



Ricerca di Sistema elettrico

# Effetto di Condizioni di Ingresso di Tipo Non Riflessivo nella Simulazione di Instabilità Termo-Acustiche

E. Giacomazzi, D. Cecere, N. Arcidiacono, F.R. Picchia

EFFETTO DI CONDIZIONI DI INGRESSO DI TIPO NON RIFLESSIVO NELLA SIMULAZIONE DI INSTABILITA'  
TERMO-ACUSTICHE

E. Giacomazzi, D. Cecere, N. Arcidiacono, F.R. Picchia (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili

Obiettivo: Parte A Cicli turbo-gas a CO<sub>2</sub>

Monitoraggio della combustione ed identificazione delle instabilità

Responsabile del Progetto: Franca Rita Picchia, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	5
2.1 IL CASO TEST ONERA .....	5
2.2 IL SET-UP DELLA SIMULAZIONE NUMERICA.....	6
2.3 MODELLAZIONE DELLA CONDIZIONE AL CONTORNO DI INGRESSO.....	7
2.4 EFFETTO DELLA CONDIZIONE AL CONTORNO DI INGRESSO PARZIALMENTE NON RIFLESSIVA.....	10
3 CONCLUSIONI .....	20
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	20

## Sommario

Nonostante la presenza di dispositivi di controllo attivo e passivo per attenuare o eliminare il problema delle instabilità termoacustiche negli attuali combustori premiscelati, l'inibizione di tali fenomeni in una vasta gamma di condizioni operative è ancora lontana. Nel prossimo futuro si prevede che il problema diventi ancora più importante fondamentalmente per due motivi: il primo è legato alla flessibilità del combustibile, a causa del crescente interesse per combustibili alternativi (syngas, biogas, shale gas); il secondo è legato alla crescente esigenza di flessibilità di carico, imposta dal crescente utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

Il lavoro ha riguardato la simulazione numerica mediante tecnica Large Eddy di un caso test (studiato sperimentalmente da ONERA) operato in condizioni di instabilità termo-acustiche con un forte fenomeno di "flashback" (ritorno di fiamma). Si tratta di un combustore a gradino, premiscelato metano/aria a rapporto di equivalenza 0.8 e con preriscaldamento, di particolare interesse non solo per il fenomeno di flashback, ma anche perché la fiamma premiscelata si colloca nel regime ispessito e corrugato tipico dei combustori adottati nelle turbine a gas negli impianti di produzione di energia.

Questo caso test è già stato oggetto di studio nella precedente annualità: la simulazione, pur cogliendo fenomeni di estinzione localizzata, non aveva però colto il fenomeno di flashback rilevato negli esperimenti. L'analisi dei risultati aveva imputato le condizioni al contorno di tipo riflessivo all'ingresso come responsabili della non risalita del fronte di fiamma nel canale di alimentazione: infatti, non appena il fronte tentava di risalire, l'onda di pressione associata a questo moto raggiungeva rapidamente l'ingresso ed era riflessa indietro verso il fronte stesso, smorzando e impedendo il flashback.

Nella presente annualità è stata quindi implementata nel codice HearT di ENEA una condizione non riflessiva o parzialmente non riflessiva per gli ingressi, estesa per includere fluttuazioni di turbolenza sintetica ed eventuali forzanti acustiche. La simulazione, a parità di cinetica chimica, ha questa volta evidenziato forti fenomeni di flashback, talvolta anche molto pronunciati a causa del meccanismo cinetico semplificato (single-step) adottato.

Il fenomeno di flashback osservato nelle simulazioni induce estinzioni localizzate e generalizzate, riguardanti cioè una vasta area del combustore. Il fronte di fiamma periodicamente raggiunge il piano di ingresso del dominio computazionale e viene poi soffiato nuovamente a valle, dove si ancora in corrispondenza dello spigolo del gradino del combustore. Inoltre, sono state identificate fluttuazioni di velocità molto intense, da circa quattro volte (200 m/s) la velocità media di ingresso fino a valori negativi (ritorno di flusso), come anche osservato negli esperimenti. Da quanto descritto, si evince una complessa dinamica all'interno del combustore simulato, indotta dal flashback. Tale dinamica non si limita alla sola frequenza di 66 Hz, forzata all'ingresso sulla base dei dati sperimentali, ma consiste anche in altre frequenze, in particolare nel range 20-100 Hz.

## 1 Introduzione

La combustione premiscelata in condizioni magre è la tecnica più utilizzata per ridurre le emissioni di  $\text{NO}_x$  nelle turbine a gas. In tali condizioni, queste macchine possono essere soggette a instabilità termoacustiche, derivanti da complesse interazioni tra onde acustiche e rilascio di calore all'interno del bruciatore. Fluttuazioni di velocità, perturbazioni nella pressione e nella concentrazione del combustibile sono cause di oscillazione del rilascio di calore e di nascita di onde acustiche che, quando in fase, sono in grado di sostenere l'instabilità termoacustica stessa (criterio di Rayleigh) fornendo energia alla perturbazione iniziale. Anche la variazione periodica dell'intensità turbolenta generata da oscillazioni di pressione, producendo oscillazioni della velocità di reazione e quindi della velocità di fiamma turbolenta, è in grado di innescare instabilità termoacustiche. In fiamme confinate le frequenze delle instabilità sono centrate attorno alle frequenze acustiche naturali della camera di combustione.

L'instabilità termoacustica non costituisce un fenomeno locale e le onde acustiche che interessano l'intero sistema possono comprometterne l'integrità. Il fenomeno diventa pericoloso quando le ampie oscillazioni di pressione e di velocità si traducono in vibrazioni auto-sostenute che interferiscono con il sistema e possono indurre fenomeni di flashback ed estinzione della fiamma ed usura prematura dei componenti. In casi estremi può danneggiare gravemente i componenti con conseguente interruzione del funzionamento. Sebbene oggi alcuni tipi di bruciatori industriali siano efficientemente dotati di sistemi di controllo attivo e passivo, in grado di attenuare o eliminare completamente l'instabilità termoacustica, l'inibizione di tali fenomeni in una vasta gamma di condizioni operative è ancora lontana dall'essere raggiunta.

Nel prossimo futuro si prevede che il problema diventi ancora più importante per fondamentalmente due motivi: il primo è legato alla flessibilità del combustibile, a causa del crescente interesse per combustibili alternativi (syngas, biogas, shale gas); il secondo è legato alla crescente esigenza di flessibilità di carico, imposta dal crescente utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e dalla necessità di stabilizzare la rete elettrica.

Nella precedente annualità è già stato affrontato il tema della simulazione di un caso test studiato sperimentalmente da ONERA (in Francia). La simulazione, pur cogliendo fenomeni di estinzione localizzata, non ha però colto il fenomeno di flashback rilevato negli esperimenti. L'analisi dei risultati aveva evidenziato che l'uso di condizioni al contorno in ingresso di tipo riflessivo ha impedito la risalita del fronte di fiamma nel canale di alimentazione: non appena il fronte tentava di risalire, l'onda di pressione associata a questo moto raggiungeva rapidamente l'ingresso ed era riflessa indietro verso il fronte stesso, quindi smorzando ed impedendo il flashback.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

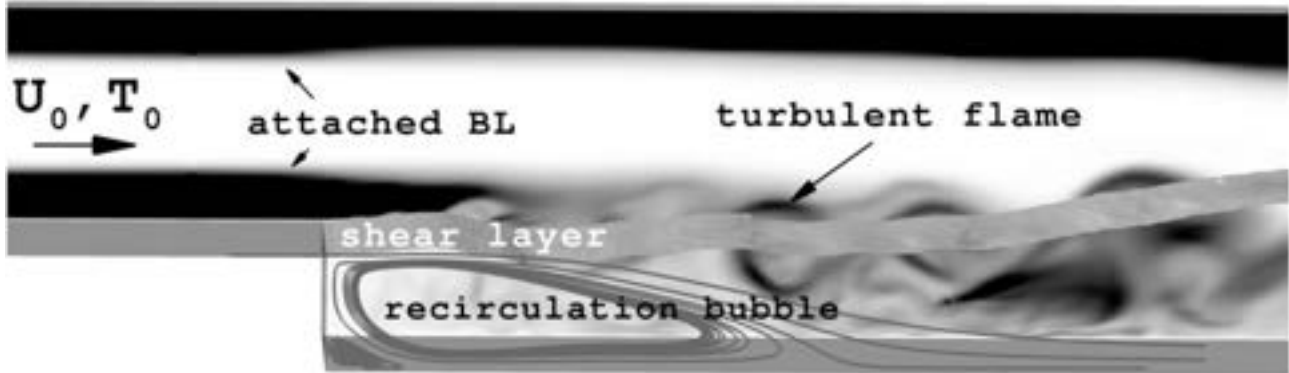
Il lavoro ha riguardato la simulazione numerica mediante tecnica Large Eddy di un caso test operato in condizioni di instabilità termo-acustiche con un forte fenomeno di "flashback" (ritorno di fiamma). Le simulazioni sono state effettuate principalmente sulla piattaforma di calcolo CRESCO4 (Computational REsearch center on COmplex system), un cluster basato su architettura Linux x86-64, che ha fino a 4864 core; saltuariamente è stata anche adoperata la piattaforma CRESCO5 anch'essa basata su architettura Linux x86-64, che ha fino a 640 core. Il codice di calcolo adoperato è HeaRT, sviluppato dall'ENEA.

### 2.1 Il Caso Test ONERA

Il bruciatore sperimentale simulato è il combustore a gradino ONERA/LAERTE [1] (vedi Fig. 1). Il test rig è costituito da un condotto rettangolare di 1.7 m di lunghezza e  $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$  di sezione. La camera di combustione è lunga 1.4 m ed il gradino è alto 3.5 cm.

Il campo di moto è caratterizzato da uno shear layer ed una zona di ricircolazione, entrambi causa di instabilità, la quale produce il flashback instabile e quasi-periodico della fiamma, che si distacca dal bordo del gradino. Il numero di Reynolds turbolento delle condizioni studiate è  $Re_t > 10^3$ , corrispondente al regime di "thickened wrinkled flame" nel diagramma di Borghi, che è fortemente influenzato dalla turbolenza, e caratteristico dei combustori nelle turbine a gas.

Il flusso nella sua configurazione stabile (vedi Fig. 1) è caratterizzato da due strati limite attaccati nel canale di ingresso. Lo spessore dello strato limite (misurato da un tubo di Pitot) all'ingresso è di circa 13 mm. Il profilo di velocità corrisponde ad uno strato limite turbolento completamente sviluppato ed è ben descritto dalla legge di potenza  $1/7$ . Immediatamente a valle del gradino si sviluppa uno shear-layer che porta all'ancoraggio della fiamma turbolenta. Nella zona del gradino ci sono due ricircoli, uno piccolo in corrispondenza dello spigolo, ed uno molto più grande.



**Figura 1. Rappresentazione delle caratteristiche fluidodinamiche osservate nell'esperimento e nella simulazione numerica.**

La transizione da regime stabile a instabile si è verificata sperimentalmente quando la pressione è stata aumentata oltre 1.25 bar. In particolare, nel caso studiato in questo lavoro mediante simulazione numerica di tipo Large Eddy, la velocità "bulk" della miscela di metano e aria all'ingresso è di 51 m/s, il suo rapporto di equivalenza è 0.82, la temperatura dell'aria di 550 K, la portata di aria è di 270 g/s, e la pressione nel combustore è di 1.35 bar. E' stato rilevato un forte flashback della fiamma che ha interessato una zona ampia circa due volte (65 mm) l'altezza del gradino, a monte di esso. Va osservato che la finestra ottica nell'esperimento non consente di visualizzare più a monte dei 65 mm. La fiamma risale il canale di ingresso quando la pressione diminuisce da un massimo ad un minimo, in circa 8 ms; ritorna poi a valle quando la pressione aumenta, in appena 2 ms. Inoltre, sono state identificate fluttuazioni di velocità molto intense, da circa quattro volte (200 m/s) la velocità media fino a valori negativi (ritorno di flusso). Lo spettro dei segnali di pressione ha fatto registrare un picco di 154 dB alla frequenza di 66 Hz (corrisponde ad  $1/4$  della lunghezza acustica longitudinale del canale di ingresso). Comunque, il segnale di pressione presenta una forte modulazione in frequenza (nel range 55-80 Hz) ed in ampiezza; ha anche mostrato improvvise cadute verso ampiezza nulla con una frequenza molto bassa (circa 2 Hz).

## 2.2 Il Set-Up della Simulazione Numerica

La simulazione è stata effettuata con il codice HeaRT, sviluppato da ENEA, in cui le equazioni comprimibili sono scritte in forma conservativa e risolte con una formulazione "staggered" delle variabili per migliorare le proprietà dispersive degli schemi numerici spaziali [2]. In particolare, il codice implementa un'integrazione spaziale alle differenze finite ed un'integrazione nel tempo al terzo ordine di tipo Runge-Kutta. Per il termine convettivo delle equazioni di trasporto degli scalari (densità, energia, frazioni massiche) è stato adottato lo schema AUSM con interpolazione WENO al terzo ordine, mentre per il termine convettivo dell'equazione di trasporto della quantità di moto è stato adottato lo schema centrato al secondo ordine. Un filtraggio gaussiano delle tre componenti di quantità di moto è stato effettuato ogni 500 passi di integrazione temporale nella sola seconda parte del combustore a valle del gradino, ove la griglia presenta celle con rapporto base/altezza superiore a 10: questa procedura aumenta la robustezza del calcolo smorzando eventuali onde spurie.

I trasporti diffusivi includono: la legge di Fourier ed il termine legato alle entalpie delle singole specie ed alla diffusione delle specie stesse nel flusso di calore; la diffusione preferenziale, modellata con la legge di Hirschfelder e Curtiss, nel flusso diffusivo di massa. Le proprietà di trasporto sono accuratamente calcolate per mezzo della teoria cinetica. Esse sono tabulate, ad eccezione dei coefficienti di diffusione binaria,

usando le routine fornite dai Prof. Ern e Giovangigli [3-6]. Le leggi di mescolamento di Wilke, Mathur, Hirschfelder e Curtiss, sono usate per stimare la viscosità, conducibilità ed i coefficienti di diffusione.

E' stato utilizzato il modello di turbolenza di Smagorinsky nella sua formulazione dinamica. Lo Schmidt turbolento è stato assunto pari a 0.7, mentre il Prandtl turbolento a 0.9. L'interazione turbolenza - combustione è stata trattata mediante il Fractal Model [7-9].

Il meccanismo di reazione adottato è il single step di Westbrook and Dryer [10]. Il modo più semplice di rappresentare l'ossidazione di un combustibile convenzionale è quello costituito da un'unica reazione globale del tipo



L'adozione di una reazione globale è il modo più conveniente per approssimare gli effetti delle molte reazioni elementari che effettivamente avvengono. La velocità di tale reazione deve quindi essere una media opportuna delle velocità delle singole reazioni coinvolte. Un meccanismo single-step predice generalmente bene le velocità di fiamma in un ampio range di condizioni operative, ma presenta diversi difetti che possono essere importanti per certe applicazioni. Assumendo semplicemente che i prodotti di combustione siano CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>O, le temperature sono generalmente sovrappredette. Infatti, in corrispondenza della temperatura adiabatica di fiamma tipica degli idrocarburi (circa 2000 K), tra i prodotti della combustione esiste una non trascurabile quantità di CO ed H<sub>2</sub> in equilibrio con CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>O. Questo è vero, seppur a livelli più bassi, anche per altre specie, come ad esempio H, O ed OH (specie radicali di particolare importanza), che derivano da reazioni endotermiche (assorbono calore). Questo equilibrio abbassa le temperature al di sotto dei valori predetti da un meccanismo single-step.

Adottando quindi un meccanismo globale, l'accensione tende ad essere favorita, e quindi poco si adatta a cogliere in modo accurato eventuali fenomeni di estinzione localizzata, che presumibilmente accompagnano il fenomeno di flashback rilevato sperimentalmente nel caso in esame. Tale meccanismo single-step ha però il vantaggio di far ottenere in tempi relativamente brevi una fiamma nel dominio computazionale, poiché richiede il trasporto di sole cinque specie (azoto compreso). Si sottolinea che è comunque in grado di cogliere fenomeni globali, e cioè estinzioni generalizzate dovute a macroscopici effetti di stiramento fluidodinamico del fronte di fiamma, e fenomeni di flashback generalizzato (con generalizzato si intende che i fenomeni riguardano una zona macroscopica del fronte di fiamma).

La griglia di calcolo adottata è tridimensionale cartesiana, di circa 27M di nodi di calcolo. Sono state incluse nella simulazione anche le pareti laterali. Il canale di ingresso ha 122x132x140 nodi con lunghezze 0.21x0.075x0.1 m nelle direzioni del flusso, quella dell'altezza e della profondità, rispettivamente. La zona di reazione principale a valle del gradino ha 877x200x140 nodi con lunghezze 1.3x0.1x0.1 m.

Le pareti sono state assunte adiabatiche, impermeabili e viscosi. L'uscita è stata trattata come parzialmente non riflessiva con una costante di rilassamento di 0.1: il modello implementato (Navier-Stokes-Characteristic-Boundary-Conditions) è quello esteso per trattare flussi reagenti con proprietà di trasporto variabili con la temperatura, la pressione e la composizione, ed in modo che risentano dell'effetto del rilascio di calore locale [11-14].

Un discorso a parte merita l'ingresso che, a parte l'uso dello stesso generatore di turbolenza sintetica per produrre fluttuazioni turbolente di velocità all'ingresso [15], è stato modellato in modo molto diverso rispetto alla precedente annualità (vedi sezione successiva).

### 2.3 Modellazione della Condizione al Contorno di Ingresso

Nella precedente annualità l'ingresso era stato modellato come un contorno di tipo riflessivo, imponendo cioè direttamente le velocità e le relative fluttuazioni turbolente (7 m/s, pari ad un'intensità di turbolenza di circa il 14%) con la tecnica di Klein [15]. In particolare erano state eseguite due simulazioni, in una delle quali era stata anche imposta all'ingresso una oscillazione forzata della velocità a 66 Hz.

- La prima simulazione, effettuata senza la pulsazione di velocità a 66 Hz forzata in ingresso, aveva predetto una fiamma stabilmente ancorata al gradino. Si riporta in Fig. 2 un campo istantaneo della temperatura e della pressione su alcune pareti del combustore, insieme a due iso-superficie di temperatura a 1700 e 2000 K. Come si può notare, la fiamma predetta risulta ben ancorata allo spigolo e molto corrugata.

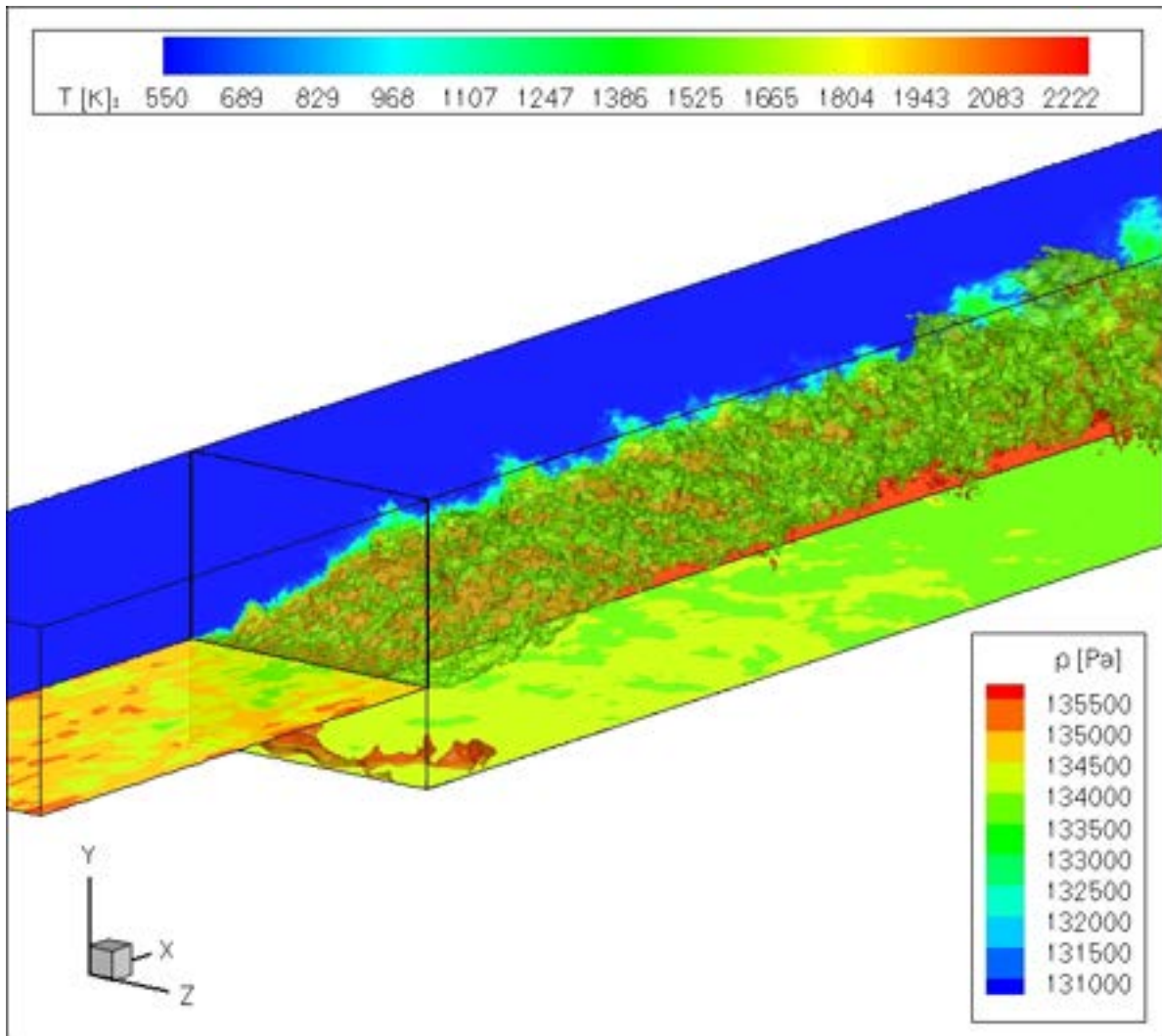


Figura 2. Campo istantaneo associato alla simulazione senza pulsazione forzata della velocità all'ingresso: sulla parete verticale è mostrata la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K.

- La seconda simulazione, effettuata forzando anche una pulsazione dell'intero profilo medio di velocità imposto, con una frequenza di 66 Hz (come da misure sperimentali) ed un'ampiezza di 2.8 m/s (che in una preparatoria simulazione RANS aveva fornito un'ampiezza di 154 dB a 66 Hz nel punto di misura collocato ad 1.5 cm a valle del gradino nella parete superiore), aveva mostrato un'estinzione generalizzata (Fig. 3) come negli esperimenti, ma solo un debole tentativo di flashback (Fig. 4). Anche variando diversi parametri (il coefficiente di rilassamento dell'uscita non riflessiva è stato variato da 0.1 a 0.8; l'ampiezza della pulsazione a 66 Hz è stata aumentata da 2.8 a 12 m/s) non era stato possibile predire fenomeni di flashback evidenti come nell'esperimento, ma solo un diverso modo di oscillare del fronte di fiamma, accompagnato da qualche debole ritorno di fiamma e soprattutto da estinzioni generalizzate nella zona tra il gradino e la fine del ricircolo principale. Si rileva che l'aumento dell'ampiezza della pulsazione a 66 Hz ha solo intensificato tali fenomeni di estinzione, senza neppure produrre deboli flashback.

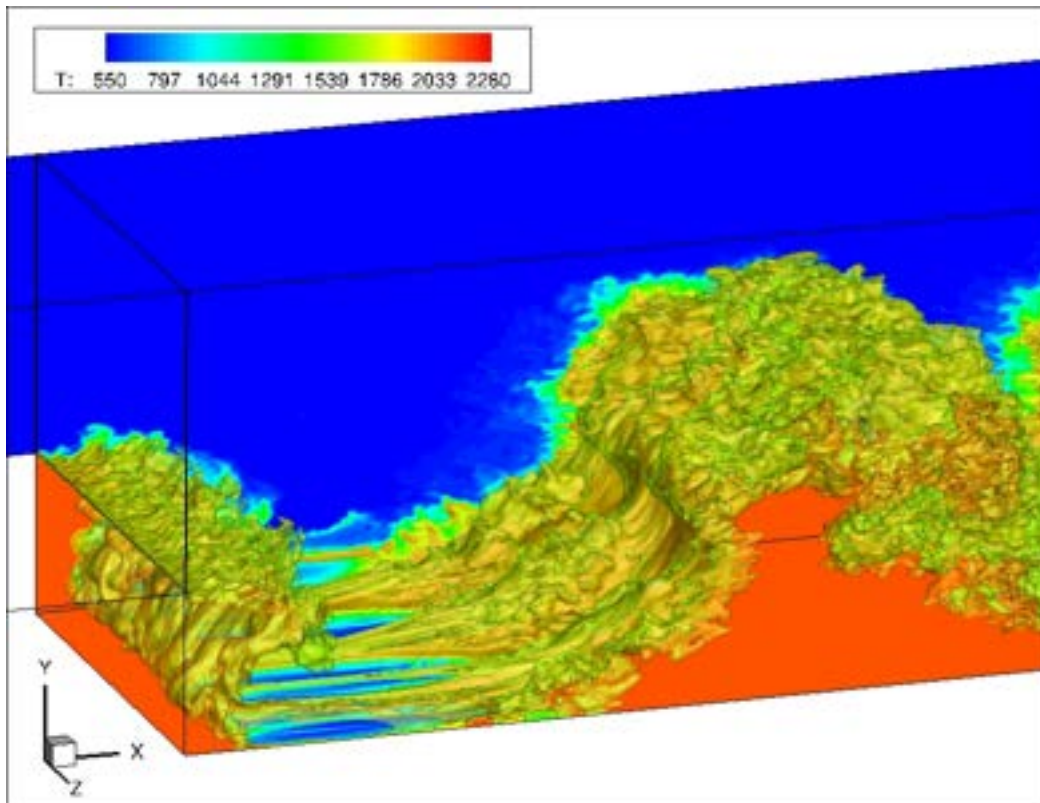


Figura 3. Estinzione del fronte di fiamma a valle del gradino. Sulla parete verticale è ancora una volta mostrata la distribuzione di temperatura [K], e sono sempre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K.

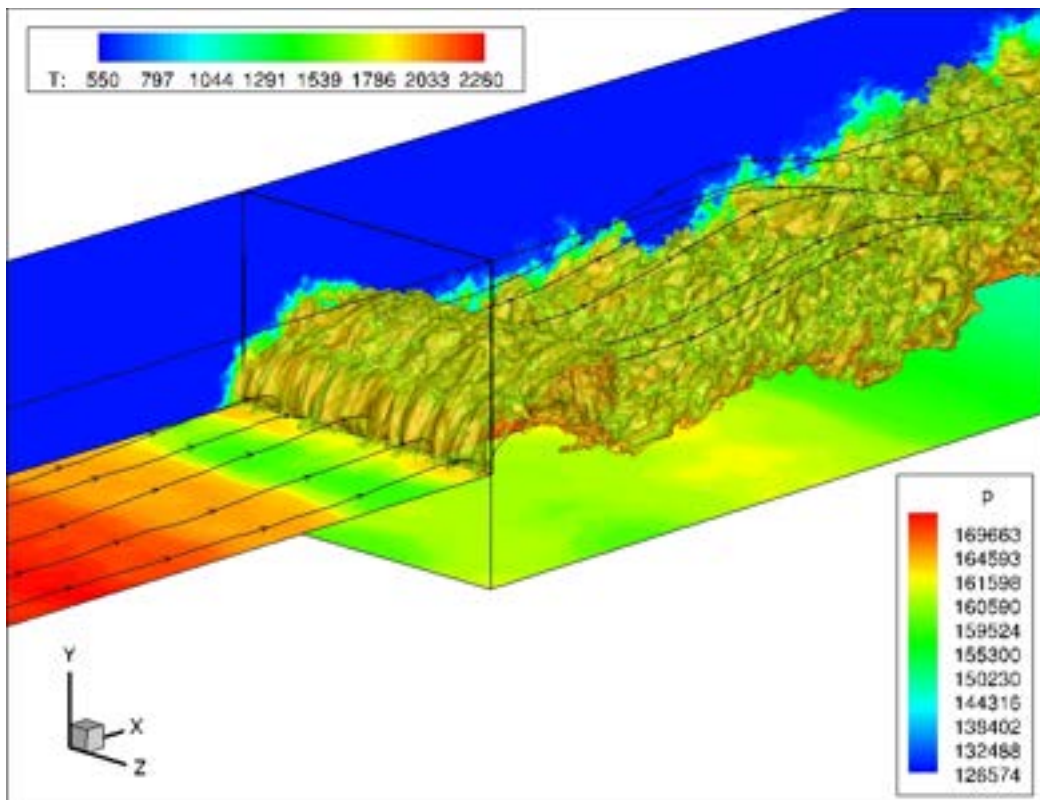


Figura 4. Debole fenomeno di flashback. Campo istantaneo associato alla simulazione con pulsazione forzata della velocità all'ingresso (66 Hz con ampiezza di 2.8 m/s): sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K.

Sofferamoci sulla seconda simulazione. Quando l'onda di depressione investe la zona del gradino, il fronte di fiamma tende a risalire nel canale di iniezione, come mostrato in Fig. 4. Tale fenomeno di flashback è stato però molto debole: il fronte è riuscito a risalire solo una piccola distanza a monte del gradino. Analizzando la distribuzione della pressione sulla parete inferiore del canale di ingresso (sempre in Fig. 4), si è capito che questo era dovuto ad una rapida crescita della pressione all'ingresso, con conseguente accelerazione del flusso a valle che impediva al fronte di risalire. La pressione osservata all'ingresso, circa 1.7 bar, era superiore alla pressione nominale del combustore (1.35 bar). Questa sovrappressione non fisica era dovuta all'accoppiamento tra l'onda forzata all'ingresso, l'onda riflessa dalla propagazione del fronte di fiamma nel canale a monte del gradino, ed il tipo di condizione al contorno adottata per l'ingresso. Infatti, avendo assunto una condizione di ingresso di tipo riflessivo (ove cioè velocità, temperatura e composizione sono fissate), eventuali onde incidenti su esso saranno riflesse in modo non fisico, andando così ad impedire il fenomeno di flashback che stavamo cercando di riprodurre nella simulazione.

La cura per il problema riscontrato all'ingresso consiste nell'assumere una condizione non riflessiva o parzialmente non riflessiva per l'ingresso [11-14]. Tale condizione è stata implementata nel codice HearT in questa annualità. La nuova condizione di ingresso consiste nelle equazioni di Navier-Stokes scritte in termini di caratteristiche. In tale forma, nelle equazioni compaiono esplicitamente le ampiezze delle onde incidenti sul contorno di ingresso. Tali onde, secondo la tipologia, si muovono con una velocità caratteristica ( $u$ ,  $u+a$ ,  $u-a$ , essendo  $u$  la velocità del flusso normale al contorno, ed  $a$  la velocità del suono); alcune onde si muovono dall'esterno verso l'interno del dominio computazionale, mentre altre ne escono. Le onde entranti devono essere modellate in modo da garantire i valori asintotici di ingresso per velocità, temperatura e composizione. In particolare, l'ampiezza dell'onda entrante  $L1$  associata al segnale di velocità normale di ingresso,  $U_z$ , è modellata come

$$L1 = \sigma * \rho * a^2 * (U_z - U_z^*) / L$$

essendo  $\sigma$  una costante di rilassamento (0.27 nelle simulazioni),  $\rho$  la densità,  $U_z^*$  la velocità normale di ingresso desiderata (51 m/s),  $L$  la lunghezza acustica caratteristica (lunghezza del dominio computazionale).

Come nelle simulazioni effettuate nella precedente annualità, è stata anche imposta una pulsazione dell'intero profilo medio di velocità  $U_z$ , con una frequenza  $f=66$  Hz ed un'ampiezza  $A=2.8$  m/s. Questa forzante è stata imposta sotto forma di un'onda avente ampiezza

$$L1_{U_z} = -2 * \rho * a * d[A * \sin(2 * \pi * f * t)] / dt = -2 * \rho * a * A * 2 * \pi * f * \cos(2 * \pi * f * t)$$

che è stata sommata alla precedente  $L1$ . La fluttuazione di velocità indotta da questa forzante ha però prodotto onde di pressione di ampiezza trascurabile rispetto alla vecchia simulazione con ingresso riflessivo: non si è avuta neppure la debole tendenza al flashback.

Di conseguenza, si è deciso di imporre direttamente un'oscillazione acustica in ingresso di ampiezza pari a quella rilevata nelle precedenti simulazioni con inlet riflessivo: una forzante acustica sinusoidale con ampiezza  $A=30000$  Pa e frequenza  $f=66$  Hz. Tale onda ha un'ampiezza

$$L1_{ac} = -2 * d[A * \sin(2 * \pi * f * t)] / dt = -2 * A * 2 * \pi * f * \cos(2 * \pi * f * t)$$

che è stata sommata alla precedente  $L1$ .

Inoltre, la turbolenza sintetica di ingresso è stata pure imposta in termini di perturbazione dell'ampiezza dell'onda entrante  $L1$ ,

$$L1_{turb} = -2 * \rho * a * du_z' / dt$$

essendo  $u_z'$  la fluttuazione di velocità imposta dalla procedura di Klein [15]. Tale onda è anch'essa sommata alla  $L1$ .

## 2.4 Effetto della Condizione al Contorno di Ingresso Parzialmente Non Riflessiva

Adottando una formulazione alle caratteristiche per la condizione al contorno di ingresso, abbiamo evitato riflessioni spurie (dal contorno di ingresso) di onde acustiche provenienti dall'interno del campo. In tal modo, il fronte di fiamma è stato in grado di risalire a monte del gradino in modo efficace e violento (Figs. 5-6), raggiungendo anche l'ingresso stesso (Fig. 7). In tali condizioni, non c'è più un fronte di fiamma a valle

del gradino: il canale è riempito interamente da prodotti di combustione. Il fronte di fiamma risalito all'ingresso è poi soffiato nuovamente a valle (Figs. 7-8) mostrando un ancoraggio non stabile sulla parete superiore del canale: si ha cioè la rapida formazione di un fronte inclinato dalla parete superiore dell'ingresso verso lo spigolo del gradino (Fig. 7). Prima che tale fronte sia soffiato a valle del gradino, si ha rapidamente la formazione di un altro fronte ancorato stabilmente allo spigolo del gradino stesso (Fig. 7). I due fronti interagiscono (Fig. 8), producendo un nuovo ritorno di fiamma nella sola parte centrale del canale (lungo la sua altezza); tale interazione modifica anche la pendenza del fronte che si propaga lungo la parete superiore del canale. Mentre i due fronti si propagano a valle (Fig. 9), ci sono nuovi fenomeni di flashback (Fig. 10), anche se più deboli del precedente, che inducono estinzioni dapprima localizzate (Fig. 11) e poi sempre più vaste (Fig. 12). Questa volta però, un fronte di fiamma resta sempre stabilmente ancorato allo spigolo del gradino (Fig. 12), mentre un altro fronte ormai separato è soffiato a valle (Fig. 13). A questo punto il fronte ancorato allo spigolo del gradino si allunga verso l'uscita del combustore, tornando ad una configurazione simile a quella originale stabile (Fig. 14). Poi si ripresenta il fenomeno di flashback violento (Fig. 15) in cui il fronte raggiunge nuovamente l'ingresso (Fig. 16).

L'intero ciclo descritto, che parte da una condizione simile a quella presentata in Fig. 2 e termina in una condizione analoga riportata in Fig. 14, ha una durata di circa 47 ms nella simulazione. Durante questo ciclo la fiamma risale a monte del gradino più volte. Per avere un'idea dei tempi in gioco, una volta che la fiamma ha raggiunto l'ingresso del dominio di calcolo, essa impiega circa 13 ms per tornare a valle e riancorarsi allo spigolo del gradino come in Fig. 8. Il tempo che intercorre tra la Fig. 9 e termina poco dopo la Fig. 11 (prima della Fig. 12), relativo ad un altro flashback, dura circa 7 ms. Informazioni di questo tipo non si trovano nei documenti disponibili relativi agli esperimenti: viene riportato che la fiamma risale il canale di ingresso quando la pressione diminuisce da un massimo ad un minimo, in circa 8ms, e ritorna poi a valle quando la pressione aumenta, in appena 2 ms. Differenze nelle tempistiche sono da attendersi dato il meccanismo cinetico semplificato adottato: tale meccanismo tende a sovrastimare le velocità di reazione e quindi la fiamma simulata ha una maggiore resistenza ad essere portata a valle.

Nonostante la cinetica semplificata, le simulazioni effettuate con la condizione parzialmente non riflessiva all'ingresso hanno colto fenomeni di flashback, estinzioni localizzate ed anche molto ampie. Inoltre, sono state identificate fluttuazioni di velocità molto intense, da circa quattro volte (200 m/s) la velocità media fino a valori negativi (ritorno di flusso), come anche osservato negli esperimenti.

Da quanto descritto, si evince una complessa dinamica all'interno del combustore simulato, indotta dal flashback. Tale dinamica non si limita alla sola frequenza di 66 Hz forzata all'ingresso, ma consiste anche in altre frequenze, come evidenziato analizzando i segnali di velocità  $U_z$ , pressione  $p$ , temperatura  $T$  campionati in tre punti del piano longitudinale centrale del combustore: M1, sulla parete inferiore del canaletto di ingresso, 10 mm a monte dello spigolo del gradino (Fig. 17); M2, sulla parete superiore del canale, 15 mm a valle del gradino (Fig. 18); M3, sulla parete superiore del canale, 675 mm a valle del gradino (Fig. 19). Le trasformate di Fourier di questi segnali, riportate in Fig. 20, evidenziano la presenza di varie frequenze nella banda 20-100 Hz. Gli spettri di pressione ricavati sperimentalmente nei punti M2 ed M3 hanno mostrato una forte modulazione in frequenza (nel range 55-80 Hz) ed in ampiezza, con improvvise cadute verso ampiezza nulla con una frequenza molto bassa (circa 2 Hz).

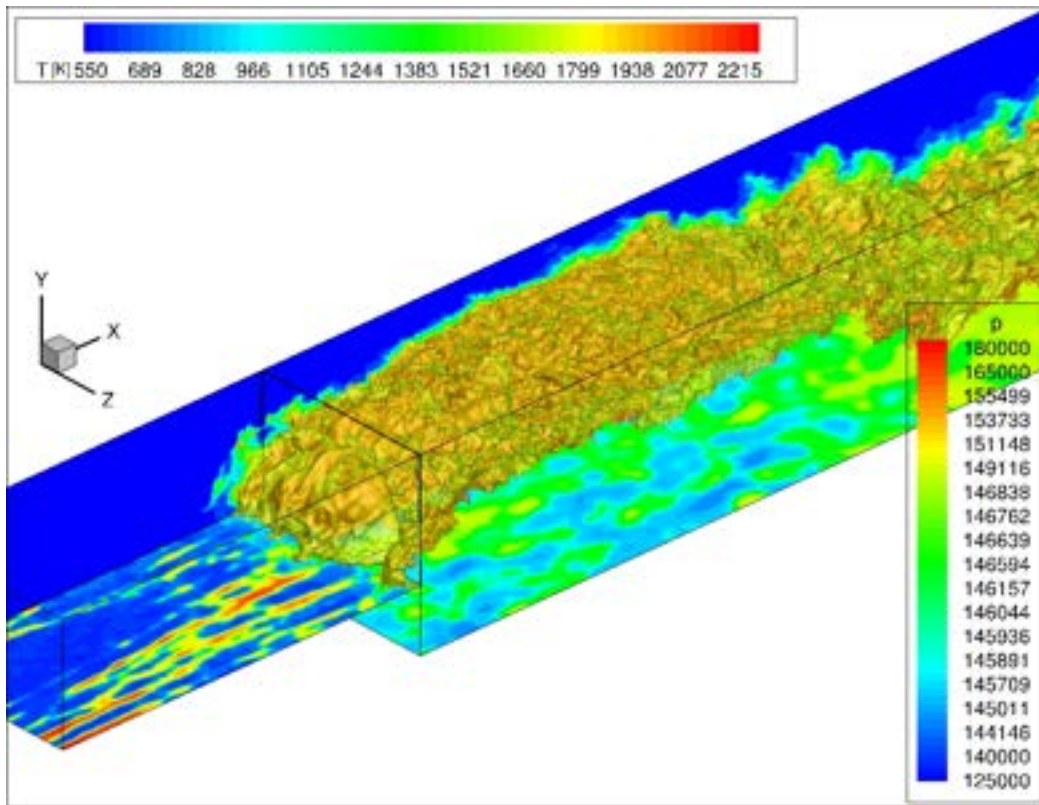


Figura 5. Prime fasi di flashback con le nuove condizioni parzialmente non riflettive all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K.

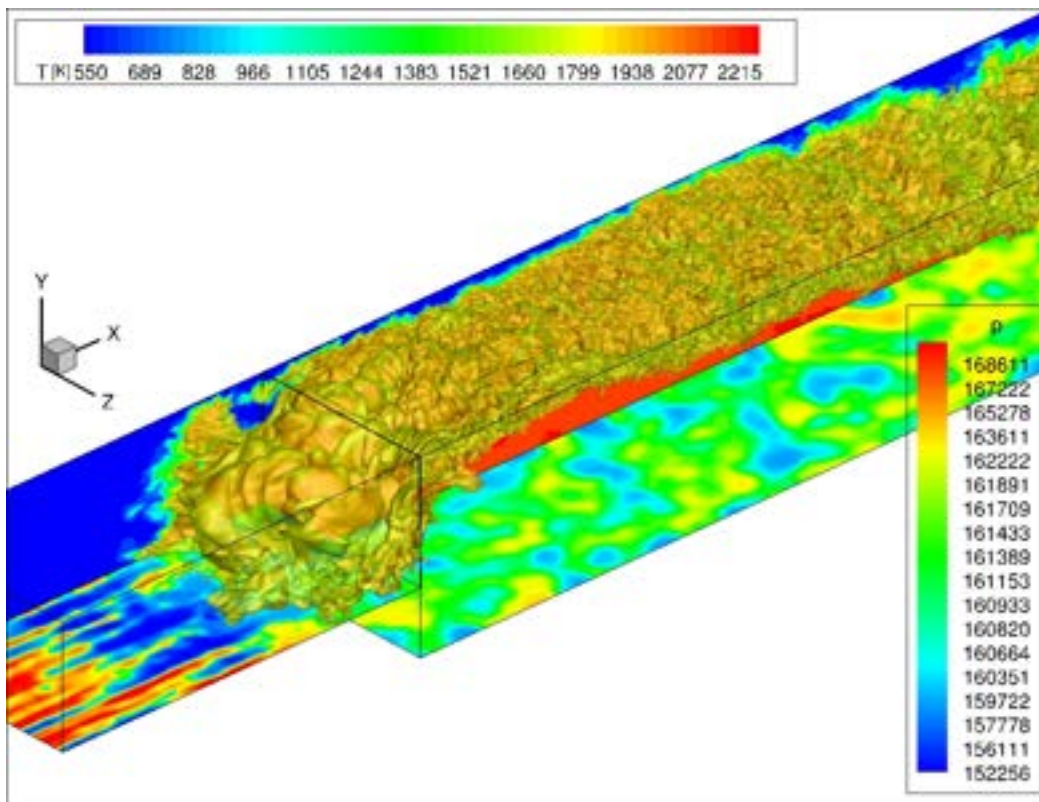


Figura 6. Accelerazione del fronte verso l'ingresso durante il flashback con le condizioni parzialmente non riflettive all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.054 s)

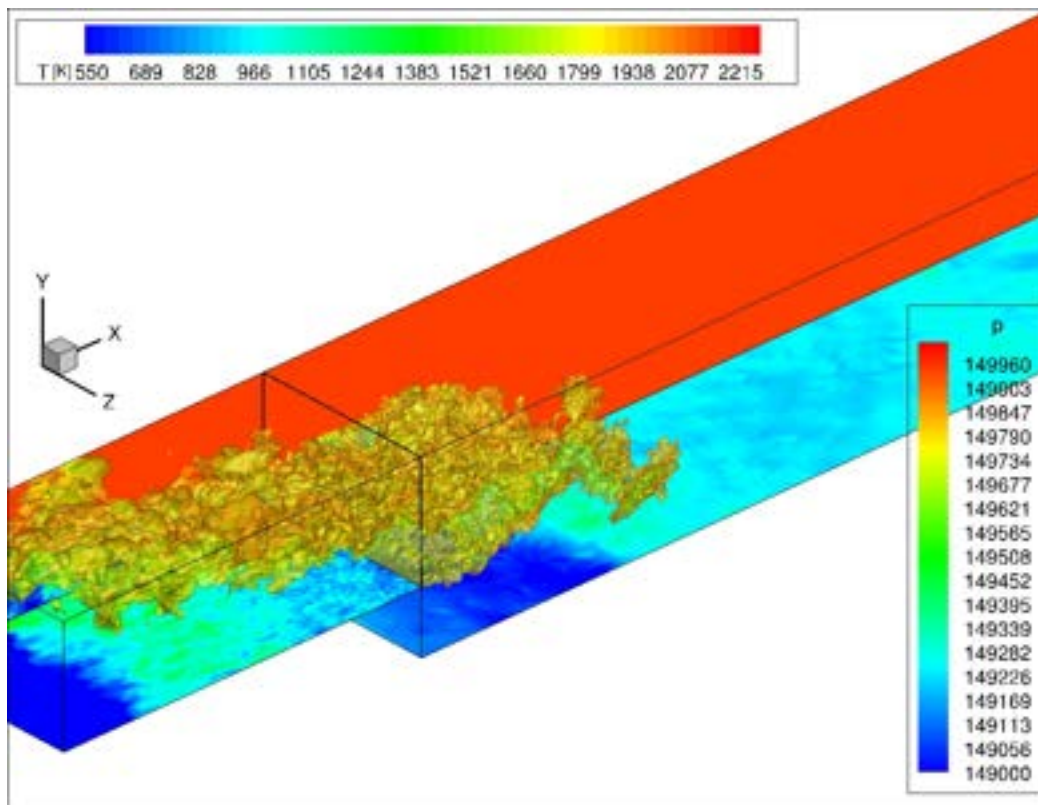


Figura 7. Forte fenomeno di flashback fino all'ingresso con le condizioni parzialmente non riflettive all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.057 s)

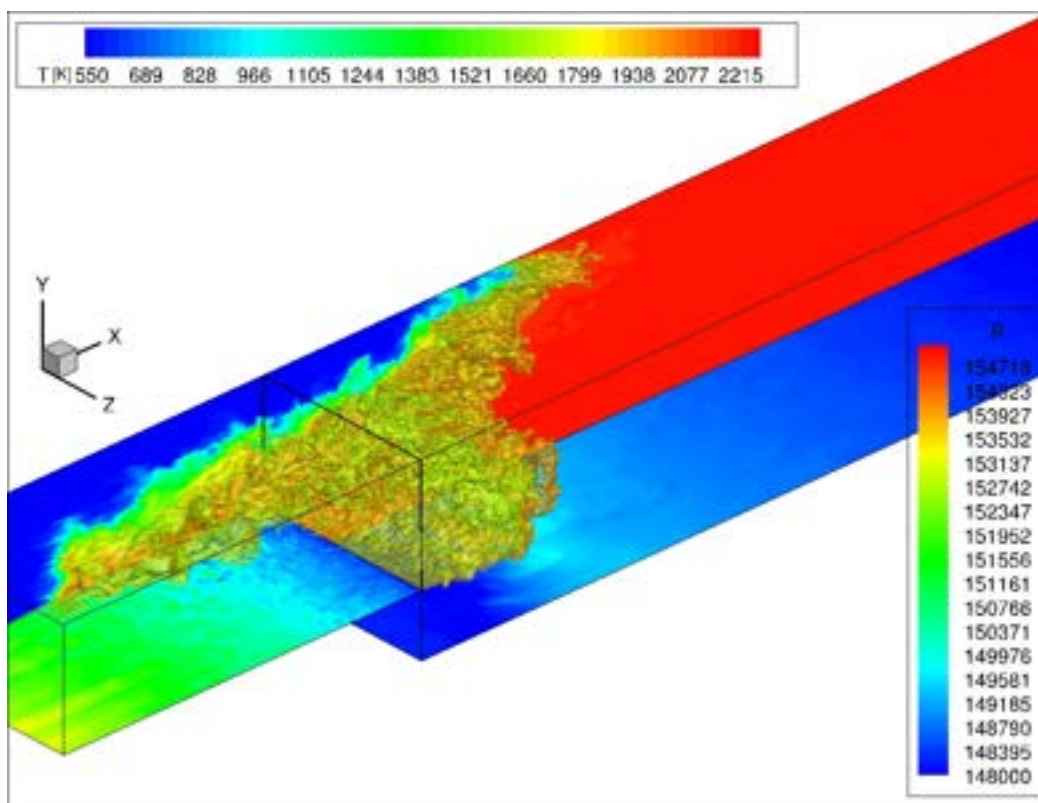


Figura 8. Trasporto del fronte verso il gradino dopo un forte fenomeno di flashback con le condizioni parzialmente non riflettive all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.069 s)

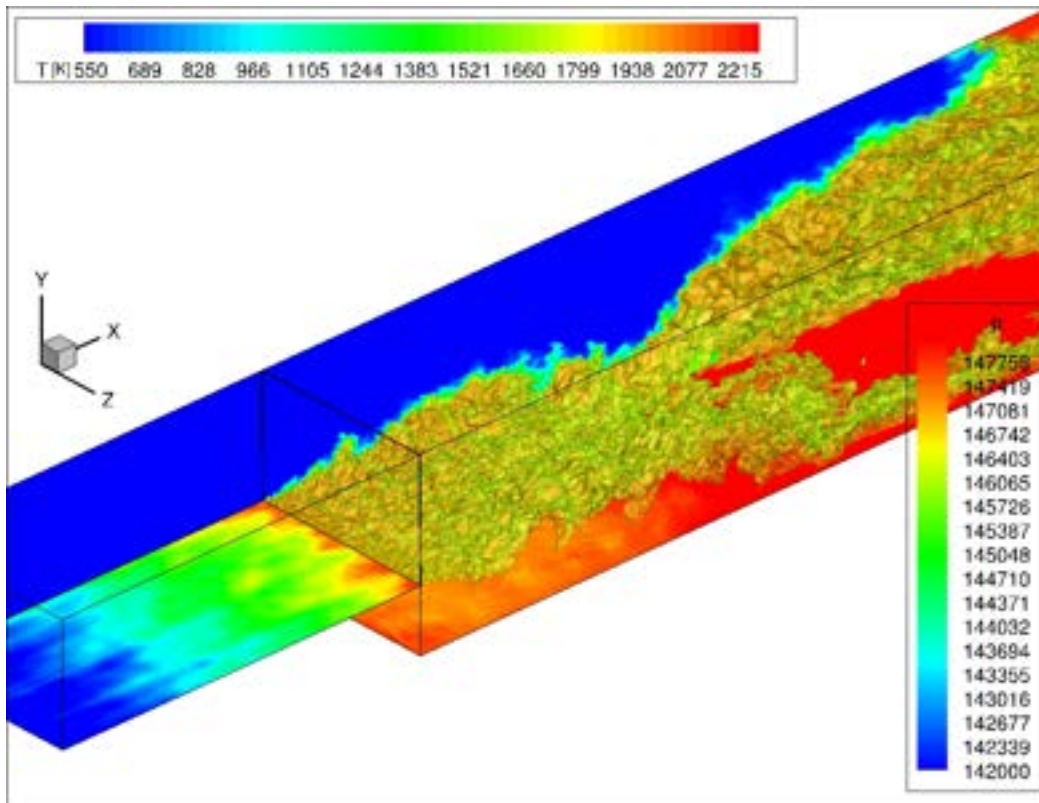


Figura 9. Ancoraggio del fronte dopo un forte fenomeno di flashback con le condizioni parzialmente non riflesse all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.076 s)

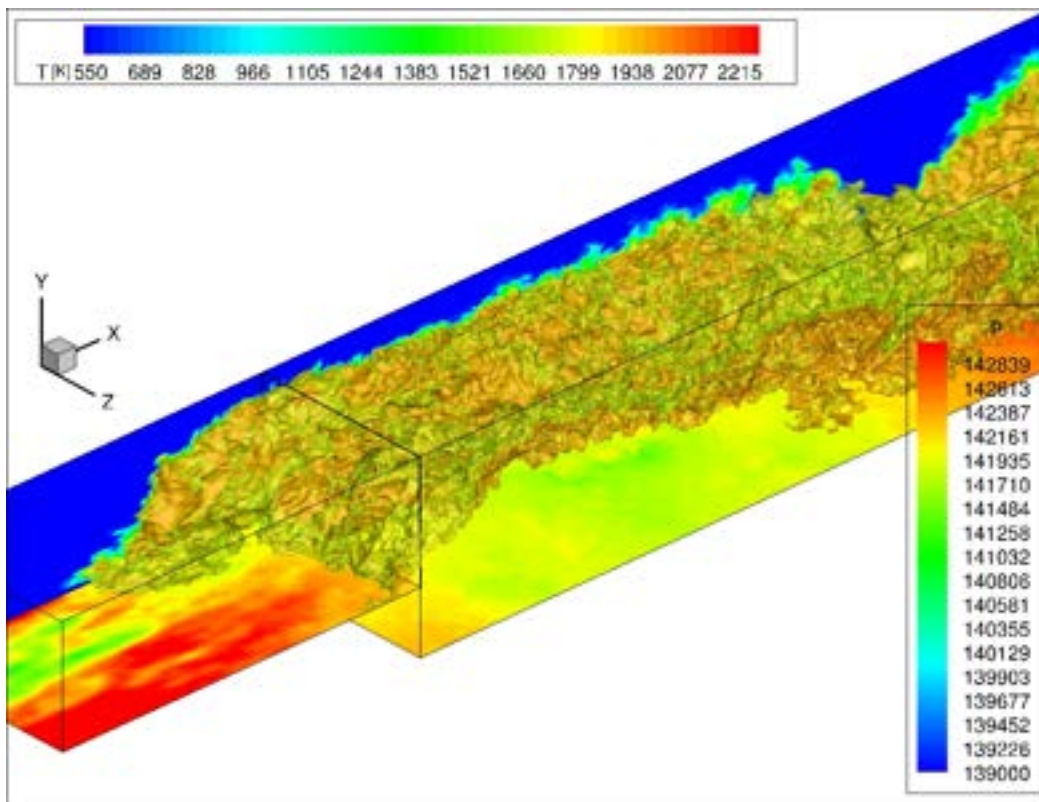


Figura 10. Fenomeno di flashback durante la fase di ancoraggio con le condizioni parzialmente non riflesse all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.08 s)

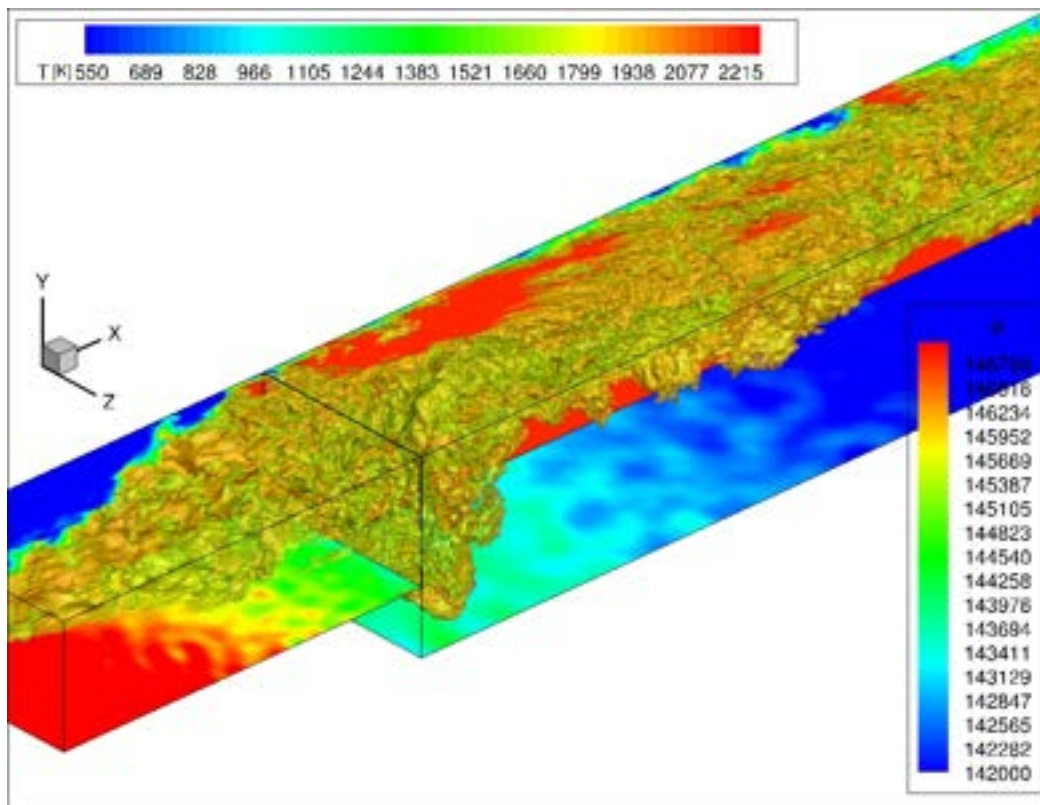


Figura 11. Flashback ed estinzioni localizzate con le condizioni parzialmente non riflesse all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.084 s)

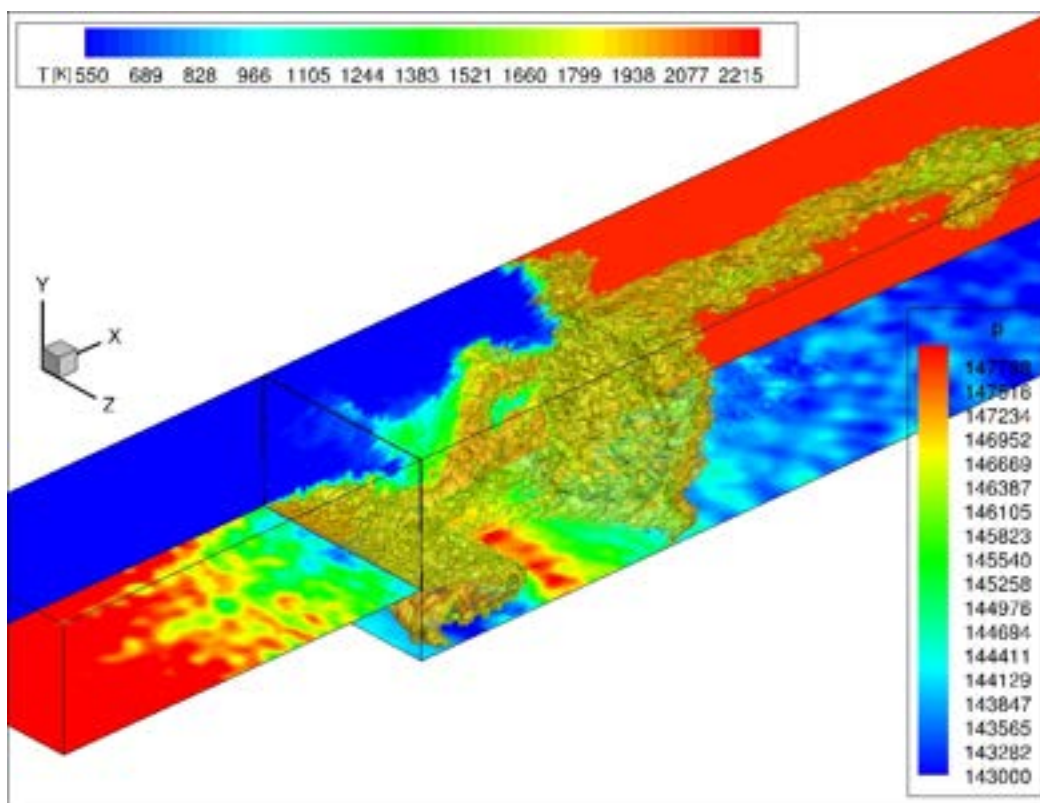


Figura 12. Flashback ed estensioni generalizzate con le condizioni parzialmente non riflesse all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.088 s)

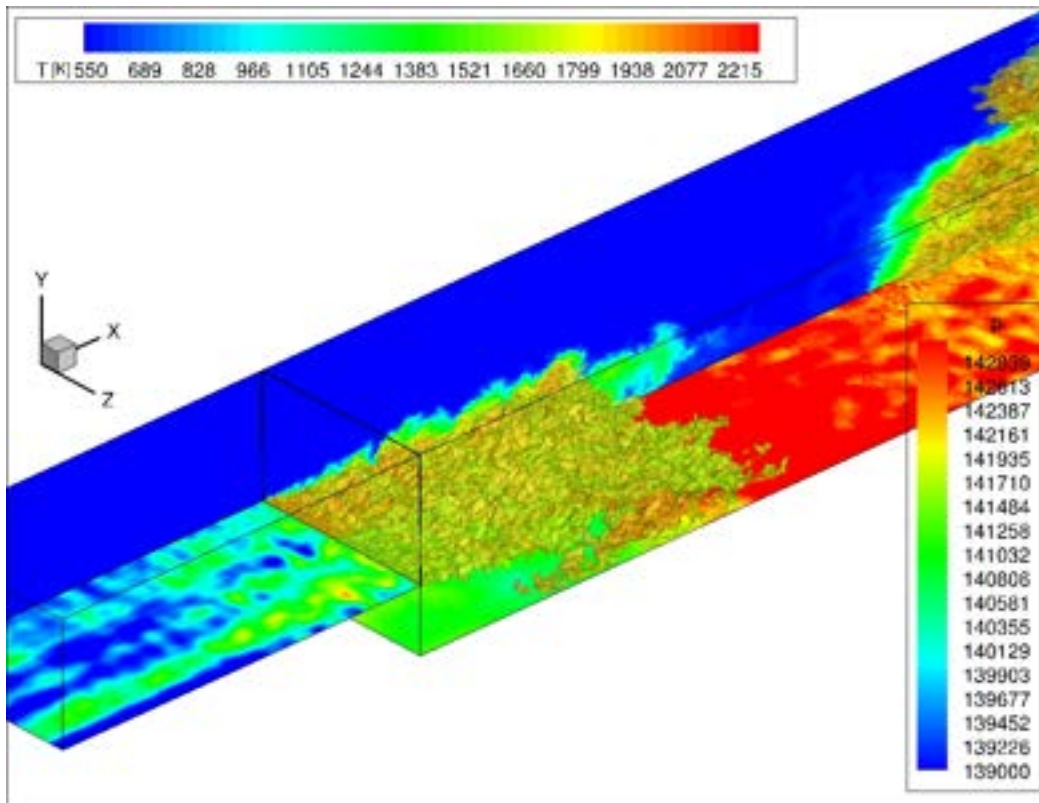


Figura 13. Ancoraggio della fiamma dopo i due fenomeni di flashback con le condizioni parzialmente non riflettive all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.091 s)

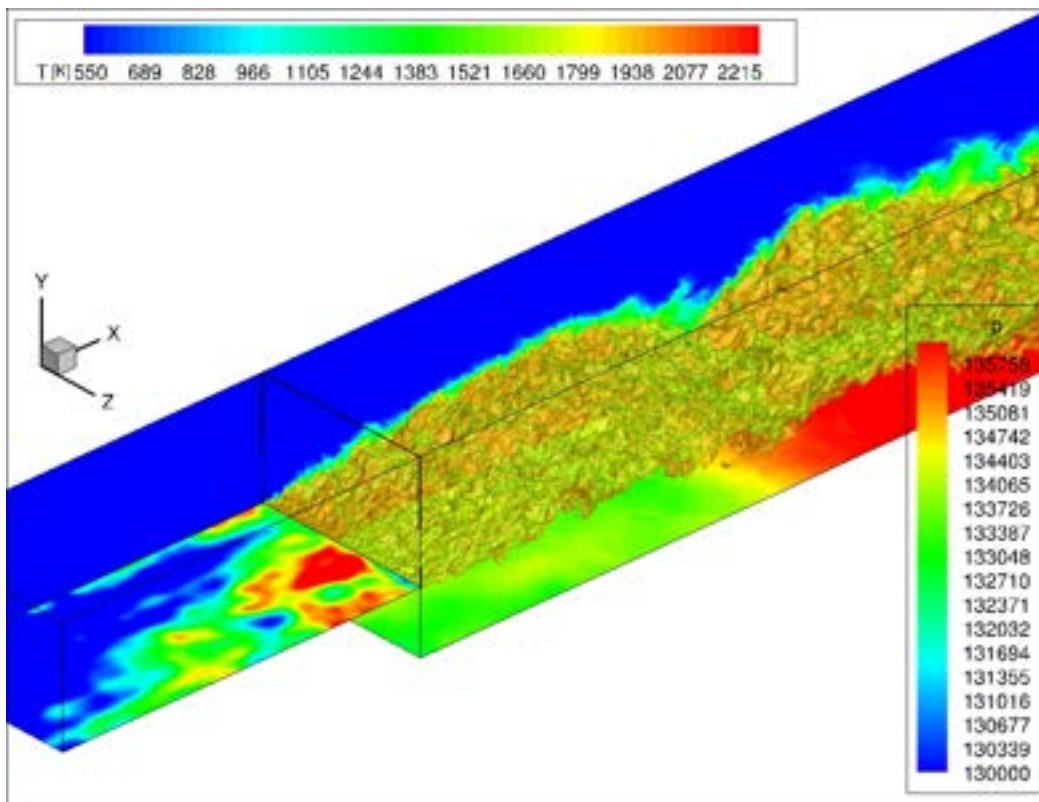


Figura 14. Sviluppo del fronte stabile dopo i due fenomeni di flashback con le condizioni parzialmente non riflettive all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.093 s)

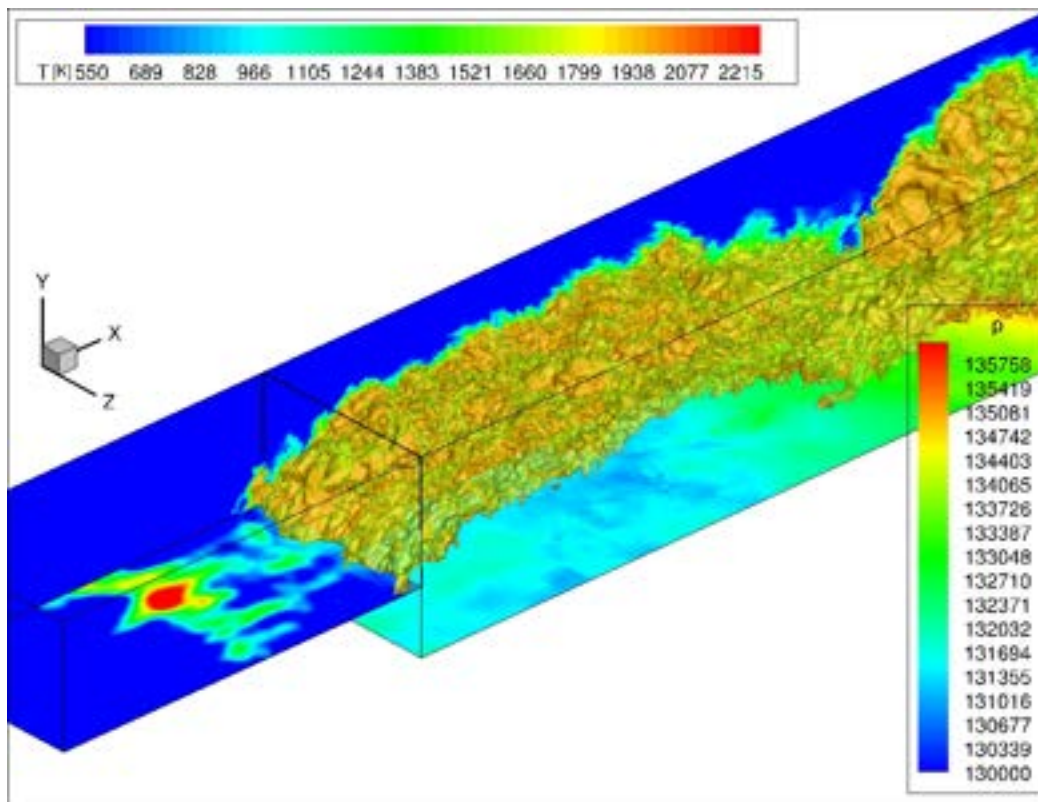


Figura 15. Prime fasi di un nuovo fenomeno di flashback con le condizioni parzialmente non riflesse all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.098 s)

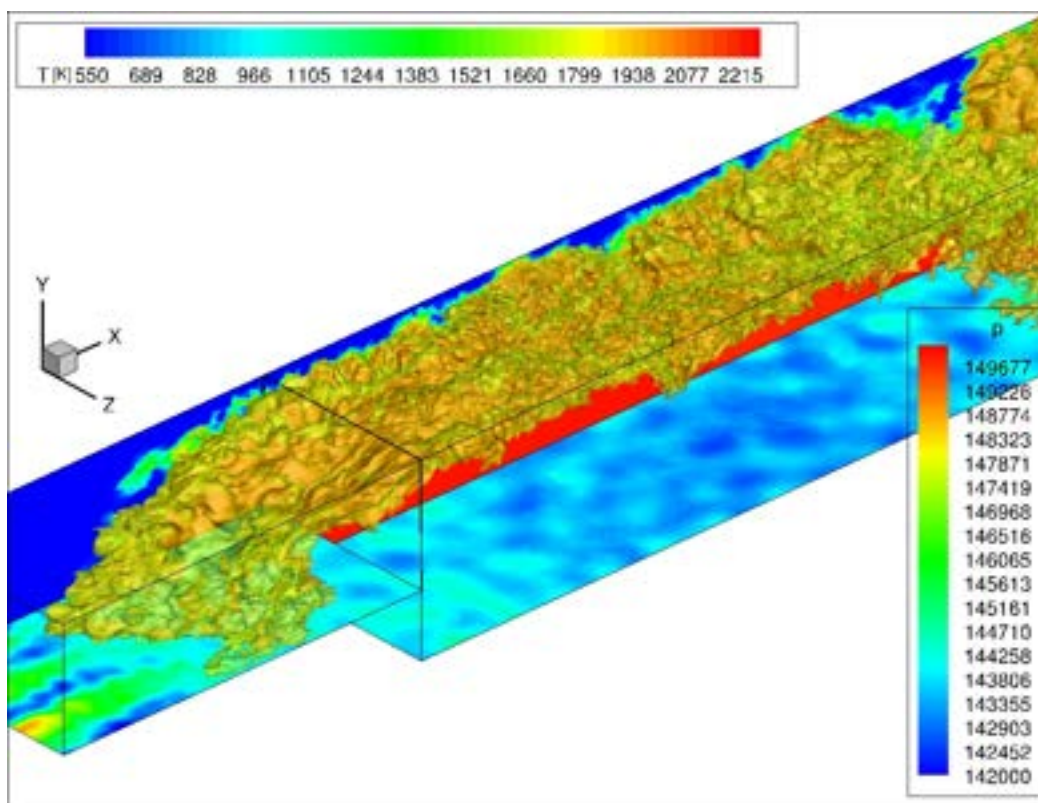


Figura 16. Nuovo forte fenomeno di flashback con le condizioni parzialmente non riflesse all'ingresso: sulla parete verticale vi è la distribuzione di temperatura [K], su quelle orizzontali la distribuzione di pressione [Pa]. Sono inoltre riportate le due iso-superficie a 1700 e 2000 K. (time = 1.102 s)

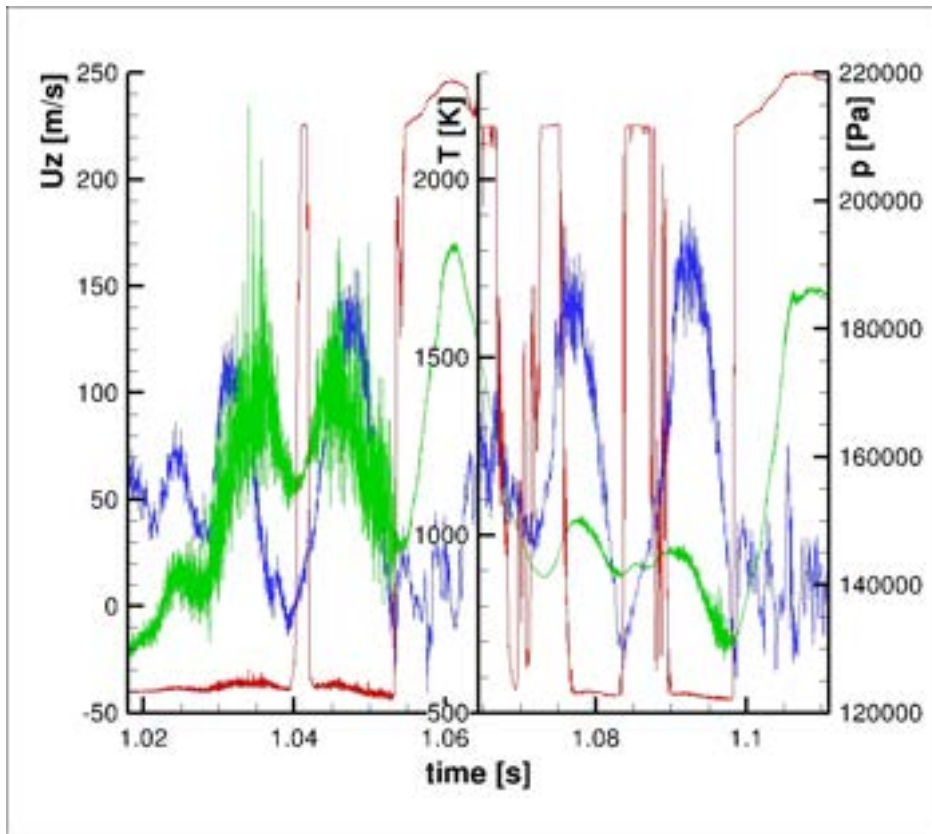


Figura 17. Storia della velocità  $U_z$  (blu), pressione  $p$  (verde), e temperatura  $T$  (rosso) in un punto (M1) sulla parete inferiore del canaletto di ingresso, 10 mm a monte del gradino, nel piano longitudinale centrale del combustore.

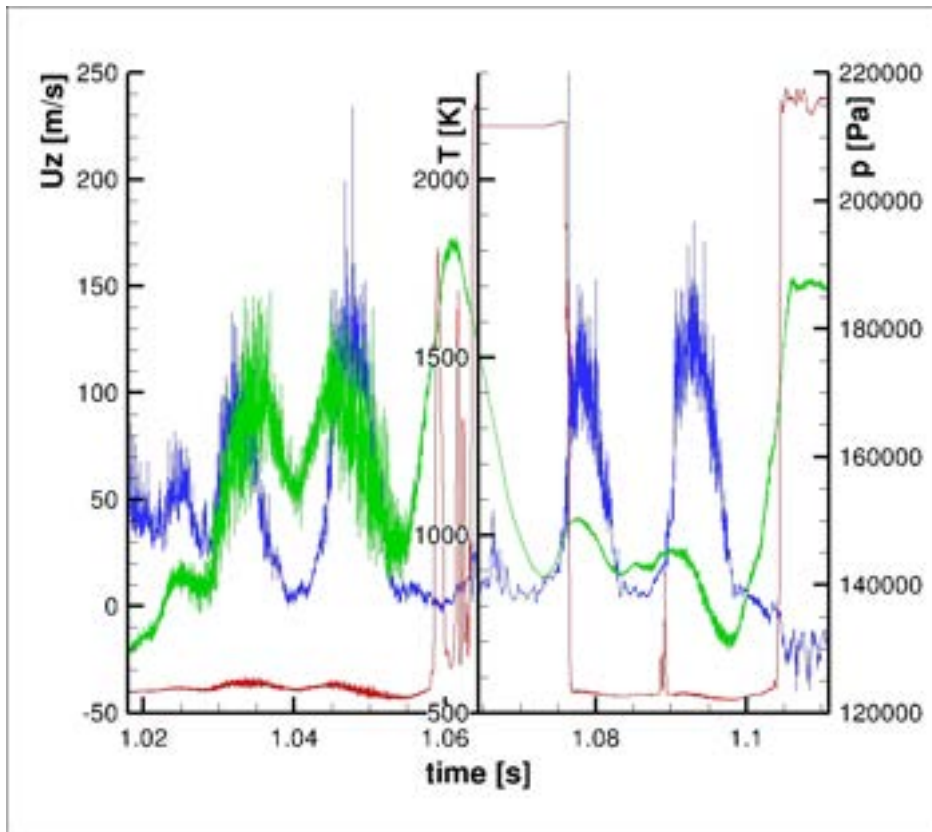


Figura 18. Storia della velocità  $U_z$  (blu), pressione  $p$  (verde), e temperatura  $T$  (rosso) in un punto (M2) sulla parete superiore del canale, 15 mm a valle del gradino, nel piano longitudinale centrale del combustore.

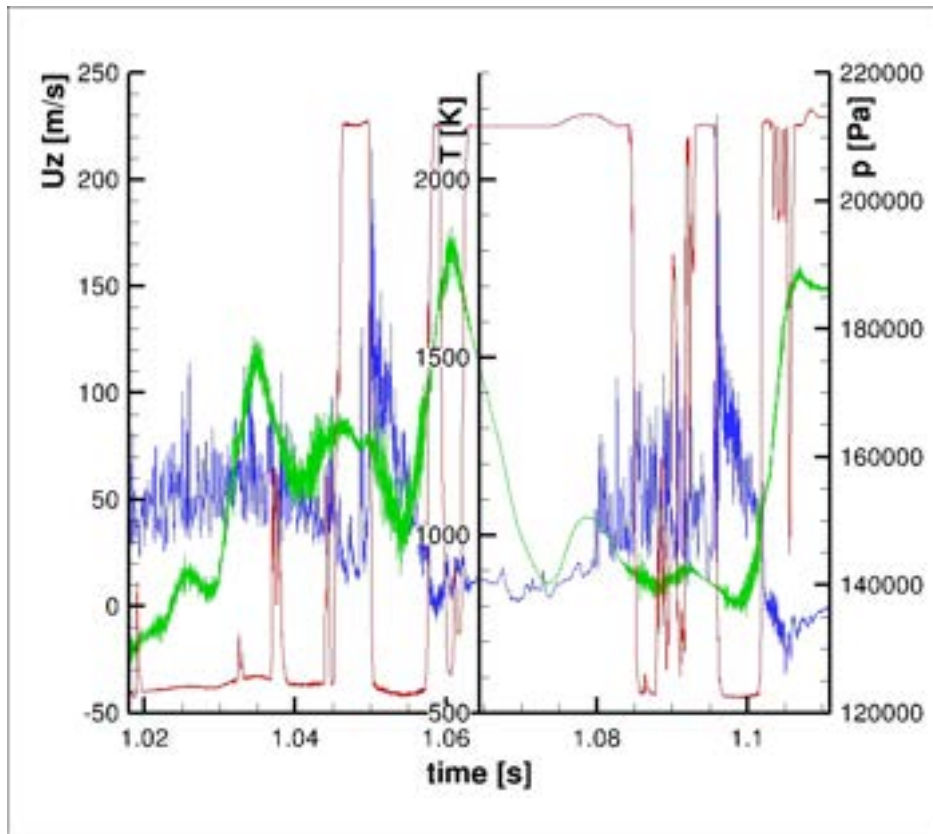


Figura 19. Storia della velocità  $U_z$  (blu), pressione  $p$  (verde), e temperatura  $T$  (rosso) in un punto (M3) sulla parete superiore del canale, 675 mm a valle del gradino, nel piano longitudinale centrale del combustore.

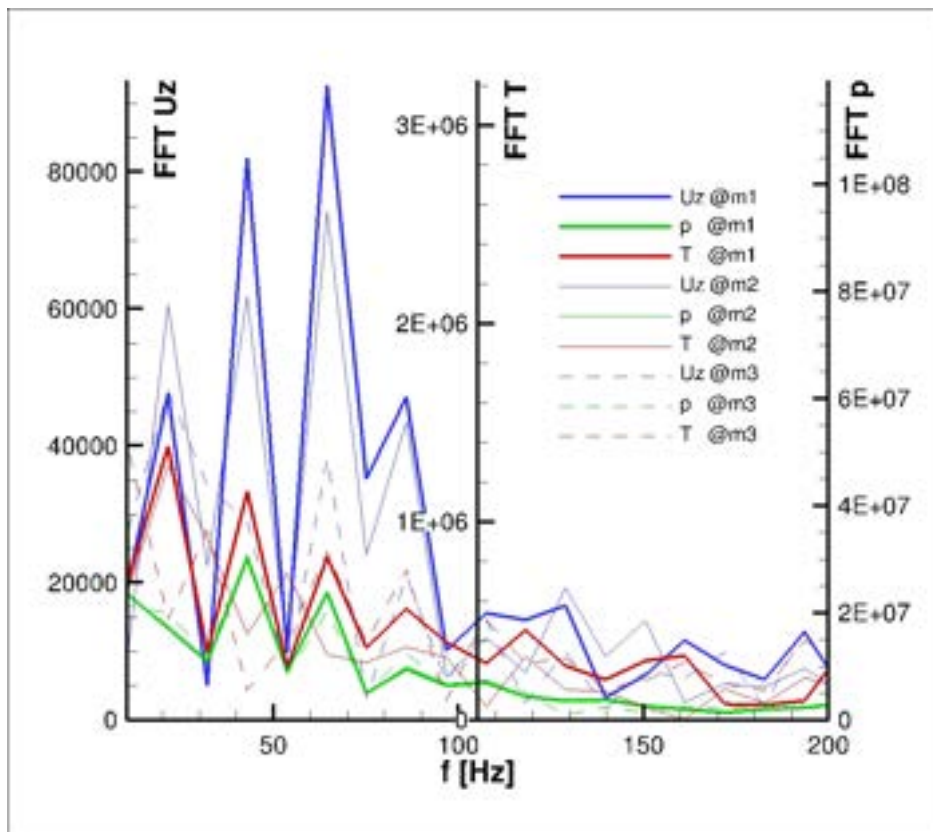


Figura 20. Ampiezze delle trasformate di Fourier dei degnali campionati nei tre punti M1, M2, M3.

### 3 Conclusioni

Il caso test selezionato è molto interessante dal punto di vista applicativo, perché la fiamma premiscelata in esame si colloca nel regime ispessito e corrugato tipico dei combustori operati nelle turbine a gas per la produzione di energia elettrica. L'interesse è intensificato dalla presenza di fenomeni di flashback. Tali fenomeni sono stati colti dalle simulazioni effettuate grazie all'adozione di condizioni al contorno parzialmente non riflessive per l'ingresso. La dinamica del flashback predetta è risultata molto complessa, accompagnata da estinzioni localizzate e anche generalizzate su un'ampia regione del combustore, e con fluttuazioni delle grandezze fluidodinamiche a diverse frequenze nel range 20-100 Hz. Sono state anche identificate fluttuazioni di velocità molto intense, da circa quattro volte (200 m/s) la velocità media di ingresso fino a valori negativi (ritorno di flusso), come osservato negli esperimenti.

### 4 Riferimenti bibliografici

- [1] V. Sabel'nikov, C. Brossard, M. Orain, F. Grisch, M. Barat, A. Ristori, P. Gicquel, "Thermo-Acoustic Instabilities in a Backward-Facing Step Stabilized Lean-Premixed Flame in High Turbulence Flow", 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2008.
- [2] Nagarajan S., Lele S.K., Ferziger J.H., J. Comput. Phys., 191:392-419, 2003.
- [3] Ern, A. and Giovangigli, V., "Fast and accurate multicomponent transport property evaluation", J. Comput. Phys., 120:105-116, 1995.
- [4] Ern A. and Giovangigli V., "Optimized transport algorithms for flame codes". Combustion Science and Technology, 118:387-395, 1996.
- [5] Ern A. and Giovangigli V., "EGLib: A General-Purpose Fortran Library for Multicomponent Transport Property Evaluation". Manual of EGLib version 3.4, 2004.
- [6] Giacomazzi E., Picchia F.R., Arcidiacono N., "A Review on Chemical Diffusion, Criticism and Limits of Simplified Methods for Diffusion Coefficients Calculation", Combustion Theory and Modeling, 12(1):135-158, 2008.
- [7] Giacomazzi E., Bruno C., Favini B., "Fractal Modelling of Turbulent Mixing", Comb. Theory and Mod., 3:637-655, 1999.
- [8] Giacomazzi E., Bruno C., Favini B., "Fractal Modelling of Turbulent Combustion", Comb. Theory and Mod., 4:391-412, 2000.
- [9] Giacomazzi E., Battaglia V., Bruno C., "The Coupling of Turbulence and Chemistry in a Premixed Bluff-Body Flame as Studied by LES", Comb. and Flame, 138(4):320-335, 2004.
- [10] C.K. Westbrook, F.L. Dryer, "Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", Combustion Science and Technology, 27:31-43, 1981
- [11] Rudy D.H. and Strikverda J.C., J. Comput. Phys., 36:55-70, 1981.
- [12] Poinot T.J. and Lele S.K., "Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows", J. Comput. Phys., 101:104-129, 1992.
- [13] Polifke W. and Wall C., "Non-reflecting boundary conditions for acoustic transfer matrix estimation with LES", Center for Turbulence Research, Proceedings of Summer Program, Stanford, 2002.
- [14] Sutherland J.C. and Kennedy C.A., J. Comput. Phys., 191:502-524, 2003.
- [15] Klein M., Sadiki A., Janicka J., "Digital filter based generation of inflow data for spatially developing Direct Numerical or Large Eddy Simulations", J. Comput. Phys., 186:652-665, 2003.