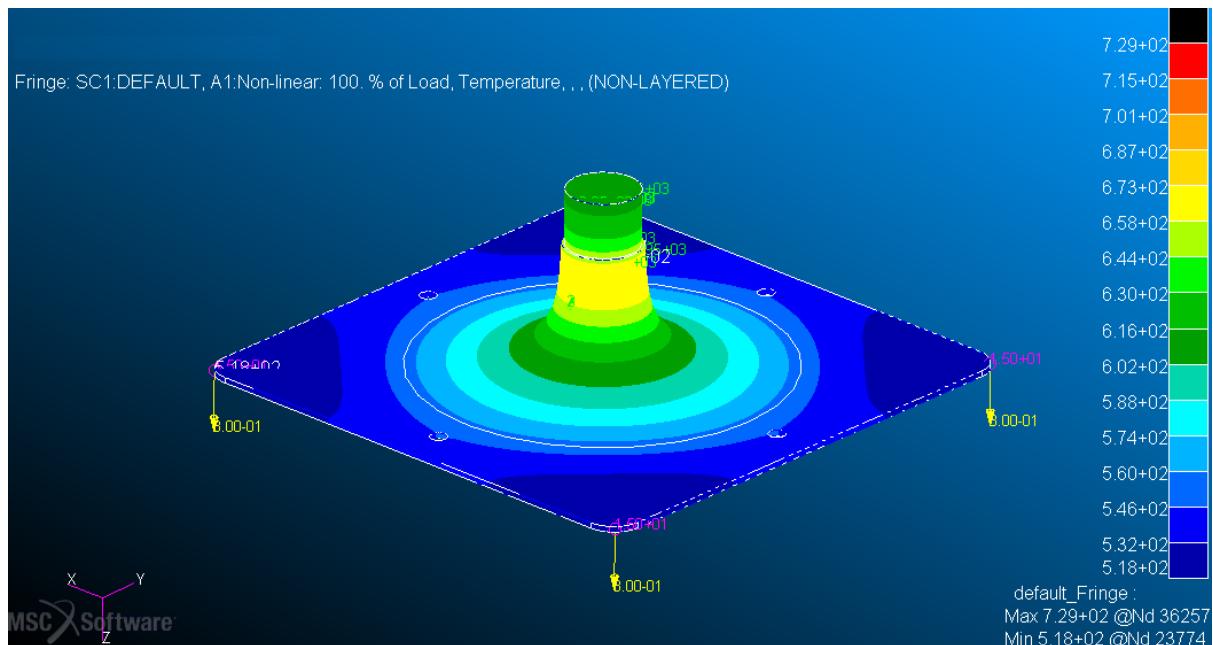


Figura 17: Contour temperature

Dalla analisi transient si è calcolato come la condizione di equilibrio si raggiunge in circa 290s risultato in linea con quello che era stato calcolato dal modello 1D.

Effettuando la medesima analisi con un coefficiente di sicurezza di 1.1 applicato alle temperature del gas che lambisce le pareti si ottiene una temperatura massima nella zona della gola di 793°C .

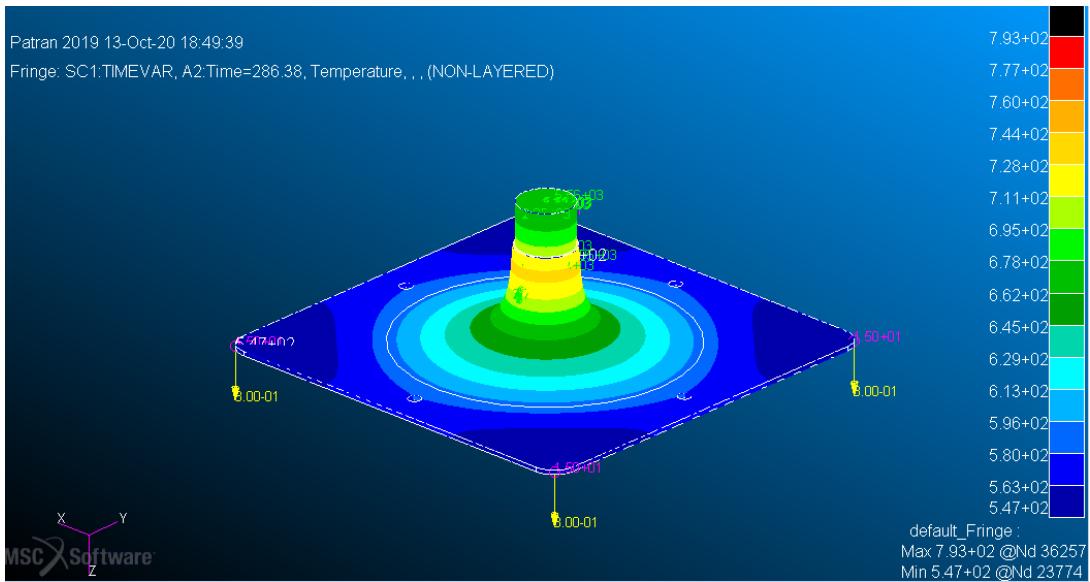


Figura 18: Contour temperature con coefficiente di sicurezza di 1.1

In conclusione, la temperatura che si ottiene può essere ritenuta accettabile comparata alla temperatura di fusione del materiale. Resta ancora da definire con certezza, tramite un’analisi approfondita, quale sia la quantità di calore che vanno a trasmettere eventuali viti di fissaggio alla base del radiatore, che si inseriscono nella parte inferiore del serbatoio.

10 Conclusioni

Lo studio effettuato ha permesso di ridurre significativamente le dimensioni, nonché il peso della camera. Sono state indagate numerose e diverse configurazioni di iniezione con swirl, ma nessuna di queste si è rivelata vincente. Sono stati evidenziati i punti di debolezza di ognuno dei diversi modelli.

Infine si è studiato un flusso più particolare che richiede un disegno complesso per l’iniezione dell’ossidante a partire dal catalitico e per l’iniezione del combustibile centrale all’asse della camera.

Quest’ultimo tipo di flusso e la termica ad esso correlata riporta un netto abbassamento della temperatura del gas a parete ed un’efficienza di combustione sopra al limite imposto da requisito.

Con la simulazione di Ansys sono stati ricavati i coefficienti di flusso termico imponendo la temperatura di 873 K come da risultato della PDR. Dopo l’analisi termica, tuttavia, la temperatura di parete risulta più elevata poiché i coefficienti di scambio termico nel caso del modello 1D sono stati supposti per correlazione con numero di Nusselt dato dalla formula $h = 0.0162 \cdot \frac{K}{D} Pr^{0.8} Re^{0.82} \left(\frac{T_{cc}}{T_{wall}} \right)^{0.35}$, mentre nel caso dei coefficienti calcolati con Ansys si tiene conto della fluidica interna con alta turbolenza e conseguente scambio termico convettivo.

Nonostante ciò, come si può notare dalla figura 16, la massima temperatura raggiunta arriva a 710 °C in corrispondenza dello spigolo di gola. Questo punto è il punto più soggetto a tensione dell’intero volume. Ad esclusione di questa zona, le temperature raggiunte garantiscono la resistenza in pressione.

11 Sviluppi futuri

Per un risultato più corretto, sarebbe opportuno realizzare un modello che leggi direttamente fluidica e termica, cosa che non è stata possibile per la scelta dei software impiegata (rispettivamente Fluent e Apex).

In alternativa si può iterare il procedimento effettuato in questa relazione cambiando le condizioni al contorno di Ansys con il risultato della simulazione Apex fino a quando la differenza tra le temperature diventa trascurabile. Ciò richiede estese risorse di calcolo che non sono state impiegate per questa relazione.

L'iniezione complessa del modello scelto richiede un nuovo studio geometrico costruttivo per riuscire a realizzare il tipo di iniezione ipotizzato. Lo spazio liberato rispetto al modello presentato in relazione per la PDR permette ampio volume di lavoro per costruire il condotto necessario.

Un catalitico compreso tra due tubi di raggio diverso potrebbe portare ad una soluzione innovativa e interessante per collegarsi col tipo di iniezione supposta. Le possibilità di progettazione dello stesso sono tuttavia limitate e richiedono un'intensa fase di test.

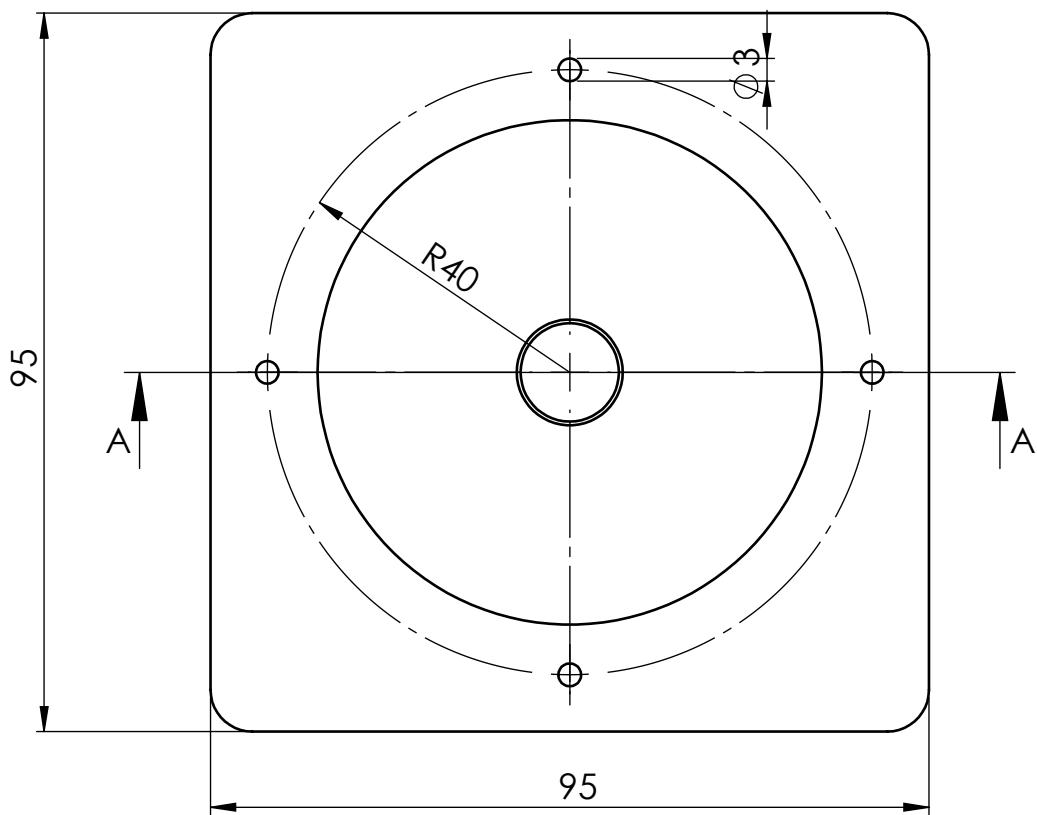
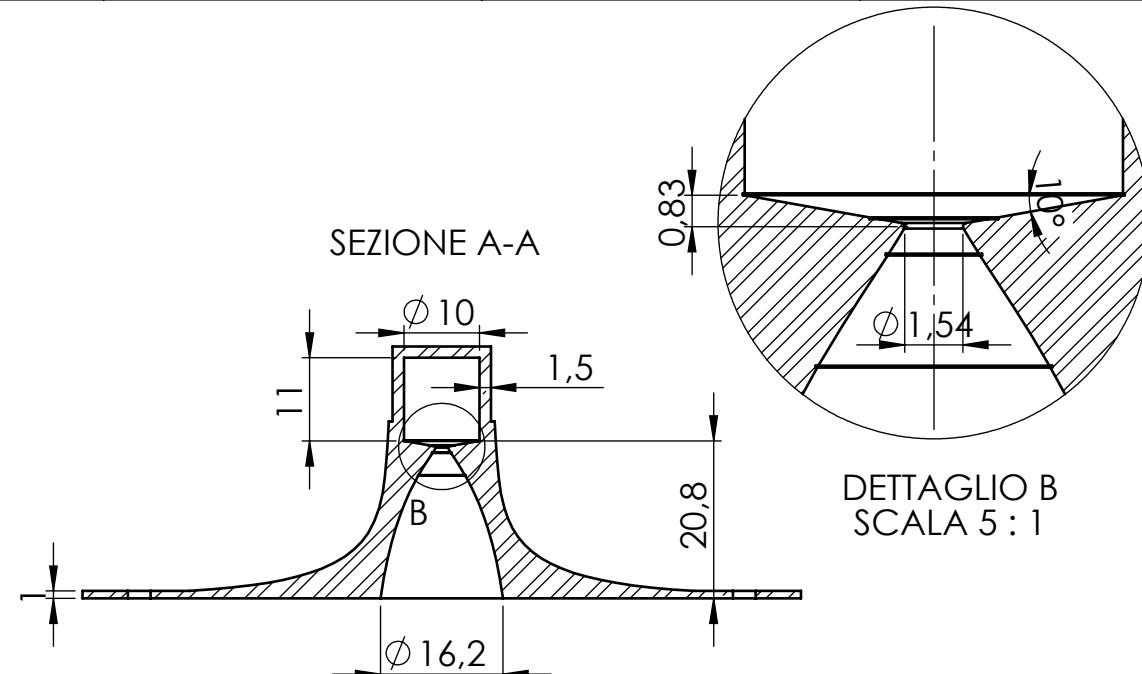
È possibile inoltre iterare sullo spessore in corrispondenza della gola in modo da ridurre ulteriormente lo spessore fintantoché sia garantito il flusso termico dalla camera al radiatore.

1

2

3

4



Commenti: Camera di combustione e radiatore	Titolo Disegno di dettaglio (Appendice A)	Data di edizione 12.10.20
	Responsabile Abdel Karim Oumami	
	Tipo di documento Disegno	Gruppo 2
		Scala 1:1 Foglio 1