

VALIDAZIONE DI UN MODELLO NUMERICO BIDIMENSIONALE PER LA SIMULAZIONE DELL'INIEZIONE DI VAPORE NEI COMBUSTORI AERONAUTICI

Ernesto Benini, Gianluigi Alberto Misté
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Padova
Via Venezia, 1 – 35131 Padova
E-mail: ernesto.benini@unipd.it

Sommario

In questo lavoro vengono presentati i risultati di una simulazione numerica sulla termofluidodinamica della reazione di combustione tra cherosene e aria, in un combustore aeronautico, in presenza di vapore iniettato in opportune dosi. Lo scopo delle indagini è quello di valutare l'impatto conseguente all'iniezione del vapore sulle prestazioni termodinamiche del combustore. In particolare l'attenzione è qui rivolta ad analizzare sia l'effetto refrigerante provocato dal vapore iniettato sia l'influenza da esso esercitata sul rendimento della combustione.

Introduzione

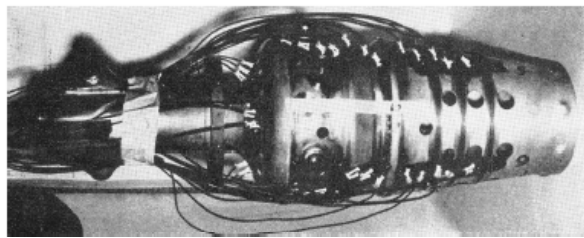
Come ben noto, il raffreddamento delle pareti interne dei combustori aeronautici viene realizzato mediante l'immissione, all'interno della camera di combustione, di un'opportuna quantità d'aria secondaria che, lambendo le superfici del tubo di fiamma, ne determina un efficace isolamento termico [1]. Nei moderni combustori aeronautici non esistono sostanziali varianti a tale approccio, sebbene siano state sperimentate in passato (inizi anni '70) tecniche di raffreddamento a liquido [2-4].

Di recente, presso i ricercatori ed i costruttori di turbine a gas aeronautiche è stata riproposta l'idea di utilizzare, oltre all'aria, anche del vapore acqueo, o più semplicemente dell'acqua demineralizzata finemente atomizzata, al fine di aumentare l'effetto refrigerante e, soprattutto, per contrastare in modo efficace l'insorgenza delle specie inquinanti - in particolare gli ossidi di azoto (NOx) - durante le manovre in aeroporto e le fasi di decollo [5-9]. Tale tecnica è del tutto simile a quella impiegata da tempo nelle turbine a gas industriali, dove l'iniezione di acqua è corren-

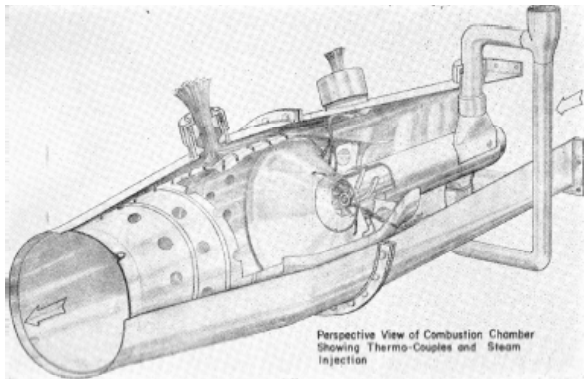
temente utilizzata per aumentare la potenza prodotta e ridurre le emissioni di NOx, specie nelle giornate calde [10,11].

A fronte degli innegabili vantaggi sopra illustrati, l'iniezione d'acqua comporta l'insorgenza di alcune problematiche, in particolare ma non solamente, di natura termodinamica. E' noto infatti che tale pratica comporta in generale una diminuzione del rendimento della combustione [9], complice un effetto inibitore sulla reazione di combustione provocato dall'acqua stessa che, essendo un prodotto della reazione, tende ad assorbire parte dell'energia teoricamente disponibile nei reagenti e, di conseguenza, ad abbassare la temperatura media della miscela gassosa.

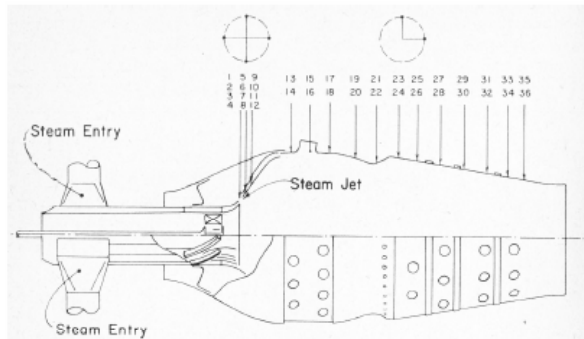
Più precisamente, l'iniezione di vapore rende difficoltosa, se non impossibile, la reazione di ossidazione nelle zone dove i parametri di concentrazione e temperatura della miscela sono ai limiti di infiammabilità. Per tale motivo una scorretta modalità di immissione di vapore in camera di combustione produce una gran quantità di incombusti, abbassando quindi il calore estraibile dal combustibile e aumentando pure la quantità delle sostanze inquinanti. Tuttavia, se si effettua uno studio accurato sull'aerodinamica dei flussi delle specie in gioco, finalizzato a mantenere il flusso di vapore distante dalla zona dove avviene la reazione e bene in adesione alle pareti del combustore, gli effetti negativi vengono ridotti al minimo e quasi annullati. Ciò può essere ottenuto con opportuni metodi di iniezione del vapore, il più semplificato dei quali consiste nell'utilizzo di un flusso elicoidale ad elevata velocità tangenziale (swirl) che, per effetto dell'inerzia centrifuga, viene relegato in una zona periferica rispetto alle zone di reazione, permettendo quindi il raggiungimento di un accettabile rendimento di combustione.



(a)



(b)



(c)

Figura 1: Combustore tubolare Rolls-Royce “Nene”; vista esterna con evidenziate le posizioni delle termocoppie (a), vista in prospettiva in cui sono evidenziate gli ingressi dell’aria primaria e del vapore acqueo (b), sezione della camera di combustione in cui sono evidenziate gli swirler, l’iniettore del combustibile e la posizione delle termocoppie (c).

Gli effetti termofluidodinamici legati all’iniezione di vapore e/o acqua nei combustori aeronautici sono stati studiati per lo più sperimentalmente [2-5,9]. In questo lavoro si vuole affrontare il problema da un punto di vista teorico, simulando numericamente il processo di combustione in un combustore aeronautico di prestazioni e caratteristiche note (il Rolls-Royce “Nene”). L’obiettivo del presente lavoro è quello di mettere a punto e validare, sulla scorta dei dati sperimentali disponibili in letteratura, un modello numerico,

in tal caso bidimensionale, in grado di simulare un processo di combustione, ivi inclusi gli effetti - in prima istanza di carattere termodinamico - legati all’iniezione di vapor d’acqua nella miscela combustibile-comburente, nel combustore Rolls-Royce “Nene”, le cui prestazioni sono state registrate sperimentalmente presso la Laval University in Québec, Canada, da Schlader e Bonneau [12].

L’esperienza di Schlader e Bonneau

Tale prova sperimentale consisteva in uno studio sulle possibilità offerte dall’iniezione di vapore acqueo per il raffreddamento delle pareti interne di un combustore aeronautico tubolare. L’intento dell’esperienza era quindi da una parte quello di quantificare l’effetto utile refrigerante, dall’altra quello di verificare che la variazione del rendimento della combustione e del consumo specifico di combustibile rimanessero entro limiti accettabili. L’apparato sperimentale in dotazione presso il laboratorio dove fu eseguita la prova era costituito dai seguenti componenti:

1. il combustore tubolare Rolls-Royce “Nene” (Figura 1), modificato per permettere l’iniezione di vapore, originariamente non prevista. Esso è composto da un tubo esterno e dal tubo di fiamma, contenuto in posizione concentrica all’interno del primo; il secondo inoltre si presenta forato per permettere la ricircolazione dell’aria in prossimità dell’accensione della miscela aria-combustibile, con lo scopo di stabilizzare la fiamma. Il combustibile viene iniettato tramite un unico ugello posto sull’asse del combustore. Attorno all’iniettore sono disposti l’ingresso dell’aria primaria e l’ugello per l’introduzione del vapore; entrambi sono di forma anulare e caratterizzati dalla presenza di uno “swirler” (ossia un diffusore a vortice), organo statorico in grado di indurre una velocità tangenziale, sempre al fine di facilitare un’opportuna ricircolazione. All’esterno di questi ultimi due vi è infine la zona anulare d’entrata dell’aria di raffreddamento.
2. Gruppo motore General Electric Turbo-Supercharger di tipo B31. Esso è composto da un compressore e da una turbina tali da costituire, assieme al combustore, una macchina termodinamica in grado di seguire il ciclo di Brayton-Joule.

3. Surriscaldatore. Esso assicura la produzione di vapore da iniettare nella camera di combustione.
4. Set di termocoppie Chromel-Alumel, saldate alla superficie esterna sia del tubo di fiamma sia del tubo esterno, con la funzione di rilevare la distribuzione delle temperature internamente al combustore.

Durante l'esperimento sono rilevate le seguenti grandezze:

- portata di massa totale d'aria, m_a , in ingresso alla camera di combustione, misurata tramite opportuni strumenti ad effetto depriogeno;
- portata di massa del combustibile iniettato, m_f , misurata tramite flussometro;
- portata di massa del vapore iniettato, m_v , e relativa temperatura;
- temperatura totale, T_{20} , dell'aria in uscita dal compressore, cioè la medesima temperatura totale dell'aria in ingresso al combustore, fissata durante l'esperimento a 383 K;
- temperatura totale e pressione totale della miscela di gas combusti in uscita dalla camera di combustione, T_{30} e p_{30} ;
- distribuzione delle temperature sulle superfici metalliche del combustore;

La procedura sperimentale seguita dai due ricercatori può in breve essere così esposta: durante l'esperimento, differenti portate di vapore vengono iniettate attraverso l'ugello anulare nella camera di combustione, mentre le velocità di rotazione della turbina e del compressore vengono mantenute costanti a 19.600 giri/min. Nel caso iniziale, corrispondente ad una portata di vapore iniettata nulla, si rileva una temperatura T_{30} pari a 994 K ed una pressione di uscita dal combustore pari a 206.840 Pa. Partendo da questa condizione operativa si effettuano i test aumentando gradualmente la portata di vapore in ingresso fino allo spegnimento della fiamma, rilevato per un rapporto m_v/m_f pari a 4,54. Contemporaneamente, vengono rilevate la temperatura e la pressione totali in uscita dalla camera di combustione, nonché le temperature totali sulle superfici del tubo di fiamma e del tubo esterno. Infine, al variare della portata di vapore iniettato, ven-

gono rilevati il flusso di calore specifico in uscita dalla superficie esterna del tubo di fiamma ed il flusso radiativo specifico dalla fiamma alla superficie interna del tubo di fiamma.

Per evitare una diminuzione del regime di rotazione della turbina, conseguente all'incremento del flusso di vapore, la portata di combustibile, quando necessario, viene aumentata. Per questo motivo la portata di combustibile, a differenza di quella dell'aria, che si può ritenere approssimativamente costante, varia in funzione della quantità di vapore iniettata in camera di combustione.

I risultati sperimentali, in merito ai quali si rimanda a [12], possono essere come di seguito riassunti:

- a) All'aumentare del rapporto m_v/m_f le temperature rilevate palesano un ritardo nell'accensione della miscela, probabilmente dovuto ad una concentrazione di reagenti molto minore rispetto alle condizioni di progetto del combustore. In tali condizioni, si nota anche che la fiamma si sposta verso l'uscita della camera di combustione.
- b) Per quanto riguarda il rendimento della combustione si registra un andamento decrescente in funzione della portata di vapore. Lo spegnimento della fiamma si verifica in corrispondenza del rapporto $m_v/m_f = 4,54$, con portata di vapore $m_v = 0,155$ kg/s ed una temperatura all'uscita del combustore $T_{30} = 844$ K. La principale ragione di questo calo sembra essere il fatto che il flusso di vapore impedisce la combustione dello strato di carburante più esterno.
- c) La combustione risulta stabile fino allo spegnimento, avvenuto non in modo improvviso ma piuttosto come una graduale estinzione della fiamma.
- d) Avendo definito l'effetto refrigerante del flusso di vapore come la riduzione del flusso di calore in uscita dalla superficie esterna del tubo di fiamma rispetto al flusso di calore relativo ad iniezione di vapore nulla, dai risultati emerge come l'effetto refrigerante aumenti all'aumentare del rapporto m_v/m_f , fino ad un valore massimo (corrispondente al caso $m_v/m_f = 2$) e successivamente decresca fino al punto di massima iniezione di vapore, che coincide con il punto di spegnimento della fiamma. Il calo dell'effetto refrigerante con l'aumento della portata di vapore è motivato dai due ri-

cercatori con l'argomentazione che la fiamma potrebbe, all'aumentare della quantità di vapore iniettato, diventare più luminosa, il che intensificherebbe il calore per radiazione emanato dalla fiamma. Questa motivazione sarebbe supportata dalla rilevazione di temperature ben più alte, nella zona di combustione, per rapporti m_v/m_f elevati, ma una spiegazione forse più plausibile di questo fenomeno può essere trovata nell'aumento del coefficiente di convezione. Infatti una massiccia iniezione di vapore può creare elevati gradienti di velocità nel campo fluido, incrementando così la turbolenza e i fenomeni di trasporto di massa. Un continuo rimescolamento delle particelle di tutto il campo fluido confinato nel tubo di fiamma produrrebbe un addolcimento dei gradienti di temperatura nel campo, innalzando però i valori di temperatura nelle zone periferiche. In ogni caso, i risultati dei test confermano come si possano ottenere significative riduzioni di flusso di calore verso le pareti del tubo di fiamma pur mantenendo valori del rendimento della combustione nei limiti dell'accettabilità.

Simulazione numerica della combustione con iniezione di vapore

L'obiettivo della presente indagine è stato quello di replicare fedelmente l'esperimento di Schlader e Bonneau per via numerica, utilizzando un modello matematico del combustore, al fine di valutare l'attendibilità di una formulazione teorica del processo di combustione e, successivamente, di validarne la procedura di simulazione.

Il modello numerico del combustore "Nene" è stato implementato nel programma commerciale Fluent 6.1TM, il quale risolve le equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds utilizzando un approccio numerico ai volumi finiti [13]. Opportune equazioni supplementari consentono di modellare gli effetti legati alla turbolenza del fluido. Ulteriori equazioni sono risolte per tener conto del trasporto delle specie chimiche presenti in forma sia di reagenti sia di prodotti della reazione (equazioni di convezione e diffusione), in cui le velocità di produzione delle specie sono

calcolate sfruttando l'equazione di Arrhenius che regola la cinetica chimica della reazione, ovvero utilizzando le equazioni del miscelamento turbolento di Magnussen e Hjertager [13].

Dato l'elevato impegno di risorse di calcolo stimato per condurre indagini termofluidodinamiche tridimensionali e non stazionarie, le simulazioni sono state effettuate su un dominio di calcolo semplificato, di tipo bidimensionale assialsimmetrico (Figura 2), discretizzato mediante celle triangolari. Per semplicità, le pareti solide del tubo di fiamma sono state ipotizzate di spessore geometrico nullo. Nella risoluzione delle equazioni del moto e della trasmissione del calore, tuttavia, le pareti interne possiedono un preciso spessore e una ben definita conducibilità termica (funzione del materiale delle pareti stesse). Le pareti esterne, invece, sono ipotizzate adiabatiche. Va detto infine che in questa sede, al fine di semplificare le indagini, si è ipotizzato di trascurare l'effetto della radiazione nei bilanci termici.

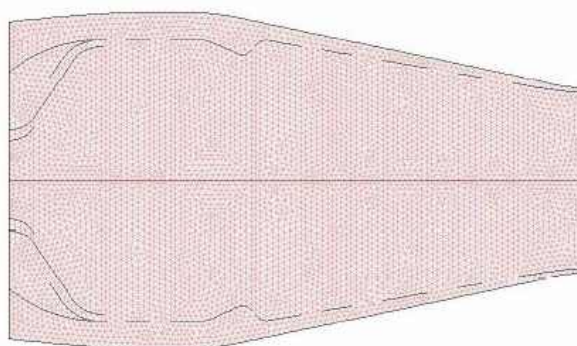


Figura 2: Dominio e griglia di calcolo del combustore tubolare Rolls-Royce "Nene".

Le specie chimiche reagenti sono aria e cherosene, entrambe considerate alla stregua di gas ideali a calori specifici caratteristici costanti. Un'ulteriore specie presente è ovviamente il vapore d'acqua, anch'esso trattato come un gas ideale. Le condizioni al contorno assegnate nel modello numerico riproducono esattamente quelle utilizzate durante la prova sperimentale.

Le simulazioni numeriche sono state condotte in regime non stazionario e utilizzando la seguente procedura: dapprima si è provveduto ad effettuare una simulazione del deflusso senza far intervenire la reazione chimica; successivamente, previa inizializzazione locale ("patch") della temperatura di fiamma, si è incorporato nella simula-

zione il modello di reazione “finite rate – eddy dissipation” [13]. Quindi si è proceduto con l’analisi della combustione nel tempo, utilizzando un intervallo di discretizzazione temporale (“time-step”) pari a 0,0001 secondi ed un criterio di convergenza che limita il valore mediato e normalizzato dei residui delle equazioni ad un massimo di 10^{-4} .

Risultati delle simulazioni

Sono state eseguite cinque simulazioni, ciascuna con differente valore del rapporto m_v/m_f e corrispondente ai valori 0, 1, 2, 3 e 4. Di seguito sono mostrati e analizzati i risultati ottenuti in termini di campi scalari di pressione, temperatura, velocità e concentrazione di vapore, nonché di campi vettoriali relativi alla velocità.

Concentrazione di vapore acqueo. Le prime osservazioni fondamentali riguardano il cambiamento del campo delle concentrazioni di vapore nel combustore, espresse come rapporto tra la portata di vapore locale e la portata di vapore iniettata: si rileva infatti come, all’aumentare del rapporto m_v/m_f , la concentrazione di vapore interessi via via tutto il campo di moto interno al tubo di fiamma (Figura 3).

Temperatura. Il parametro più significativo è costituito dal campo delle temperature statiche assolute, che viene visualizzato per i vari casi nella Figura 4. Come è prevedibile, il campo delle temperature tende ad assumere valori inferiori all’aumentare della portata di vapore iniettata; inoltre la zona dei prodotti caldi tende ad essere confinata a distanze maggiori dalle pareti del tubo di fiamma (si osservi peraltro che le scale di temperatura variano da figura a figura). Come si può vedere dalla Tabella 1, lo stesso avviene anche per le temperature totali in uscita dal combustore, valutate come media pesata sulla portata di massa delle temperature totali presenti sulla sezione d’uscita. Questo avviene principalmente per i due motivi esposti precedentemente, ossia l’assorbimento di energia da parte del vapore, il quale presenta in aggiunta un calore specifico ben maggiore di quello dell’aria, nonché l’effetto inibitore sulla reazione di combustione provocato dal cambia-

mento di concentrazione dei reagenti nelle zone limite di infiammabilità. Quest’ultimo fattore è, di fatto, il principale responsabile del calo di rendimento della combustione. Come ci si attende, infatti, non essendo la camera di combustione in esame propriamente concepita per l’iniezione di vapore, quest’ultimo viene lasciato miscelarsi con i reagenti aumentando quindi la concentrazione di incombusti nella sezione di uscita. Come si può notare dal grafico di Figura 5, il rendimento della combustione diminuisce in modo più che lineare con portate crescenti di vapore.

Un fatto rilevante è poi l’andamento delle temperature in prossimità del tubo di fiamma; esso non varia considerevolmente con l’aumento della portata di vapore proprio in virtù del fatto che già il caso ad iniezione di vapore nulla presenta temperature relativamente basse, molto prossime alla temperatura dell’aria in ingresso alla camera di combustione. Dai dati delle simulazioni sembra che non vi siano particolari problemi connessi a valori eccessivi della temperatura sulla superficie del tubo di fiamma perché la zona di combustione è ben distante dalle pareti. Tuttavia occorre ribadire che il modello utilizzato non prevede gli effetti dovuti al calore scambiato per radiazione; infatti, avendo l’aria un coefficiente di assorbimento molto basso, sulle pareti del tubo di fiamma probabilmente lo scambio di calore dovuto all’energia radiante potrebbe essere rilevante.

Va osservato infine che la zona in cui è più evidente l’effetto refrigerante del vapore acqueo è localizzata in prossimità della testa del combustore (laddove il combustibile viene iniettato).

Pressione. Nei combustori si cerca solitamente di mantenere la pressione attorno ad un valore costante, perciò ci si attende che essa non cambi in maniera significativa al variare della portata di vapore. Così infatti avviene, e per questo motivo non si rilevano evidenti differenze nel campo delle pressioni tra i diversi casi. Si nota che, in tutti i casi, si ha un calo di pressione verso lo scarico del combustore dovuto principalmente all’accelerazione del flusso conseguente ad una diminuzione di sezione.

Le zone a maggiore pressione si trovano in prossimità del condotto anulare che raffredda il cono iniziale del tubo di fiamma; vi è infatti qui una zona di ristagno determinata dalla particolare geometria del combustore (Figura 6).

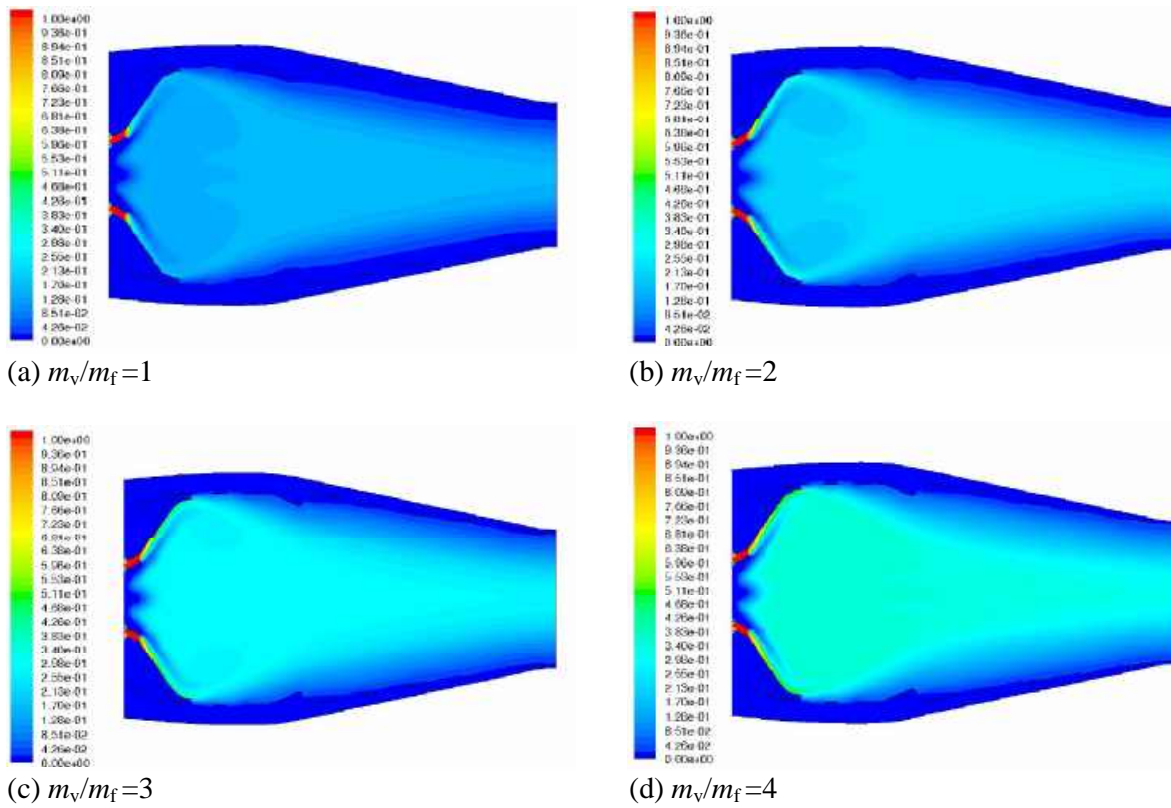


Figura 3: Campo delle concentrazioni di vapore acqueo al variare del rapporto portata di vapore/portata di combustibile.

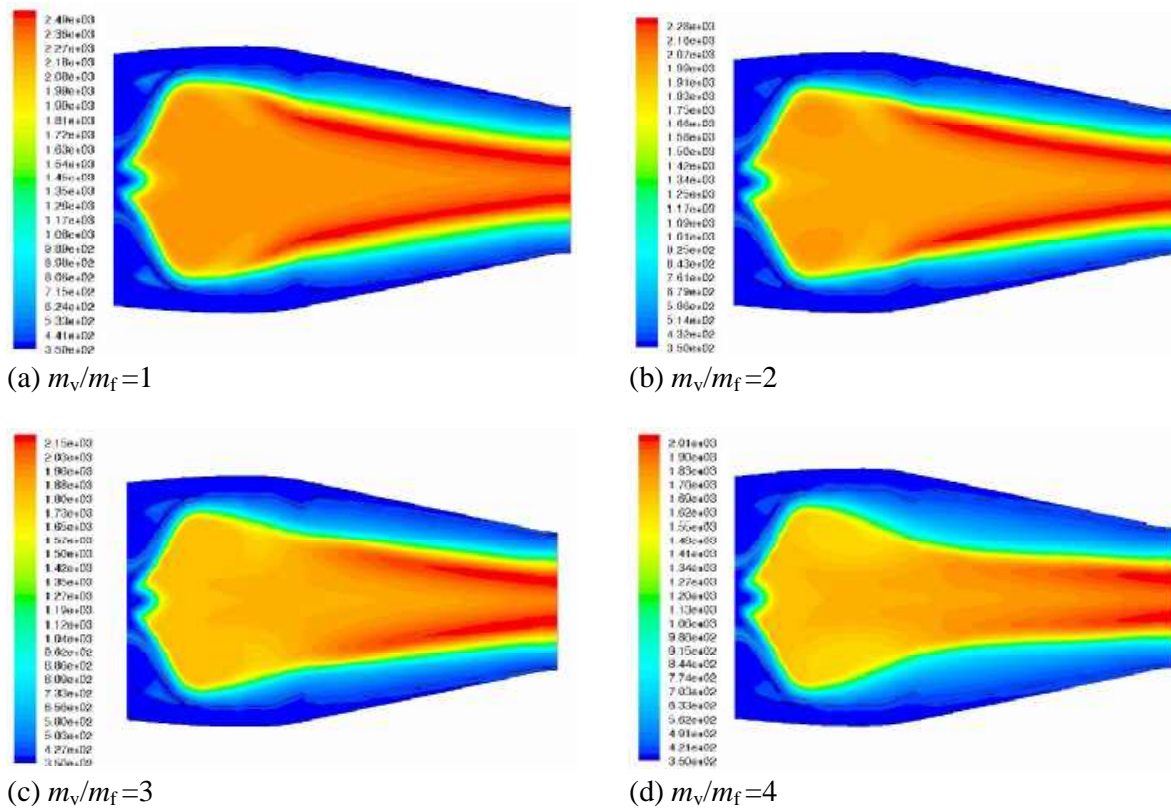


Figura 4: Campo delle temperature assolute [K] al variare del rapporto portata di vapore/portata di combustibile.

m_v/m_f	0	1	2	3	4
T_{03} [K]	945	908	901	842	744

Tabella 1: Valori della temperatura totale in uscita dal combustore per differenti rapporti m_v/m_f .

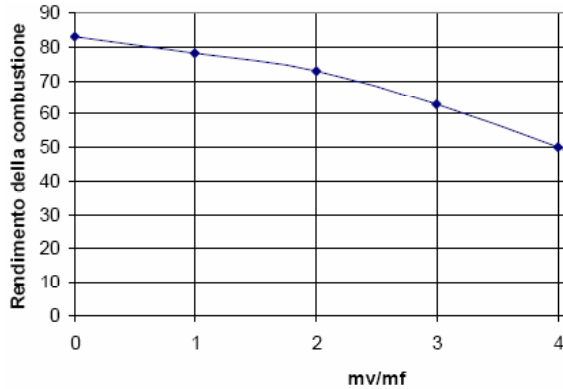


Figura 5: Valori percentuali del rendimento di combustione corrispondenti ai differenti rapporti m_v/m_f .

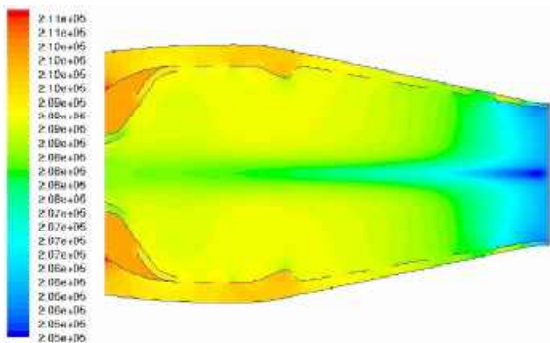


Figura 6: Campo della pressione statica [Pa] per $m_v/m_f=1$.

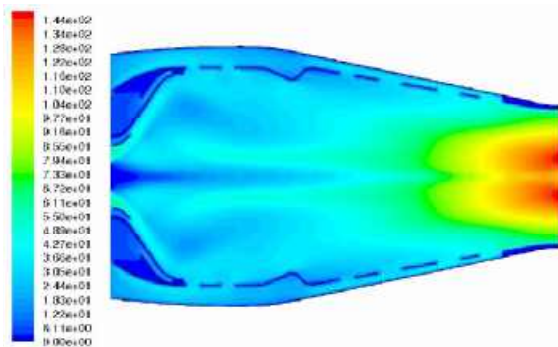


Figura 7: Campo del modulo della velocità [m/s] per $m_v/m_f=1$.

Velocità. Per quanto riguarda il campo del modulo delle velocità vale un discorso analogo al precedente: non vi sono evidenti variazioni tra un caso e l'altro. Quello che risulta

interessante osservare, invece, è come varino le linee di corrente (Figura 8) e il campo vettoriale delle velocità (Figura 9) in funzione della portata iniettata di vapore; non vi sono grosse differenze tra casi adiacenti, quindi si è ritenuto opportuno mostrare quali siano le differenze che intercorrono tra i casi estremi. L'iniezione di vapore determina un ampliamento della zona di ricircolo del fluido e provoca uno "schiacciamento" dei vortici e delle linee di corrente del flusso primario. Questo è dovuto sia al fatto che la portata di massa totale è aumentata, sia – ed in modo anche più rilevante – al fatto che pure il vapore possiede un'importante componente di velocità tangenziale. Come è noto, la ricircolazione nella zona primaria è un fenomeno che viene intensificato dall'aumento della deflessione tangenziale indotta dalle palette dello swirler.

Confronto tra previsioni teoriche e risultati sperimentali

I valori del rendimento della combustione desunti dalle simulazioni, e presentati in Figura 5, risultano sottostimati rispetto a quelli determinati sperimentalmente da Schlader e Bonneau. Questo dipende da almeno due fattori:

- i) nella simulazione numerica la reazione chimica di combustione è stata semplificata, riducendo il numero dei prodotti della reazione stessa, ossia non sono state considerate specie quali ossidi di azoto (NO_x) e monossido di carbonio (CO);
- ii) nella simulazione numerica il combustore è stato modellato utilizzando una geometria bidimensionale assialsimmetrica, trattando perciò i fori per il raffreddamento come delle luci anulari, disposte attorno a tutto il perimetro del tubo di fiamma. Ciò produce, rispetto al caso reale, un incremento della portata d'aria di raffreddamento in entrata all'interno del tubo di fiamma, il che determina verosimilmente un aumento della velocità nelle zone di combustione ed un maggior effetto refrigerante. Questo stesso fatto potrebbe essere il motivo alla base del diverso andamento delle temperature calcolate lungo la superficie interna del tubo di fiamma rispetto al caso sperimentale, unito alla mancanza di un'adeguata modellazione del flusso di calore per radiazione, grandezza che Schlader e

Bonneau hanno trovato essere non trascurabile.

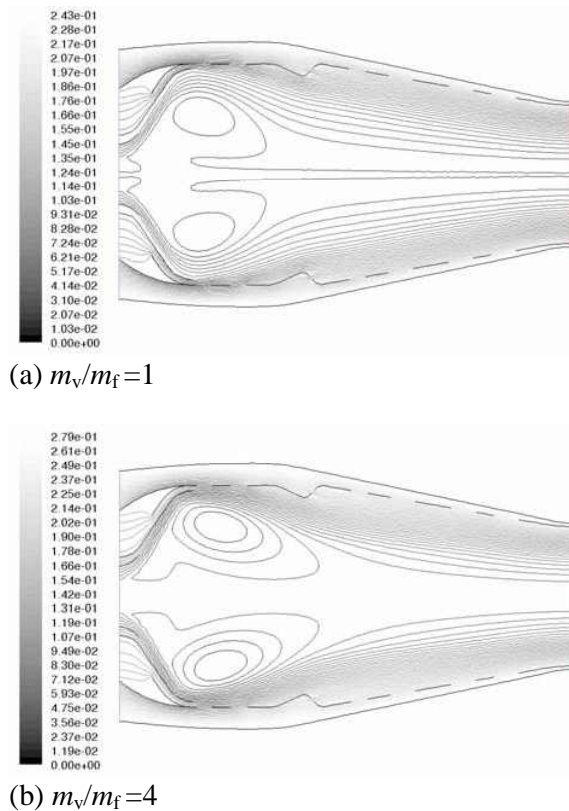


Figura 8: Linee di corrente nel combustore al variare del rapporto m_v/m_f .

I risultati delle simulazioni confermano quanto derivato sperimentalmente per quanto riguarda l'effetto refrigerante del vapore: in termini comparativi esso risulta particolarmente evidente per basse portate di vapore iniettato, mentre alle alte portate l'iniezione perde di efficacia, e questo è anche dovuto al fatto che, nel combustore analizzato, non vi è un sistema di iniezione di vapore progettato ad hoc; di fatto il vapore si miscela con i reagenti e provoca un abbassamento del rendimento di combustione.

Le simulazioni effettuate smentiscono peraltro l'affermazione di Schlader e Bonneau secondo cui il vapore non si miscela con i reagenti nella zona primaria: si può constatare come la concentrazione di vapore nella zona di ricircolo risulti già doppia per il caso $m_v/m_f=1$ rispetto al caso di iniezione nulla; inoltre, per un rapporto m_v/m_f pari a 4 si ha una concentrazione più di cinque volte superiore.

Questo fatto dà addito ad alcuni dubbi circa il metodo con cui i due ricercatori canadesi hanno misurato le temperature totali e ricavato il rendimento di combustione.

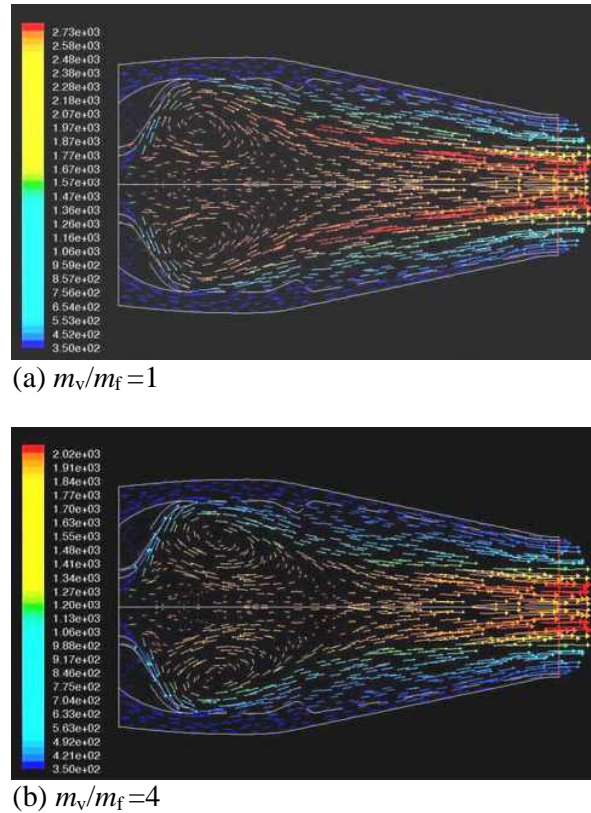


Figura 9: Campo vettoriale delle velocità assiali nel combustore al variare del rapporto m_v/m_f . Il colore dei vettori corrisponde alla temperatura assoluta [K].

Conclusioni

In questo studio è stata effettuata un'indagine numerica volta alla messa a punto di un modello matematico per lo studio dell'iniezione di vapore nei combustori aeronautici.

I risultati delle simulazioni confermano il sostanziale positivo effetto dell'iniezione di vapore sull'effetto refrigerante; tuttavia, viene ribadita anche l'influenza negativa che questa pratica provoca sul rendimento di combustione. In buona sostanza, per essere efficace e non produrre effetti indesiderati, l'iniezione di vapore in camera di combustione deve essere implementata avendo cura di circoscrivere l'effetto del vapore nella zona periferica delle pareti del tubo di fiamma.

La prosecuzione naturale di questo studio è sicuramente lo sviluppo dell'analisi su un domi-

nio di calcolo tridimensionale, includendo inoltre l'effetto della radiazione termica, e perciò lo studio completo dell'impatto provocato dall'iniezione di vapore non solo sul raffreddamento delle pareti ma anche sulla produzione di specie chimiche indesiderate. In relazione a questo, sarà di fondamentale importanza la ricerca dei parametri ottimali di iniezione, al fine di controllare la temperatura massima della fiamma senza nuocere al rendimento della combustione. L'aumento della temperatura, infatti, causato dalla presenza di condizioni lontane da quelle di volo (alta temperatura in ingresso, portate d'aria inusuali, ecc.), è in stretta relazione con l'incremento della produzione di NOx nella reazione di combustione.

Bibliografia

- [1] Benini E., "Propulsione Aerea", Cleup, 2005.
- [2] Ingebo R.D., Norgren C.T., "Effect of Primary-Zone Water Injection on Pollutants from a Combustor Burning Liquid ASTM A-1 and Vaporized Propane Fuels", NASA Technical Report TN D-7293, 1973.
- [3] Marchionna N.R., Diehl L.A., Trout A.M., "The Effect of Water Injection on Nitric Oxide Emissions of a Gas Turbine Combustor Burning ASTM Jet-A Fuel", NASA Technical Memorandum X-2958, 1973.
- [4] Hilt M.B., Johnson R.H., "Nitric Oxide Abatement in Heavy Duty Gas Turbine Combustors by Means of Aerodynamics and Water Injection", ASME Paper 72-GT-53, 1972.
- [5] Daggett D.L., "Water Misting and Injection of Commercial Aircraft Engines to Reduce Airport NOx", NASA/CR—2004-212957, 2004.
- [6] AA. VV., "Controlling Airport-Related Air Pollution", Northeast States for Coordinated Air Use Management and Center for Clean Air Policy, 2003.
- [7] AA. VV., "Aviation and the Environment, Strategic Framework Needed to Address Challenges Posed by Aircraft Emissions", GAO Report GAO-03-252, 2003.
- [8] AA. VV., "Northeast States for Coordinated Air Use Management and Center for Clean Air Policy, Controlling Airport-Related Air Pollution, 2003.
- [9] Balepin V., Ossello C., Snyder C., "NOx Emission Reduction in Commercial Jets through Water Injection", AIAA Paper 2002-3623, 2002.
- [10] Saravanamuttoo H.I.H., Rogers G.F.C, Cohen H., "Gas Turbine Theory", Pearson-Prentice Hall, 5th Edition, 2001.
- [11] Lefebvre A.H., "Gas turbine combustion", 2nd Edition, Taylor & Francis, 1999.
- [12] Smith I. E. et al., "Combustion in advanced gas turbine systems", Pergamon Press, Cranfield International symposium series, Vol. 10, 1968.
- [13] "FLUENT 6.1 User's Guide", 2003.