



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



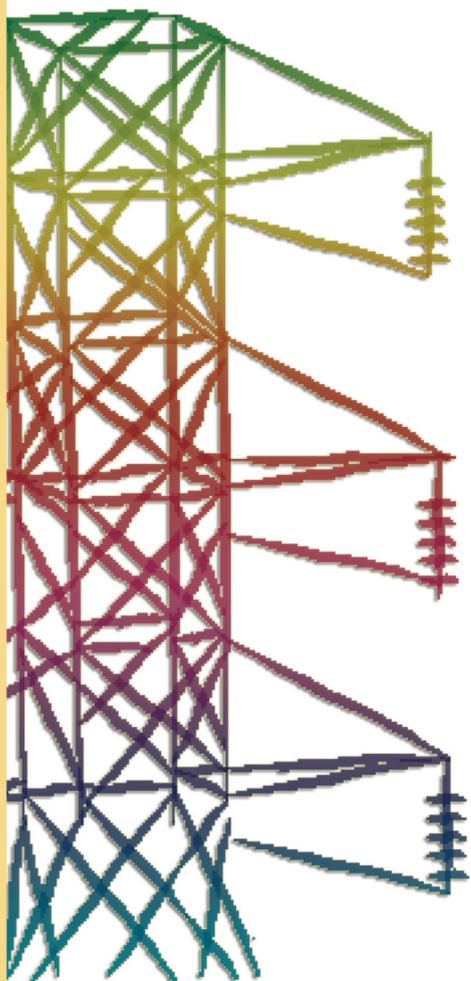
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

**Analisi fluidodinamica del downcomer di IRIS,  
implementazione di modelli di turbolenza e messa a punto  
di protocolli di accuratezza per analisi CFD**

**E. Colombo, F. Inzoli, M. Ricotti, R. Mereu**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Analisi fluidodinamica del downcomer di IRIS, implementazione di modelli di turbolenza e messa a punto di protocolli di accuratezza per analisi CFD

*E. Colombo, F. Inzoli, M. Ricotti, R. Mereu*



ANALISI FLUIDODINAMICA DEL DOWNCOMER DI IRIS, IMPLEMENTAZIONE DI MODELLI DI TURBOLENZA E MESSA A PUNTO DI PROTOCOLLI DI ACCURATEZZA PER ANALISI CFD

E. Colombo, F. Inzoli, M. Ricotti, R. Mereu (CIRTEN)

Giugno 2008

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA



**CIRTEN**  
**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO**  
**PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE**

**POLITECNICO DI MILANO**  
**DIPARTIMENTO DI ENERGIA**

**ANALISI FLUIDODINAMICA DEL DOWNCOMER DI IRIS,  
IMPLEMENTAZIONE DI MODELLI DI TURBOLENZA E MESSA A  
PUNTO DI PROTOCOLLI DI ACCURATEZZA PER ANALISI CFD**

Emanuela Colombo, Fabio Inzoli, Marco Ricotti,  
Riccardo Mereu

**CERSE-POLIMI RL-1122/2008**

**Milano, Giugno 2008**

*Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2– punto N “Simulazioni del miscelamento e pre-test su downcomer IRIS” dell’AdP ENEA MSE del 21/06/07,  
Tema 5.2.5.8 – “Nuovo Nucleare da Fissione”*



## SOMMARIO

Obiettivi del documento .....	- 3 -
1 Introduzione alla CFD .....	- 4 -
1.1 La CFD come strumento di ricerca e sviluppo .....	- 4 -
1.1.1 Le specificità della Ricerca e Sviluppo .....	- 4 -
1.1.2 L'approccio numerico .....	- 5 -
1.2 CFD Vincoli e Potenzialità .....	- 5 -
2 L'affidabilità nella CFD .....	- 6 -
2.1 La qualità come strumento di controllo .....	- 6 -
2.2 I principi della Qualità nella Ricerca e Sviluppo .....	- 7 -
2.2.1 La Qualità e la CFD .....	- 7 -
3 Obiettivi specifici .....	- 8 -
3.1 Sviluppo di Modelli di turbolenza .....	- 9 -
3.2 Supporto al design del Downcomer e Del Lower plenum Di IRIS .....	- 9 -
3.3 Definizione di protocolli per l'accuratezza nella CFD .....	- 9 -
4 Risultati Ottenuti .....	- 10 -
4.1 Sviluppo di Modelli di turbolenza .....	- 10 -
4.1.1 Ricerca in progress: implementazione di modelli non lineari di turbolenza .....	- 11 -
4.1.2 Tesi di laurea specialistica .....	- 14 -
4.1.3 Pubblicazioni Scientifiche .....	- 14 -
4.2 Supporto al design del Downcomer e Del Lower plenum Di IRIS .....	- 14 -
4.2.1 Ricerche completate: Mixing del reattore nucleare IRIS .....	- 15 -
Analisi stazionaria .....	- 17 -
Analisi in transitorio .....	- 19 -
4.2.2 Tesi di Laurea: Modellazione CFD e Ottimizzazione geometrica per il downcomer .....	- 51 -
4.3 Definizione di protocolli per l'accuratezza nella CFD .....	- 51 -
4.3.1 Ricerca in progress: la sfida della Qualità nella CFD .....	- 51 -
Competenza degli analisti .....	- 53 -
4.3.2 Ricerca in progress: Il controllo del processo: errori e incertezze .....	- 53 -
4.3.3 Ricerca in progress: protocolli di gestione del progetto .....	- 56 -
4.3.4 Pubblicazioni Scientifiche .....	- 63 -



## OBIETTIVI DEL DOCUMENTO

Tale documento è da intendersi come un complemento alla cartella elettronica che rappresenta la raccolta riassuntiva dell'attività del periodo 2007-2008 svolta dal Gruppo CFDLab del Politecnico di Milano. Il livello di descrizione delle attività rimane alto e non dettaglia gli specifici eventi e /o le singole azioni portate avanti nel periodo in esame. Alcuni riferimenti ipertestuali e/o bibliografici corredano il documento con un descrittivo analitico di dettaglio.

*L'analisi CFD non è un processo lineare  
(e non solo perché prende forma da equazioni differenziali non lineari)  
che, a valle di una sequenza di operazioni logiche ben organizzate,  
è in grado di fornirci risultati di validità indiscussa,  
centrando il bersaglio come un esperto arciere  
ma è un lungo processo a spirale che, ad ogni passaggio,  
sempre più si avvicina ad un suo centro  
che rappresenta la minima distanza raggiungibile,  
con questo arco, dalla reale meta,  
talvolta stupendoci per la vicinanza raggiunta.*

E.C.



## **ANALISI FLUIDODINAMICA DEL DOWNCOMER DI IRIS, IMPLEMENTAZIONE DI MODELLI DI TURBOLENZA E MESSA A PUNTO DI PROTOCOLLI DI ACCURATEZZA PER LA CFD.**

### **1 INTRODUZIONE ALLA CFD**

Dalla sua iniziale comparsa nella seconda metà dello secolo scorso la fluidodinamica computazionale (CFD) ha seguito il percorso evolutivo tipico di molte delle moderne tecnologie. Infatti tale metodologia di ricerca è stata inizialmente oggetto di indagine e sviluppo in ambito accademico e solo verso la fine degli anni '70, quando si sono presentate le opportunità per un suo impiego in ambito industriale, si sono resi disponibili i primi investimenti per proporre al mercato prodotti di interesse commerciale. Dai gruppi di ricerca accademici inglesi, particolarmente attiva la scuola dell'Imperial College di Londra, e statunitensi, sono sorti spin-off industriali che hanno consentito alla CFD di concorrere ad una quota di mercato nel settore della progettazione assistita (Computer Aided Engineering o CAE) in modo sempre più marcato.

#### **1.1 LA CFD COME STRUMENTO DI RICERCA E SVILUPPO**

La storia della CFD permette di comprendere l'evoluzione di questo ramo della fluidodinamica e della meccanica dei fluidi, nato quasi come speculazione matematica e diventato nel tempo uno strumento ingegneristico (in senso metodologico) sempre più richiesto e utilizzato nel settore della ricerca tanto a livello delle investigazioni di base, per la comprensione dei fenomeni e delle leggi della natura, quanto a livello degli studi per le applicazioni della ricerca, volti alla progettazione e allo sviluppo di nuovi prodotti o processi e tesi all'innovazione, spesso interpretata come il motore dello sviluppo economico, culturale e sociale di un paese o di un area regionale.

##### **1.1.1 Le specificità della Ricerca e Sviluppo**

La Ricerca e Sviluppo è un area di interesse che coinvolge in primo luogo l'intero complesso del mondo accademico, universitario e dei centri di ricerca e in secondo luogo non può essere indifferente, in particolare in un mercato competitivo, al mondo industriale.

I due aspetti su cui fa perno la caratterizzano sostanzialmente e la differenziano dagli altri settori di interesse industriale come la Produzione e il Marketing. Quando si parla di R&D (dall'acronimo inglese Research and Development), la parte di ricerca rappresenta un'investigazione scientifica mirata a scoprire e conseguentemente applicare nuovi fatti, tecniche o leggi della natura. La Ricerca ha come obiettivo dare evasione a domande ancora senza risposta e gli attori della ricerca sono molteplici: dalle università ai centri di ricerca nazionali o sopranazionali, ai dipartimenti di alcune aziende multinazionali o locali, ciascuna con un proprio stile e una serie di obiettivi che possono differire in modo significativo tra loro.

La parte di Sviluppo è invece l'aspetto più legato alla finalizzazione del lavoro di ricerca legato all'individuazione di nuovi processi, nuovi prodotti o alla creazione di pratiche soluzioni per il mercato economico.

Se fino a qualche anno orsono le implicazioni della ricerca erano un interesse quasi esclusivo del settore industriale, oggi l'evoluzione del mondo accademico, l'introduzione di criteri per la valutazione delle prestazioni di singoli e dipartimenti, una certa logica dell'autosostenibilità economica delle ricerche da intraprendere, hanno portato anche il mondo accademico a sviluppare competenze in questo aspetto, tanto che il numero di brevetti e di applicazioni di origine universitaria inseriti nel mercato è andato negli ultimi anni crescendo.

La combinazione dei due settori Ricerca e Sviluppo è dunque il contesto ove le organizzazioni di ricerca, le imprese e le università operano per trovare e scoprire nuovi o migliori processi, per innovare prodotti e per introdurli nel mercato economico a beneficio della collettività.

Come via di mezzo tra creatività e razionalità, la ricerca si presenta sovente fuori da tutti gli schemi routinari e definire per esso criteri e standard, protocolli o procedure, metodi di gestione e di controllo presenta inevitabilmente difficoltà non trascurabili.

Quando nel campo della R&D ci si occupa dei metodi di analisi: teorico, sperimentale e numerico, la complessità cresce in quanto si aggiungono anche gli aspetti legati alla natura stessa dei metodi investigativi.



In particolare la CFD, con i suoi errori e le sue incertezze naturalmente incluse nella genetica del metodo e i fattori umani sempre in agguato, si presenta come un campo particolarmente complesso per implementare un processo di definizione di uno standard applicabile universalmente, in grado di assicurare la qualità e l'affidabilità dei risultati ottenuti.

Tuttavia, in ogni complessità vi è implicita una sfida che, con la mentalità tipica della Ricerca e dello Sviluppo è un piacere poter cogliere e non può essere lasciata inesplorata.

### 1.1.2 L'approccio numerico

Le applicazioni della fluidodinamica computazionale sono numerose e si differenziano in molti settori di applicazione.

La CFD può essere interpretata come la "scienza" che, mediante la risoluzione numerica delle equazioni caratteristiche della fluidodinamica (i bilanci di conservazione), è destinata a predire il comportamento dei fluidi: campi di velocità e pressione, scambio termico, scambio di massa, reazioni chimiche...

I risultati dell'analisi CFD rappresentano un insieme di dati che devono essere utilizzati per studi teorici su nuove configurazioni, per lo sviluppo di nuovi prodotti, per le investigazioni dei possibili eventi accidentali o delle cause di malfunzionamento o per l'innovazione di prodotti esistenti.

Quando i dati provenienti dall'analisi CFD riescono a rappresentare questo insieme coerente e affidabile di informazioni, l'analisi CFD diventa un valido supporto alle analisi sperimentali e ai test di prototipazione, riducendo notevolmente gli sforzi e l'impiego di risorse necessarie nei laboratori, ottimizzando il processo con la riduzione di costi e tempi. Garantire tale costruito formale di coerenza non è un cammino semplice e richiede l'applicazione di un sistema di regole e di buone prassi che solo l'esperienza, l'interazione con altri settori e una buona dose di umiltà consapevole, possono aiutare l'analista a giudicare i risultati delle elaborazioni numeriche e, adeguatamente miscelati con metodi e protocolli, essere in grado di accrescere il livello di qualità e di affidabilità dello strumento CFD.

## 1.2 CFD VINCOLI E POTENZIALITÀ

Le potenzialità della CFD sono virtualmente illimitate, dato il costante aumento dell'efficienza e della velocità del calcolo, lo sviluppo continuo di nuovi algoritmi e procedure, e il progredire delle conoscenze in ogni settore. Non esiste problema termofluidodinamico di cui non si possa prevedere la possibilità di approccio e soluzione entro un ragionevole numero di anni, come evidenziato dall'elenco delle applicazioni già oggi possibili.

I limiti attuali della CFD corrispondono (con qualche ragionevole ritardo) ai limiti della modellazione fisica in ciascuno dei singoli domini applicativi e scientifici di pertinenza della termofluidodinamica. Sino ad qualche anno fa' la limitazione era sostanzialmente la disponibilità di risorse di calcolo. L'avvento delle tecnologie di calcolo parallelo, l'utilizzo di risorse "clusterizzate" a costi contenuti e lo sviluppo di hardware con prestazioni sempre più elevate ha spostato il "collo di bottiglia" dell'utilizzo della CFD alla accuratezza dei modelli necessari per trattare le problematiche caratterizzate da una fisica molto complessa.

I principali pregi dei software CFD sono comunque da ricercare nella semplicità di approccio, che consente una relativa immediatezza nell'attivazione del lavoro, e nella possibilità di uso su piattaforme diverse, inclusi i PC, con possibilità di training autonomo. Altri vantaggi sono stati raggiunti proprio in virtù della caratterizzazione commerciale di questi prodotti: la robustezza (quindi facilità di convergenza), la disponibilità immediata di opzioni alternative (tipologia di griglia, solutore, discretizzazione, modello di turbolenza), la disponibilità di conoscenza di acquisizione recente (nuovi modelli di turbolenza, modelli reologici, etc.).

I vantaggi illustrati rappresentano spesso anche i principali difetti comuni a molti dei prodotti software commerciali. Si può affermare che è presente un naturale eccesso di offerta di opzione, che tende a generare confusione ed incertezza negli utenti inesperti, e non è mai percepito come sufficiente da parte degli operatori "scientifici".

La eccessiva facilità di convergenza (falso senso di sicurezza) dovuta alla robustezza degli algoritmi e dei solver fa dimenticare che il risultato, costituito da una serie di numeri, non necessariamente rappresenta il comportamento del sistema reale che si vorrebbe studiare. La disponibilità di moli enormi di dati, con la necessità di sapere gestire graficamente i dati stessi, li rende spesso inutili.



La manualistica è di solito desolatamente carente: si indica il “come”, quasi mai si giustifica il “perché” e lo spazio per l’informazione scientifica è tendenzialmente molto ridotto. La documentazione scientifica si riduce sostanzialmente a poche istruzioni e a modesti elementi introduttivi al tema; spesso vengono forniti pochi riferimenti bibliografici.

Cresce quindi la potenza di calcolo e la varietà dei problemi affrontati, ma decresce la capacità autonoma di comprensione da parte dell’utente.

## **2 L’AFFIDABILITÀ NELLA CFD**

La Qualità, come impostazione metodologica risulta essere un insieme di strumenti di controllo in grado di garantire, attraverso l’applicazione di protocolli adeguati e di metodi di gestione il raggiungimento di standard elevati, riproducibili e tracciabili.

Piuttosto complessa risulta l’implementazione della Qualità nel campo della Ricerca ove la creatività e la razionalità, gli aspetti non deterministici e le richieste deterministiche, i dettagli analitici e le visioni d’insieme si fondono e si devono fondere in un complesso sistemico (a volte per sua natura necessariamente destrutturato) che deve essere in grado di accompagnare le menti del ricercatore dalla fase di intuizione (creativa, non deterministica e spesso specialistica) a quella di conferma (razionale, deterministica e più sistemica).

Tuttavia, anche nel campo della ricerca la Qualità si trova ad essere focalizzata sui risultati del processo, al fine di incrementarne e garantirne l’affidabilità.

Questo aspetto, tanto importante nella ricerca di base, ove permette di evitare che teorie non sufficientemente validate prendano piede, è ancora più importante nella ricerca applicata dove il risultato dell’operato è destinato a diventare propedeutico per la realizzazione di prototipi o di prodotti per l’innovazione industriale.

La CFD, come area di ricerca e sviluppo, che inevitabilmente coinvolge errori e incertezze legate all’aspetto geometrico, numerico, modellistico o ai fattori umani del processo di analisi richiede, per accrescere l’affidabilità dei propri risultati, l’applicazione di standard adeguati.

Tale necessità, implicita proprio nella natura virtuale della CFD si è resa sempre più palese negli ultimi anni, grazie all’enorme sviluppo della potenzialità dello strumento (software, hardware e competenze) utilizzato ormai con discreto successo nel mondo industriale e accademico.

Ad oggi, la definizione di standard adeguati per l’affidabilità e la misurabilità dei risultati, la messa a punto di criteri per il confronto con i dati sperimentali e per un affidabile impiego dei risultati numerici al fine di favorirne un eventuale impiego applicativo costituisce ramo in pieno fervore di ricerca a livello internazionale e un settore stimolante per le numerose implicazioni di natura multidisciplinare.

### **2.1 LA QUALITÀ COME STRUMENTO DI CONTROLLO.**

La definizione di Qualità come il più elevato livello o grado di eccellenza che deve e può essere raggiunto tanto nella fase meramente tecnica di un progetto (output) quanto in tutte le applicazioni o le implicazioni di varia natura eventualmente derivanti dal progetto stesso (outcome) è senza dubbio l’idea che più si adatta al settore della ricerca e dello sviluppo e si presenta come particolarmente idonea per essere intergrata nel processo di analisi CFD.

In modo analogo, una serie di opportuni indicatori di valutazione, interna ed esterna sono richiesti per monitorare il valore globale della ricerca. I criteri interni sono sostanzialmente criteri di efficienza e di produttività (quando bene è stata condotta la ricerca), sono criteri condivisi in quanto adeguati per qualunque tipologia di progetto nel settore R&D. I criteri esterni sono invece indicatori di utilità; devono misurare il valore del progetto e sono in grado di giudicare le motivazioni che sottendono la ricerca stessa ma che possono essere differenti secondo il committente (università, imprese, organizzazioni di ricerca) e non sono pertanto facili da individuare in modo univoco.



## 2.2 I PRINCIPI DELLA QUALITÀ NELLA RICERCA E SVILUPPO

La definizione stessa della Qualità è dunque contestuale e, quando inserita in un contesto di Ricerca e Sviluppo, diviene di più difficile interpretazione. Tale settore è infatti costituito principalmente da attività che sono difficilmente misurabili: solo alcune possono essere quantificate in modo diretto (ad esempio i costi) mentre per le altre è quasi impossibile poter misurare il valore degli output e degli outcome associati o derivabili dal processo

Misurare la qualità nel settore è un punto estremamente complesso ma essenziale per poter definire le prestazioni (in termini di efficacia ed efficienza) del processo stesso di ricerca

Attraverso l'adozione dei principi della Qualità anche nel settore della Ricerca e Sviluppo si dovrebbero poter riuscire a garantire i seguenti aspetti. Oltre alla Leadership ritroviamo:

- Lo standard (di processo) e quindi la sua ripetibilità.
- La tracciabilità del percorso operato (durante e a posteriori)
- La circolarità del percorso.
- La misurabilità
- La etero-referenzialità.
- La esigibilità.

Il mercato economico moderno e globale sta diventando sempre più attento alla nuova ottica legata ai concetti di sostenibilità dello sviluppo rivolgendo una crescente attenzione ad alcune tematiche come la gestione razionale delle risorse, la sicurezza, la salute e l'ambiente; è evidente che la qualità diventa percepita come un approccio di garanzia per questo nuovo atteggiamento.

La Ricerca e lo Sviluppo come settore promotore e motore dell'innovazione dei processi e dei prodotti, ma anche dei servizi e delle infrastrutture, non può che cercare di richiedere (definire, implementare e garantire) quelle prestazioni superiori (almeno in media) che la Qualità può essere in grado di assicurare. In questa ottica la CFD, come strumento della Ricerca e Sviluppo presenta le medesime esigenze.

### 2.2.1 La Qualità e la CFD

L'adozione di un approccio di Qualità nella Ricerca e Sviluppo porta vantaggi in termini di:

- affidabilità dei nuovi prodotti, processi o servizi;
- riduzione dei costi;
- applicabilità di regolamentazioni.

In particolare, declinando questi aspetti per la CFD è possibile affermare che il vantaggio principale (e quindi l'obiettivo della Qualità nella CFD) risiede senza dubbio nella crescita dell'affidabilità dei risultati prodotti dalle analisi CFD che, quando la ricerca è condotta con obiettivi di ampio respiro e non è fine a se stessa, sono destinati a portare allo sviluppo di nuove configurazioni o prodotti o processi con performance più competitive rispetto ai precedenti.

Tale schema porta ovviamente a una maggior diffusione dello strumento di analisi in grado di fornire i suddetti risultati, una richiesta crescente di competenze sempre più specializzate nel settore, ritorni economici tali (per software e/o service house di CFD) da fornire ulteriori possibilità di investire risorse nei miglioramenti e nell'approfondimento della stessa tecnologia.

Non è più il tempo in cui i risultati dell'analisi CFD siano speculazioni accademiche o al massimo i risultati di base delle direzioni R&D da cui far partire lunghe e costose campagne sperimentali di prova o la costruzione di prototipi.

La storia della CFD ha portato, oggi, la tecnologia allo stadio dove non si può più fare a meno di un controllo di qualità sui risultati ottenuti e ottenibili dall'analisi numerica e quale il costo per ottenere un certo livello di qualità.

Tali risultati, sempre più utilizzati in differenti settori applicativi (che a loro volta spingono l'impiego della numerica) devono essere in qualche modo certificati o per lo meno deve essere possibile conoscere una sorta di intervallo di validità o di errore di misura entro cui il risultato è accettabile.

Inoltre occorre ricordare che molti organismi di regolamentazione (ad esempio in campo nucleare, ma anche ambientale) per autorizzare un prodotto o un processo, in una parola per legittimare il risultato di una ricerca e procedere alla sua implementazione applicativa, chiedono alcuni requisiti che a oggi, sono garantiti dai progettisti mediante test sperimentali in scala. Scardinare questo sistema e cercare di introdurre anche la CFD come banco di prova da ufficio per effettuare questi test e permettere processi più rapidi di autorizzazione dagli organismi di regolazione e/o di controllo costituirebbe un ulteriore passo avanti per la



numerica ma implicherebbe necessariamente l'implementazione e l'adozione di un sistema di controllo di qualità nel processo di analisi CFD.

Tuttavia, occorre a questo punto ricordare che, in accordo con l'idea di una qualità che è contestuale, non è definibile un unico livello di accuratezza ottimale per tutte le simulazioni numeriche, ma che a seconda del tempo a disposizione, delle risorse e degli obiettivi del progetto esiste un massimo grado di accuratezza raggiungibile in quel tempo, con quelle risorse e in linea con gli obiettivi del progetto.

Ad esempio, la Simulazione Diretta della turbolenza verso cui tende la ricerca nel settore, costituisce uno strumento potente per rimuovere una serie di incertezze modellistiche che inficiano i risultati delle analisi CFD. A fronte, dunque, di risultati di notevole accuratezza presenta oggi un costo molto elevato nelle potenzialità degli hardware necessari e nelle tempistiche richieste. Non sempre il problema in oggetto e i suoi obiettivi richiedono tale approccio. Ad esempio la valutazione delle perdite di carico in un condotto non richiede necessariamente una modellazione numerica tridimensionale ma può basarsi più semplicemente sull'utilizzo di correlazioni semiempiriche.

In questo ambito, la strada più efficiente per migliorare la qualità del processo di CFD dunque non sarebbe l'impiego della Simulazione Diretta (almeno nel prossimo futuro) sempre e comunque. Il suo utilizzo trova oggi anche ragione nel proporre un database di informazioni necessarie per validare i modelli fisici di turbolenza (come le varie tipologie di modelli RANS) e definirne con precisione i campi di validità e i limiti di applicazione.

La strada verso l'adozione di un sistema di controllo della qualità dei risultati nel processo di analisi CFD è senza dubbio una strada obbligata: ha ancora alcuni tratti in ombra ma presenta aspetti di rilievo che consentono di avvicinare i principi della qualità con le logiche (le buone prassi, le regole non scritte) che ogni analista numerico (non utente) ha da sempre cercato di applicare durante lo svolgimento del suo operato. Ad esempio ripercorrendo i 6 elementi che la Qualità porta a garantire viene quasi immediato associare ciascuno a una differente fase del processo di analisi CFD.

Standard, tracciabilità e esigibilità sono convenzionali fattori tipici di qualunque ricerca scientifica che richieda l'applicazione di un metodo specifico, la produzione di documenti e archivi contenenti i risultati delle varie fasi del lavoro e la loro elaborazione, la definizione di un piano di lavoro con compiti e tempistiche assegnati.

Analogamente, la etero-referenzialità, che deve supportare tanto la fase di approccio al problema (ricerca bibliografica preliminare) quanto la fase di implementazione del modello (quali le soluzioni adottate da chi se ne è già occupato) e la fase di analisi dei risultati ottenuti (quali i risultati degli altri) è una buona prassi che ciascun analista numerico di esperienza (con qualche cantonata sulle spalle) ha imparato ad adottare.

La circolarità porta all'idea di un processo di analisi per loop successivi (il ciclo di progetto della CFD), ciascuno dei quali tende ad accrescere l'accuratezza dei risultati che scaturiscono dal modello numerico fino al massimo ottenibile per un dato assetto specifico (approssimazione della realtà, modelli impiegati e numerica disponibile). Infine la misurabilità porta all'idea di dover passare attraverso una fase di convalida (la validazione) del modello della realtà definito in un dato assetto specifico (approssimazione della realtà, modelli impiegati e numerica disponibile). Il legame tra la Qualità e le esigenze della CFD appare dunque piuttosto evidente e la strada ormai indicata, tuttavia, come anticipato, alcuni aspetti di metodo rimangono ancora non ben delineati. Esistono numerosi tentativi a livello nazionale e internazionale di introdurre nella CFD il paradigma della Qualità. Alcune scuole di pensiero sono piuttosto interessanti ed è opportuno riassumerne le specifiche peculiarità.

### **3 OBIETTIVI SPECIFICI**

Nell'ambito delle attività di ricerca del consorzio IRIS, il coinvolgimento del CFDLab è stato mirato all'impegno della fluidodinamica computazionale come strumento di indagine:

Il politecnico di Milano è anche leader del gruppo CFD4IRIS definito nel 2004 con gli obiettivi generale di approfondire l'impiego e le potenzialità della CFD (utilizzando codici differenti ma adottando un approccio condiviso) nell'ambito della progettazione, dell'analisi di sicurezza ed eventualmente del processo di "licensing" del reattore stesso. Il CFDLab del Politecnico di Milano ha perseguito i seguenti obiettivi specifici:



### 3.1 SVILUPPO DI MODELLI DI TURBOLENZA

Nell'ambito nucleare anche limitatamente al solo ambito monofase, le caratteristiche geometriche e fluidodinamiche del reattore e dei componenti in esame sono tali da richiedere modelli di turbolenza che possano superare alcune delle limitazioni legate alle formulazioni convenzionalmente implementate nei codici commerciali.

Il campo di ricerca relativo riguarda l'implementazione di modelli non lineari di turbolenza e in particolare approfondisce lo studio dei modelli di turbolenza a due equazioni che si basano sulla formulazione a viscosità turbolenta non lineare degli sforzi di Reynolds (NLEVM) implementandoli in un codice CFD commerciale.

Nella progettazione di componenti di impianti industriali interessati da flussi ad elevato numero di Reynolds e/o con configurazioni complesse la modellazione numerica riveste particolare importanza. Ad oggi nella progettazione ingegneristica ci si avvale ancora e principalmente di simulazioni basate sulla risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes mediate (RANS) essendo la strada DNS o LES non sempre compatibili con i tempi, costi ed esigenze industriali per quanto investigate a livello di ricerca. La modellazione della turbolenza influenza quindi l'accuratezza dei risultati e costituisce uno degli anelli deboli nella catena delle ipotesi alla base della CFD.

In particolare i modelli basati sull'ipotesi di Boussinesq hanno come limite intrinseco l'incapacità di catturare gli effetti dell'anisotropia del componente normale del tensore degli sforzi di Reynolds e, di conseguenza, di prevedere, per esempio, i moti secondari presenti nei campi di moto.

La previsione dei moti secondari presenti nel flusso turbolento permette di riprodurre con maggiore accuratezza il campo di moto di configurazioni di elevato interesse applicativo (presenza di swirl e flusso in rotazione). Il lavoro di ricerca attualmente in corso consiste nell'implementazione di un modello k-ε del secondo e del terzo ordine, sviluppato riferendosi ai modelli proposti da Shih, Zhu e Lumley (1993) e da Craft, Launder and Suga (1996).

Il modello ha una versione low Reynolds che prevede l'inserimento di opportune funzioni di smorzamento (damping function) al fine di preservare la validità delle equazioni di trasporto dell'energia cinetica turbolenta k e della dissipazione di energia cinetica turbolenta e anche all'interno del substrato viscoso di parete.

Il modello è stato al momento validato attraverso casi benchmark classici ed è stato applicato ad un ulteriore caso di riferimento che presenta caratteristiche geometriche e fluidodinamiche simili a quelle del downcomer del reattore IRIS.

Al momento la ricerca utilizza la CFD come strumento di indagine, ma è in fase di messa a punto un apparato sperimentale in grado di fornire una ottima base di confronto per proseguire nella implementazione e nella validazione dei modelli NLEVM consentendo in alcuni casi una apertura della ricerca nella direzione dello sviluppo stesso di questi modelli.

### 3.2 SUPPORTO AL DESIGN DEL DOWNCOMER E DEL LOWER PLENUM DI IRIS

La CFD applicata al settore nucleare ha avuto un grande sviluppo nel corso degli ultimi anni. Attualmente si ritiene la CFD un ausilio alla progettazione dei componenti dei reattori nucleari e allo studio della sicurezza.

In campo nucleare può essere interessante applicare la CFD ai problemi di sicurezza con fluido mono-fase e bi-fase, tuttavia la prima fase di attività del CFDGroup4IRIS ha focalizzato i suoi interessi su problemi mono-fase

Lo scopo principale è legato ad analizzare come l'utilizzo della fluidodinamica computazionale fosse di ausilio alla progettazione. Si è optato dunque per le seguenti attività:

1. Supporto alla progettazione in particolare della geometria del downcomer e del lower plenum
2. Supporto alle analisi di sicurezza: in particolare l'aspetto inerente il controllo del boro
3. Supporto al testing: pianificazione delle prove sperimentali al fine di garantire la correttezza delle misurazioni effettuate su riproduzioni in scala dei domini sottoposti ad analisi. Inoltre si vuole dare l'input per lo studio della "scalabilità" della fisica che caratterizza un reattore nucleare.

### 3.3 DEFINIZIONE DI PROTOCOLLI PER L'ACCURATEZZA NELLA CFD

La Qualità, come impostazione metodologica risulta essere un insieme di strumenti di controllo in grado di garantire, attraverso l'applicazione di protocolli adeguati e di metodi di gestione il raggiungimento di standard elevati, riproducibili e tracciabili.



La CFD, come area di ricerca e sviluppo, che inevitabilmente coinvolge errori e incertezze legate all'aspetto geometrico, numerico, modellistico o ai fattori umani del processo di analisi richiede, per accrescere l'affidabilità dei propri risultati, l'applicazione di standard adeguati.

Tale necessità, implicita proprio nella natura virtuale della CFD si è resa sempre più palese negli ultimi anni, grazie allo sviluppo della potenzialità dello strumento (software, hardware e competenze) utilizzato ormai con discreto successo nel mondo industriale e accademico. Ad oggi, la definizione di standard costituisce ramo in pieno fervore di ricerca a livello internazionale e un settore stimolante per le numerose implicazioni di natura multidisciplinare.

Il gruppo ha focalizzato il proprio interesse in questo ambito indagando un nuovo approccio al problema che sia tale da qualificare come affidabile la tecnologia CFD e il processo di analisi a questa associato, e indipendente (per quanto possibile) dai differenti settori in cui è applicata.

L'approccio indicato dovrebbe essere tale da garantire 3 livelli di qualità:

1. La Qualità dei software utilizzati: codici commerciali, in house, accademici e open source;
2. La Qualità degli analisti: competenze e professionalità degli utenti;
3. La Qualità del processo di analisi: procedure e protocolli tali da garantire l'affidabilità dei risultati.

Il terzo è indubbiamente il più complesso e oneroso, ma rappresenta la strada che sembra più ragionevole percorrere per ottenere protocolli di natura più universale, che possano nascere da un confronto partecipato e da una integrazione coerente di competenze multinazionali e multisettoriali a beneficio dell'intera comunità scientifica del settore.

Questo approccio è seguito durante la elaborazione di un protocollo standard per controllare il processo di analisi CFD .

## 4 RISULTATI OTTENUTI

Vengono di seguito riportati i risultati ottenuti in accordo con li obiettivi specifici delineati

### 4.1 SVILUPPO DI MODELLI DI TURBOLENZA

Si definisce turbolento un regime di moto caratterizzato da un moto disordinato, completamente tridimensionale e non stazionario con fluttuazioni di velocità a caratteristica non deterministica.

La storia della turbolenza permette di comprendere la natura complessa del fenomeno. Nel 1937 Von Karman [2] definisce turbolento il moto irregolare di un fluido quando fluisce attorno a superfici solide o in prossimità di flussi dello stesso fluido ma di diversa velocità. Ulteriori studi sulla turbolenza evidenziano l'imprecisione della prima definizione: ad esempio esistono moti irregolari non necessariamente turbolenti, quali alcuni moti periodici. Nel 1975 Hinze [4] formula una definizione più aderente alla reale fenomenologia della turbolenza descrivendola come una condizione di flusso irregolare in cui le varie grandezze fisiche ad esso associate mostrano variazioni casuali nel tempo e nello spazio, ma dove è possibile distinguere statisticamente un valor medio.

In definitiva il moto di un fluido è turbolento se disordinato, completamente tridimensionale, non stazionario e con fluttuazioni di velocità a caratteristica non deterministica. Le fluttuazioni di velocità indotte dalla turbolenza nel fluido hanno la capacità di trasportare quantità scalari e vettoriali molto rapidamente, sia in assenza di campo di velocità medio sia in direzioni trasversali rispetto a quella del moto macroscopico. La turbolenza in genere aumenta quindi la diffusività della quantità di moto di vari ordini di grandezza rispetto al valore molecolare. Si presentano di seguito nel dettaglio alcuni aspetti legati alla turbolenza.

I moti turbolenti presentano strutture riconoscibili denominate vortici, in inglese eddies, di diversi ordini di grandezza e sono caratterizzati da uno spettro continuo di scale spaziali e temporali. In un flusso turbolento è possibile incontrare strutture vorticoso caratterizzate da scale spaziali distinte comprese fra la scala integrale della turbolenza (caratteristica delle strutture geometriche presenti nel dominio) e la scala dissipativa o di Kolmogorov.

Nella teoria dell'equilibrio universale sviluppata da Kolmogorov, applicabile alla turbolenza omogenea ed isotropa e valida solamente per flussi ad elevati numeri di Reynolds, l'energia meccanica del fluido, fornita alla scala integrale  $l$  della turbolenza da processi esterni (i. e. gradiente di pressione) subisce una progressiva degradazione attraverso una cascata di scale fino a quella dissipativa  $\lambda$ , quando è infine degradata in energia termica dagli attriti viscosi. Il processo a cascata presente nei flussi turbolenti concerne dunque un trasferimento di energia cinetica turbolenta (per unità di massa),  $k$ , dai grandi vortici a quelli più

piccoli; in seguito, l'energia cinetica turbolenta viene dissipata in calore attraverso l'azione della viscosità molecolare e tale processo avviene alla scala dei vortici più piccoli

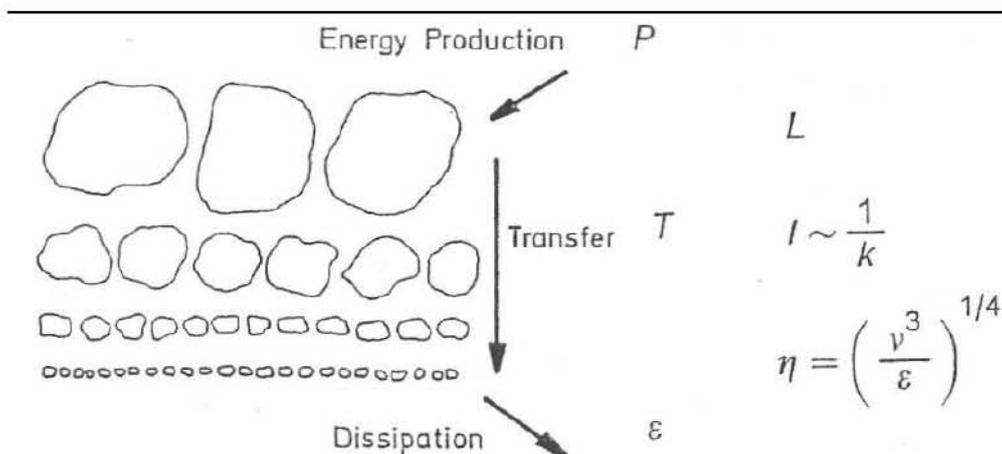


Fig 1 Cascata di scale nella turbolenza.

Secondo Kolmogorov per numeri di Reynolds elevati le strutture fluidodinamiche più piccole in un flusso turbolento sono statisticamente isotrope. La richiesta di numeri di Reynolds elevati, esplicita nelle ipotesi di Kolmogorov, implica la prevalenza degli effetti inerziali su quelli viscosi, rendendo così possibile il processo di trasferimento di energia dalle strutture più grandi a quelle più piccole. L'ipotesi di fondo è che al progredire della cascata le strutture perdano sempre più memoria delle caratteristiche dei vortici che le hanno generate e che quindi le strutture più piccole in un moto turbolento abbiano tutte le stesse caratteristiche.

La maggior parte dei flussi di interesse industriale è caratterizzata da un regime di moto turbolento e gli aspetti legati alla modellazione di questo fenomeno rappresentano un punto chiave per le analisi computazionali.

#### 4.1.1 Ricerca in progress: implementazione di modelli non lineari di turbolenza

I flussi turbolenti sono caratterizzati da fluttuazioni del campo di velocità. Tali fluttuazioni influenzano le quantità trasportate come la quantità di moto, l'energia e la concentrazione delle specie chimiche, causando una fluttuazione delle stesse. Le fluttuazioni turbolente, considerata la piccola scala spaziale e l'elevata frequenza, sono computazionalmente troppo onerose per essere risolte direttamente in calcoli ingegneristici. Per altra via, le equazioni istantanee che governano il moto possono essere manipolate per rimuovere le scale più piccole, ottenendo un insieme di equazioni computazionalmente meno pesanti da risolvere. Tuttavia, le equazioni modificate contengono nuove variabili incognite che devono essere modellate attraverso modelli di turbolenza in funzione di quantità note.

Nella pratica ingegneristica in numerose applicazioni può essere sufficiente conoscere l'effetto medio delle quantità turbolente e non le fluttuazioni istantanee, quindi un approccio utile consiste nel modellare le quantità turbolente medie filtrando nel tempo le equazioni di Navier-Stokes, tale procedimento è noto come chiusura secondo Reynolds. Siccome i flussi turbolenti sono caratterizzati da fluttuazioni casuali delle varie proprietà del fluido per definire delle nuove equazioni che governino i flussi turbolenti usiamo l'approccio statistico introdotto da Reynolds nel 1895; le nuove equazioni ottenute sono correntemente indicate con l'acronimo RANS.

Le equazioni sdi Navier Stokes sono

Equazione di continuità

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0$$

Equazione del momento (mediata alla Reynolds – RANS)



$$\rho \frac{DU_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right]$$

where  $\frac{\partial U_k}{\partial x_k} = 0$

Equazione dell'energia

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \rho \dot{q}_g + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{\theta u_j} \right)$$

A causa della non linearità delle equazioni di Navier Stokes otteniamo un sistema non chiuso di equazioni, ovvero un sistema con più incognite che equazioni. Le quantità incognite, dette sforzi di Reynolds, sono definite introducendo nuove ipotesi e/o nuove equazioni attraverso i modelli di chiusura della turbolenza.

I Modelli a viscosità turbolenta basati sull'ipotesi di diffusione per gradiente della quantità di moto (nota in letteratura come ipotesi di Boussinesq) sono denominati modelli lineari degli sforzi di Reynolds. Secondo tale ipotesi è possibile definire gli sforzi di Reynolds come funzione del tensore della velocità di deformazione e dell'intensità dell'energia cinetica turbolenta  $k$ .

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial U_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \quad \text{con} \quad \mu_{eff} = \mu_t + \mu$$

Per chiudere il problema della turbolenza, è necessario caratterizzare la turbolenza stessa descrivendone intensità e scale spaziali. I modelli a due equazioni, che consideriamo nel presente lavoro, permettono di descrivere la turbolenza attraverso la risoluzione di due equazioni differenziali: l'equazione di trasporto dell'energia cinetica turbolenta  $k$ , rappresentativa dell'intensità della turbolenza, e una seconda equazione differenziale, necessaria per determinare la dimensione dei vortici più grandi.

Il progetto nel quale si inserisce il lavoro intende approfondire lo studio dei modelli di turbolenza a due equazioni che si basano sulla formulazione a viscosità turbolenta non lineare degli sforzi di Reynolds (NLEVM) implementandoli in un codice CFD commerciale. Lo studio della turbolenza attraverso la modellazione numerica è un campo in cui non si è ancora in grado di riprodurre con elevata accuratezza alcune tipologie di moto.

In particolare i modelli basati sull'ipotesi di Boussinesq hanno come limite intrinseco l'incapacità di catturare gli effetti dell'anisotropia del componente normale del tensore degli sforzi di Reynolds e, di conseguenza, di prevedere, per esempio, i moti secondari presenti nei campi di moto.

La previsione dei moti secondari presenti nel flusso turbolento permette di riprodurre con maggiore accuratezza il campo di moto di configurazioni di elevato interesse applicativo (presenza di swirl e flusso in rotazione).

L'implementazione di una relazione tra gli sforzi e il tensore della velocità di deformazione del terzo ordine prende spunto dalla proposta di Shih, Zhu e Lumley (1993) e di Craft, Launder and Suga (1996).



$$\begin{aligned}
 -\overline{\rho u_i u_j} = & -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t S_{ij} - C_1 \mu_t \frac{k}{\varepsilon} \left[ S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} S_{kl} S_{kl} \right] + \\
 & -C_2 \mu_t \frac{k}{\varepsilon} \left[ \Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki} \right] - C_3 \mu_t \frac{k}{\varepsilon} \left[ \Omega_{ik} \Omega_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \right] + \\
 & -C_4 \mu_t \frac{k^2}{\varepsilon^2} \left[ S_{ki} \Omega_{lj} + S_{kj} \Omega_{li} \right] S_{kl} + \\
 & -C_5 \mu_t \frac{k^2}{\varepsilon^2} \left[ \Omega_{il} \Omega_{lm} S_{mj} + \Omega_{mj} \Omega_{lm} S_{il} - \frac{2}{3} S_{lm} \Omega_{mn} \Omega_{nl} \delta_{ij} \right] + \\
 & -C_6 \mu_t \frac{k^2}{\varepsilon^2} \left[ S_{kl} S_{kl} S_{ij} \right] - C_7 \mu_t \frac{k^2}{\varepsilon^2} \left[ \Omega_{kl} \Omega_{kl} S_{ij} \right]
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

where

$$S_{ij} = \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \tag{3.25}$$

and

$$\Omega_{ij} = \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

Il modello utilizzato prevede, inoltre, l'inserimento di opportune funzioni di smorzamento (damping function) al fine di preservare la validità delle equazioni di trasporto dell'energia cinetica turbolenta  $k$ , della dissipazione di energia cinetica turbolenta  $\varepsilon$  anche all'interno del substrato di parete. L'implementazione a basso numero di Reynolds ha seguito più di una filosofia focalizzandosi in particolare sull'approccio di Lien et al. (1996) e di Wilcox (1989) ed è in fase di implementazione.

Il modello utilizzato prevede, inoltre, l'inserimento di opportune funzioni di smorzamento (damping function) al fine di preservare la validità delle equazioni di trasporto dell'energia cinetica turbolenta  $k$  e della dissipazione di energia cinetica turbolenta e anche all'interno del substrato viscoso di parete; i modelli che adottano tale soluzione si definiscono 'modelli a basso numero di Reynolds'.

Il modello è stato validato attraverso dati sperimentali presenti in letteratura. In questo lavoro si presentano alcuni dei 'casi di riferimento' (benchmark) utilizzati per la validazione: il condotto a sezione quadrata e il condotto con presenza di gradino (backward-facing step). La simulazione di tali configurazioni ha permesso di verificare la capacità da parte del modello di predire correttamente il comportamento del flusso ed in particolare la capacità di cogliere la presenza di moti secondari tipici del condotto a sezione quadrata e di modellare correttamente il fenomeno di distacco e riattacco della vena fluida tipici del flusso a valle di un gradino.

Il buon accordo con i dati sperimentali presenti in letteratura consente di valutare il modello implementato come attendibile, presentandosi come un efficace strumento per la simulazione di flussi particolarmente complessi che i modelli lineari presenti nel codice FLUENT non sono in grado di riprodurre appropriatamente.

Il modello garantisce la realizzabilità. Tale concetto è stato introdotto in principio da Schumann nel 1977 [6]. L'idea basilare è che un modello di turbolenza debba essere plausibile ovvero debba portare ad un campo di fluttuazioni di velocità possibili. La realizzabilità impone al modello di turbolenza alcuni vincoli matematici legati alla fisica dei flussi turbolenti [2, 6]:

- ogni scalare pari al valor medio di una grandezza quadratica, come l'intensità di energia cinetica turbolenta o il tasso di dissipazione, deve essere positivo; tale requisito vale quindi per gli elementi



diagonali del tensore degli sforzi di Reynolds (gli sforzi normali), dove l'uso di lettere greche come pedici esclude sommatoria. In sintesi:  $\overline{u_\alpha u_\alpha} \geq 0$

- deve essere soddisfatta la disuguaglianza di Schwarz:  $\overline{u_i u_j}^2 \leq \overline{u_i^2} \cdot \overline{u_j^2}$

Queste condizioni prevengono la possibilità di ottenere risultati non fisici. Si introduce la realizzabilità nel modello seguendo il procedimento di Lumley [2]. L'equazione costitutiva degli sforzi di Reynolds secondo Boussinesq è espressa dalla seguente relazione:

Le condizioni di realizzabilità possono essere soddisfatte modificando la formulazione della costante  $C_\mu$  con

differenti funzioni di S o di  $\Omega$  che sono rispettivamente  $S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$  e  $\Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2}\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$

Si riportano di seguito i principali lavori nei quali il modello è descritto, validate e presentato:

#### 4.1.2 Tesi di laurea specialistica

Davide Fortini,  
Implementazione e Confronto di Modelli di Turbolenza a Viscosità Turbolenta Non Lineari in un codice CFD,  
Facoltà di Ing. Industriale - Laurea in Ingegneria Energetica  
AA 2006-2007

#### 4.1.3 Pubblicazioni Scientifiche

E. Colombo, D. Fortini, F. Inzoli, R. Mereu, "IMPLEMENTATION AND VALIDATION OF NLEVM IN A CFD COMMERCIAL CODE", XXV Congresso Nazionale sulla Trasmissione del Calore, pp. 495-500, 2007.

E. Colombo, F. Inzoli, R. Mereu, "IMPLEMENTATION AND VALIDATION OF NLEVM IN A CFD COMMERCIAL CODE", Proceeding VII Asian Computational Fluid Dynamics Conference, pp. 1292-1303, Bangalore, India, Novembre 26-30, 2007.

E. Colombo, F. Inzoli, R. Mereu, "MODELLING VALIDATION FOR NLEVM NEEDS EXPERIMENTAL FACILITIES FOR SUPPORTING THE DESIGN OF INNOVATIVE COMPONENTS", XXVI Congresso Nazionale sulla Trasmissione del Calore, Palermo 2008.

E. Colombo, F. Inzoli, R. Mereu, "CAPABILITY OF NON LINEAR EDDY VISCOSITY MODEL IN PREDICTING COMPLEX FLOWS, Proc. 6<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, J.P. Meyer (Eds.), Paper CE2, ISBN: 978-1-86854-691-6, 2008.

#### 4.2 SUPPORTO AL DESIGN DEL DOWNCOMER E DEL LOWER PLENUM DI IRIS

Si riporta di seguito una sintesi dei principali lavori di ricerca attivati (chiusi o ancora attivi) con riferimento specifico ai tre obiettivi di questo ambito come definiti in 3.2 e di seguito brevemente riportati:

1. Supporto alla progettazione in particolare della geometria del donwcomer e del lower planum
2. Supporto alle analisi di sicurezza: in particolare l'aspetto inerente il controllo del boro
3. Supporto al testing: pianificazione delle prove sperimentali al fine di garantire la correttezza delle misurazioni effettuate su riproduzioni in scala dei domini sottoposti ad analisi. Inoltre si vuole dare l'input per lo studio della "scalabilità" della fisica che caratterizza un reattore nucleare.



#### 4.2.1 Ricerche completate: Mixing del reattore nucleare IRIS

Tale lavoro si inserisce tra gli obiettivi 2 e 3. Durante gli ultimi anni la fluidodinamica computazionale ha ampliato notevolmente il suo successo in campo industriale come “strumento” di analisi e di progetto e ha incominciato ad interessare anche il settore nucleare.

Lo studio in esame ha avuto come focus l’analisi termo fluidodinamica, mediante tecniche CFD del mixing all’interno del reattore nucleare IRIS nella zona del downcomer. L’analisi è stata condotta, in accordo con i protocolli definiti dal gruppo di ricerca ed è suddivisa in:

1. fase di validazione; non essendo presenti in letteratura studi che avessero trattato nello specifico simulazioni su geometrie analoghe, è stato necessario ricorrere ad un processo di validazione del modello CFD da implementare.

2. fase di simulazione a piena scala del mixing all’interno del reattore nucleare IRIS al fine di studiare il comportamento fluidodinamico del moderatore, all’interno del downcomer in caso di anomalia di funzionamento dei generatori di vapore: questa analisi, ha lo scopo di simulare l’iniezione e prevedere la distribuzione del boro all’interno del dominio

In modo innovativo, rispetto agli standard del settore, si è deciso di utilizzare la fluidodinamica computazionale al problema del miscelamento del boro, sia per fornire una serie di dati utilizzabili durante la sperimentazione, sia per dare inizio ad uno studio di “scalabilità” della fisica che regna nel reattore e supportare le facility sperimentali in fase di costruzione.

Il dominio è simulato in scala 1:1 che è stato studiato sotto differenti condizioni operative.

- il funzionamento stazionario del downcomer in condizioni nominali
- il funzionamento parziale
- il funzionamento stazionario o sotto l’effetto di fenomeni legati alle assunzioni introdotte (le buoyancy).

L’iniezione del boro è simulata attraverso l’iniezione di uno scalare equivalente, nel presente caso la temperatura.

##### Contesto

Per evitare che nel reattore si generi una potenza termica differente da quella “nominale” che il circuito primario è in grado di asportare, la neutronica deve essere tenuta sotto controllo mediante barre di controllo, assorbitori solidi combustibili e/o una piccola quantità di boro solubile disciolto nel fluido del circuito primario. Durante il suo regolare funzionamento, un reattore nucleare può trovarsi (ad esempio a seguito di un guasto) in eccesso di potenza termica e il circuito primario non è più in grado di smaltire. Nel presente lavoro, viene studiato nello specifico il meccanismo di controllo mediante iniezione di boro.

È intuibile come lo studio della distribuzione del boro all’interno del core sia un tema di interesse per la sicurezza del reattore. Una volta iniettato, la concentrazione di tale elemento lungo i piani trasversali del nocciolo del reattore deve essere il più possibile uniforme e la funzione di controllo deve essere esercitata con tempi d’intervento rapidi.

Un aspetto molto importante legato alla ricerca riguarda la necessità di studiare la “scalabilità” della fisica che caratterizza il downcomer in questione per supportare la costruzione delle facility sperimentali che sono necessarie nella fase di testing e di licensing del reattore e che necessariamente devono risultare scalate rispetto alle dimensioni reali. In ambito sperimentale nascono pertanto gli studi sulla “scalabilità”.

Nella fluidodinamica computazionale invece, si sfrutta la caratteristica intrinseca della tecnologia che permette di simulare ogni dominio a piena scala.

La CFD può dunque supportare le analisi di scalabilità partendo dalla simulazione del problema in scala 1:1 per analizzare il reale comportamento fluidodinamico, è possibile poi riprodurre in differenti dimensioni, il dominio di calcolo per studiare gli effetti della scalatura ed effettuare confronti.

La CFD può inoltre sempre supportare la progettazione delle facility sperimentale.

Come rappresentato in figura 1 verrà preso in considerazione solo il downcomer del reattore, là dove si realizza la miscelazione tra l’acqua borata e l’acqua del circuito.

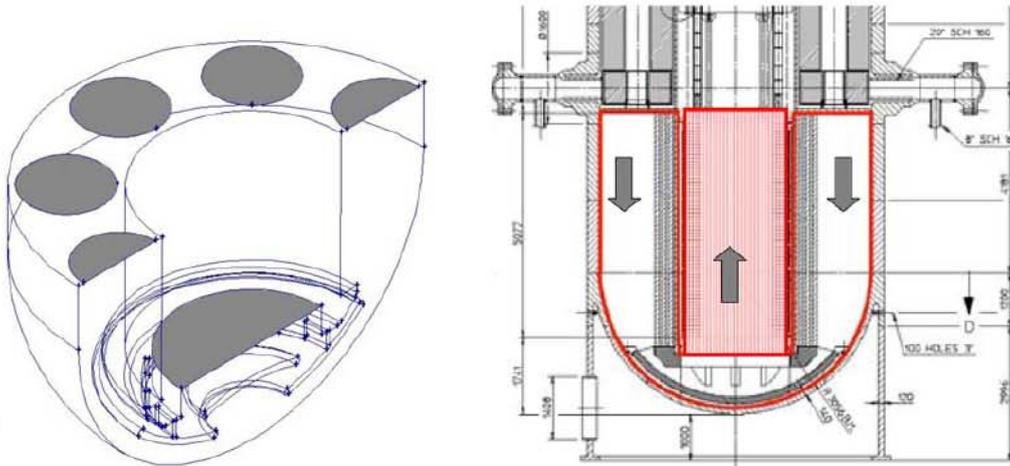


Fig 2 Rappresentazione del downcomer studiato

#### Attività svolte

Per via della geometria in esame che ha consentito di ricondurre il downcomer ad 1/16 per trarre informazioni sul funzionamento contemporaneo di tutti ed otto gli ingressi e ad 1/2 per avere informazioni sul funzionamento di sei ingressi su otto, sono state analizzate una serie di configurazioni:

CASO A: simulazione stazionaria per le configurazioni a 1/16 e a 1/2 per ottenere il campo di moto e le condizioni iniziali per una analisi in transitorio;

CASO B analisi in transitorio del miscelamento per le configurazioni a 1/16 e a 1/2 di downcomer per ottenere la distribuzione di temperatura nel core con cui risalire alla distribuzione della concentrazione di boro;

CASO C simulazione stazionaria e analisi in transitorio per le configurazioni a 1/16 di downcomer per ottenere le conseguenze sulla distribuzione di temperatura e valutare gli effetti di galleggiamento (buoyancy);

#### Risultati attesi

I risultati e le informazioni che si possono ottenere da questo lavoro possono essere suddivisi in due gruppi:

- una serie di andamenti della distribuzione del boro all'interno del core che possano essere sfruttati durante la fase di progettazione;
- l'influenza degli effetti di galleggiamento sulla distribuzione di temperatura;

#### Analisi dei Risultati

##### CASO A simulazione stazionaria per le configurazioni a 1/16 e a 1/2 per ottenere il campo di moto e le condizioni iniziali per una analisi in transitorio

All'interno di questa attività vengono analizzati i risultati ottenuti dalla simulazione di 1/16 di downcomer. E' stato possibile ridurre il dominio a questa dimensione perchè se ne vuole studiare il comportamento durante l'utilizzo contemporaneo di tutti ed otto gli ingressi presenti nella geometria.

Viene analizzato sia il regime stazionario che quello in transitorio; il primo per conoscere la distribuzione della velocità, della pressione e dell'energia cinetica turbolenta. Il secondo per analizzare il problema vero e proprio sottoposto ad analisi: la distribuzione della temperatura.

Si riporta di seguito una immagine del modello e della mesh di un mezzo del donwcomer

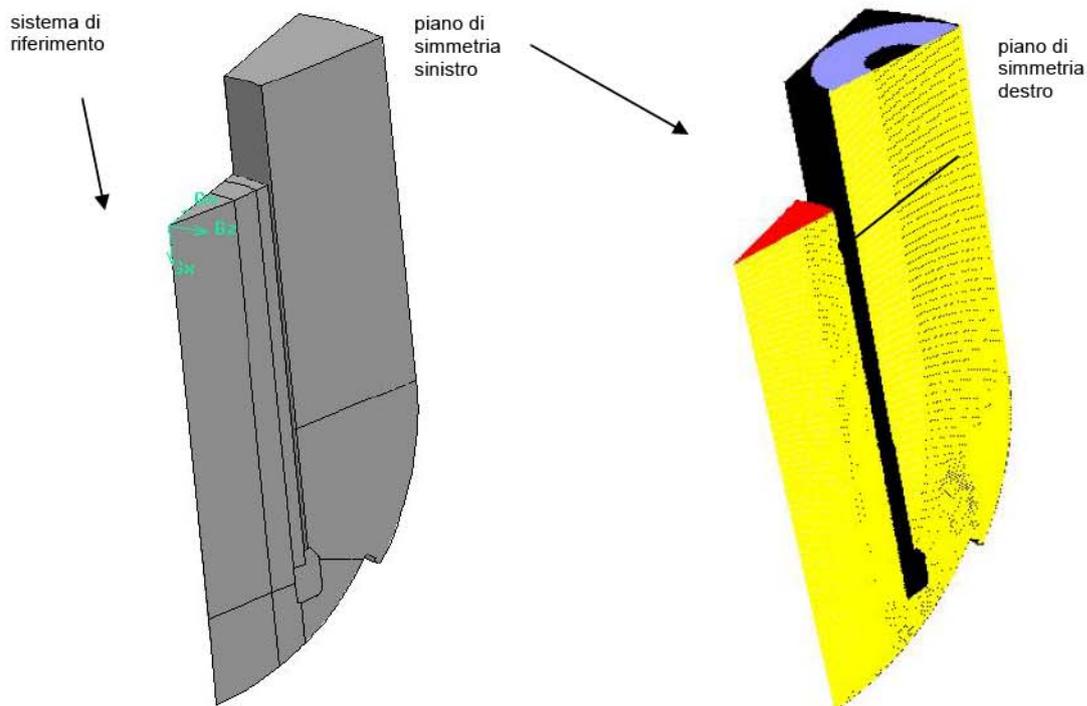


Figura.3 Geometria e mesh di 1/2 downcomer

#### Analisi stazionaria

Come già anticipato, utilizzare un volume corrispondente ad una fetta di  $22,5^\circ$  del downcomer consente di avere informazioni sul funzionamento completo dell'intero dominio, con immissione contemporanea, da tutti ed otto gli ingressi, dell'acqua a minor temperatura. Questo grazie alla simmetria della geometria e delle condizioni al contorno.

Di seguito alcune immagini rappresentative del comportamento fluidodinamico del reattore

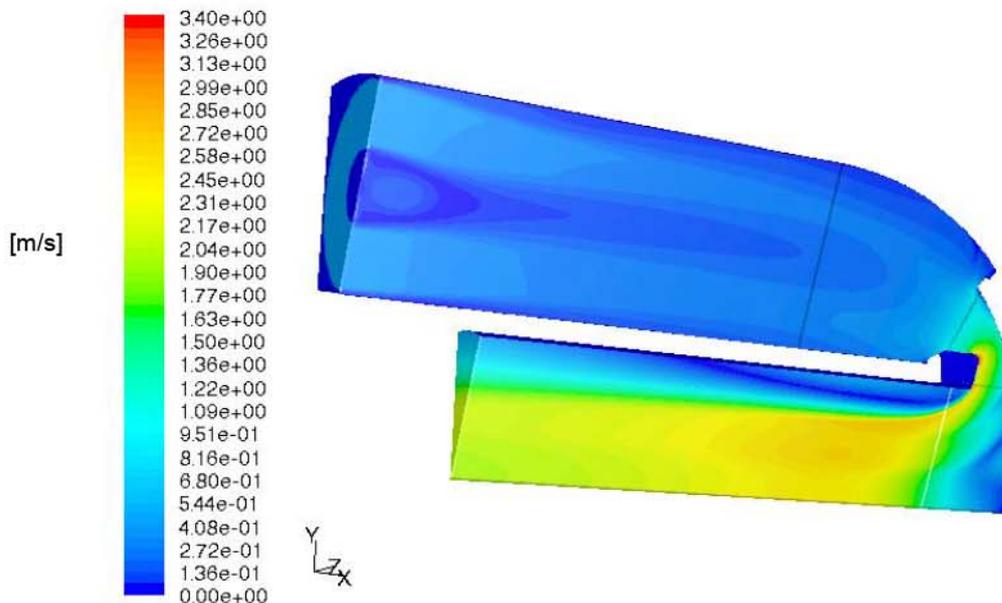


Figura.4 Andamento del campo di moto

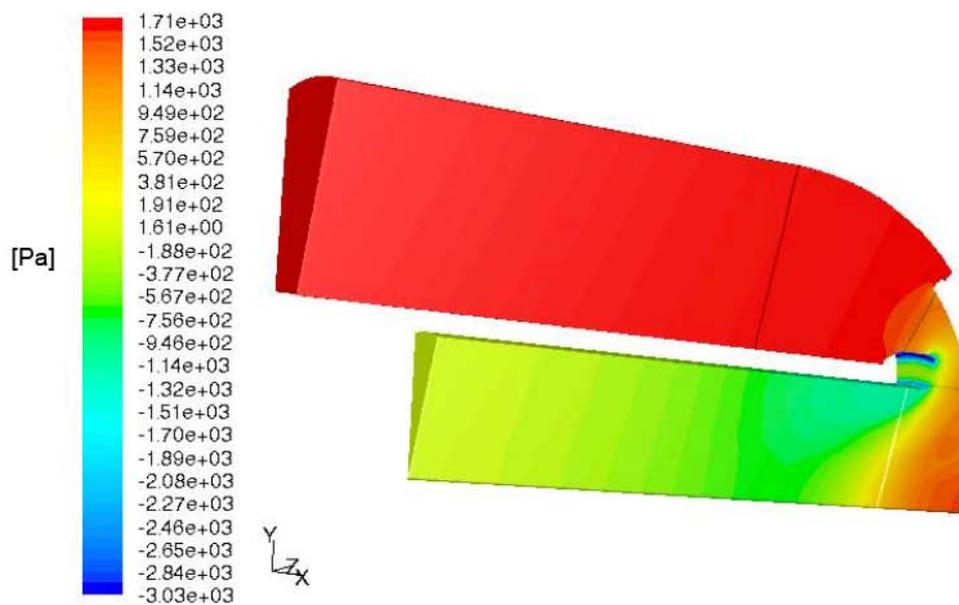


Figura.5 Andamento della pressione statica

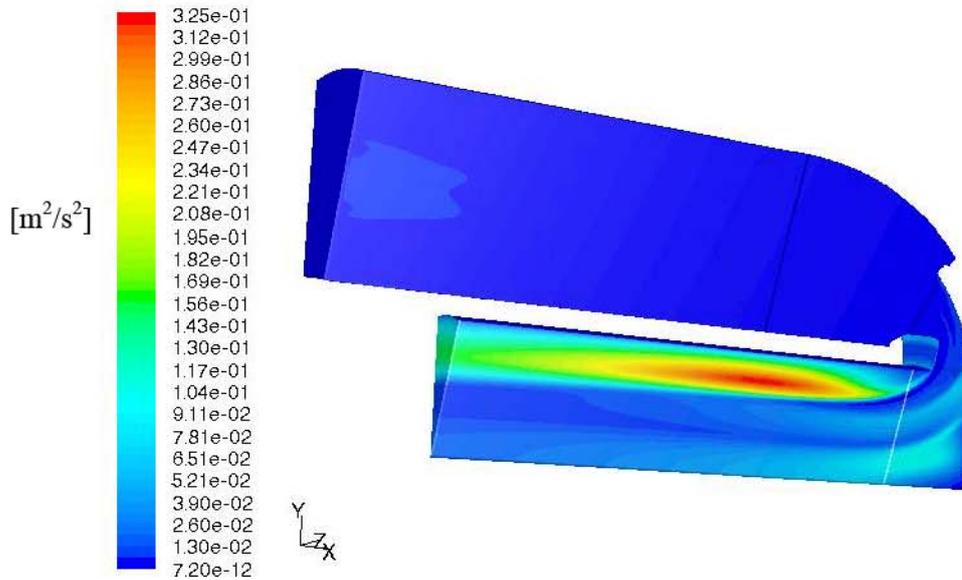


Figura.6 Andamento dell'energia cinetica turbolenta

#### Analisi in transitorio

L'andamento della temperatura vengono rappresentati lungo la superficie di simmetria destra e alcuni piani trasversali. Le prime immagini che verranno proposte non saranno accoppiate ai diagrammi di distribuzione perchè riguardano l'avanzamento dell'acqua a minor temperatura nel primo tratto di downcomer:

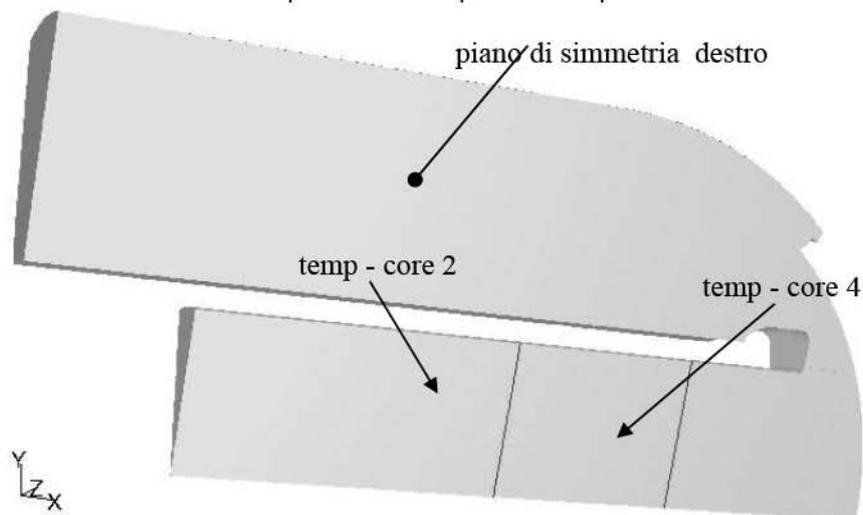


Figura.7 Linee utilizzate per la distribuzione di temperatura adimensionale

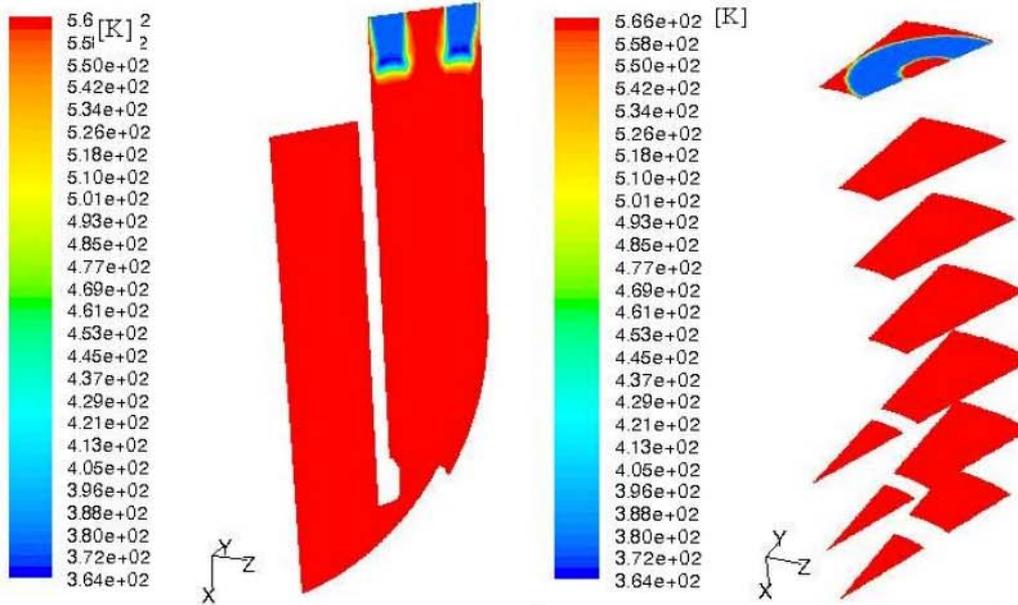


Figura.8 Andamento di temperatura dopo 2,5 s (50 time steps)

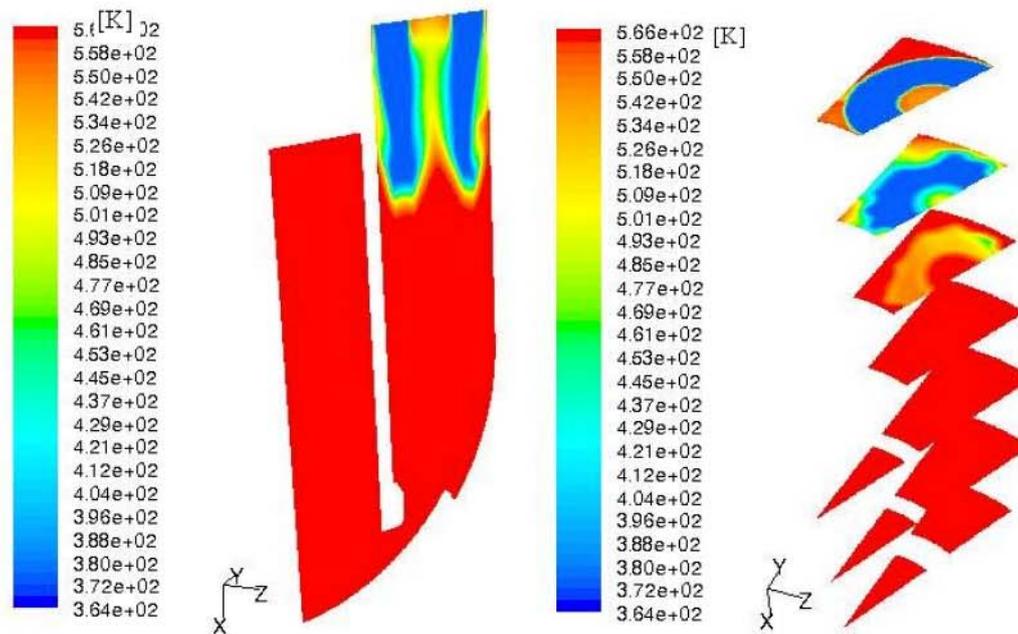


Figura.9 Andamento di temperatura dopo 7,5 s (150 time steps)

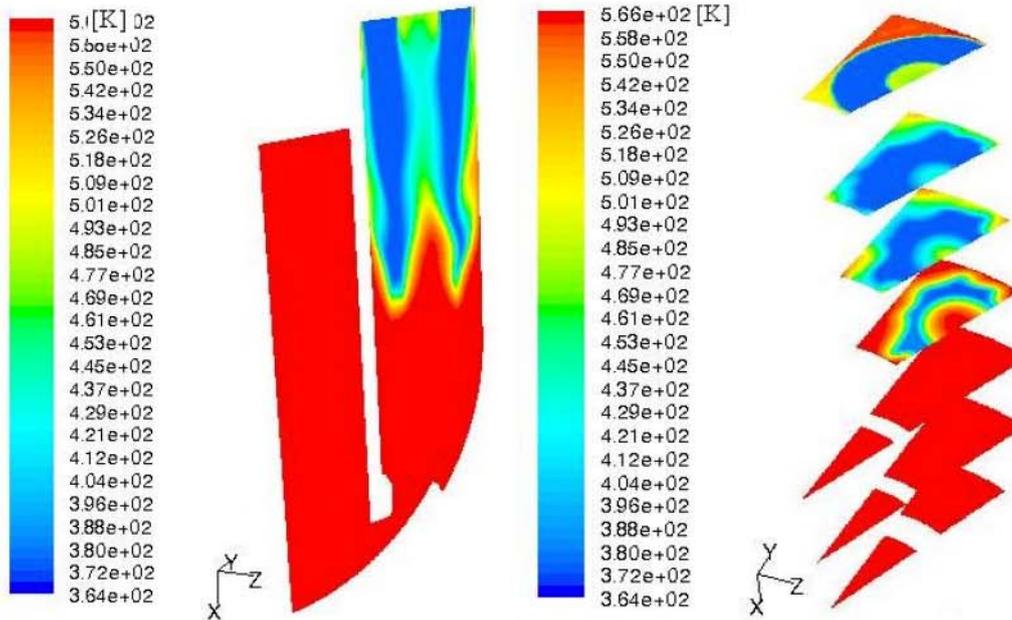


Figura.10 Andamento di temperatura dopo 12,5 s (250 time steps)

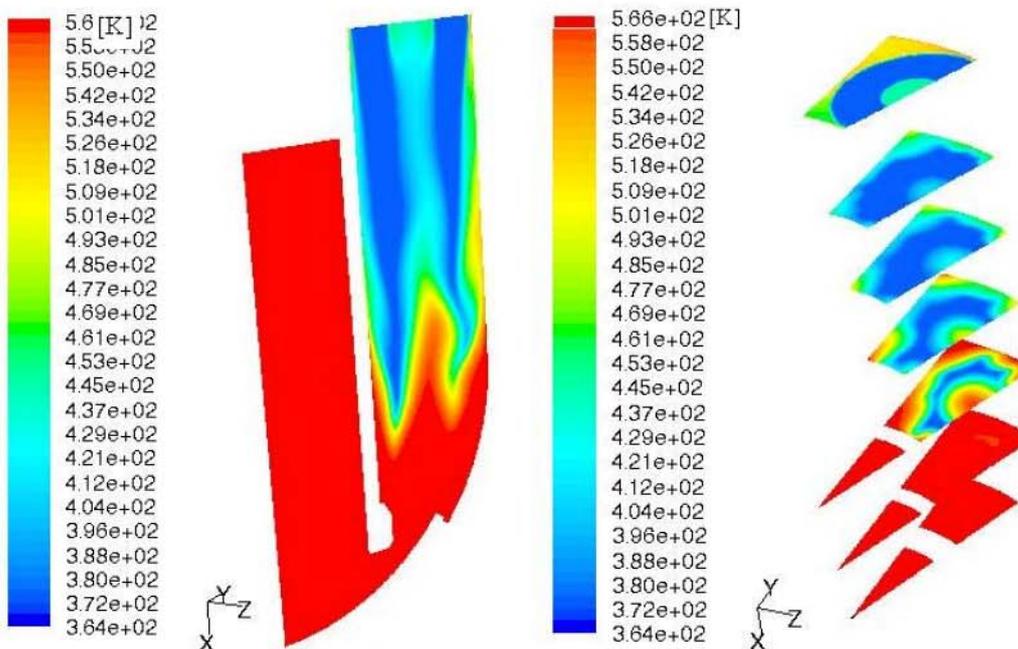


Figura.11 Andamento di temperatura dopo 17,5 s (350 time steps)

A partire dalle prossime immagini verranno presentate anche le distribuzioni della grandezza monitorata sfruttando una temperatura adimensionale ricavata come:

$$T_{ad} = \frac{(565 - T)}{(565 - 373)}$$

il cui valore è compreso tra 0 e 1 a seconda che vi sia miscelamento nullo o completo.

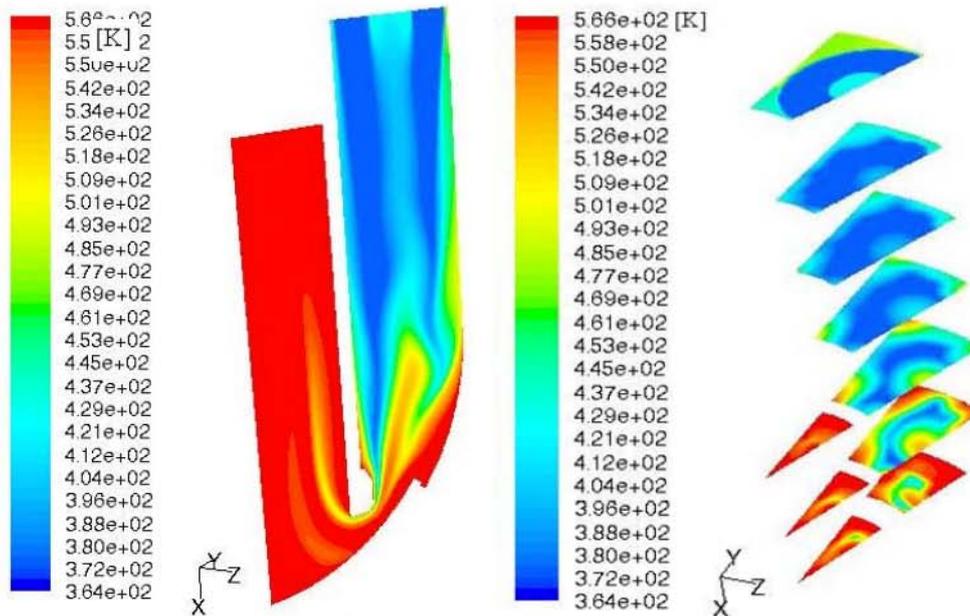


Figura.12 Andamento di temperatura dopo 22,5 s (450 time steps)

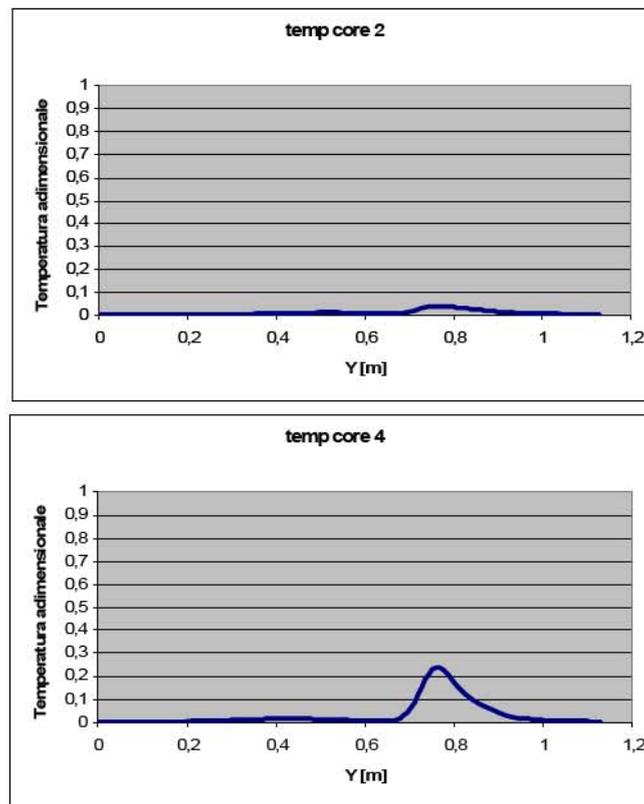


Figura.13 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 22,5 s (450 time steps)

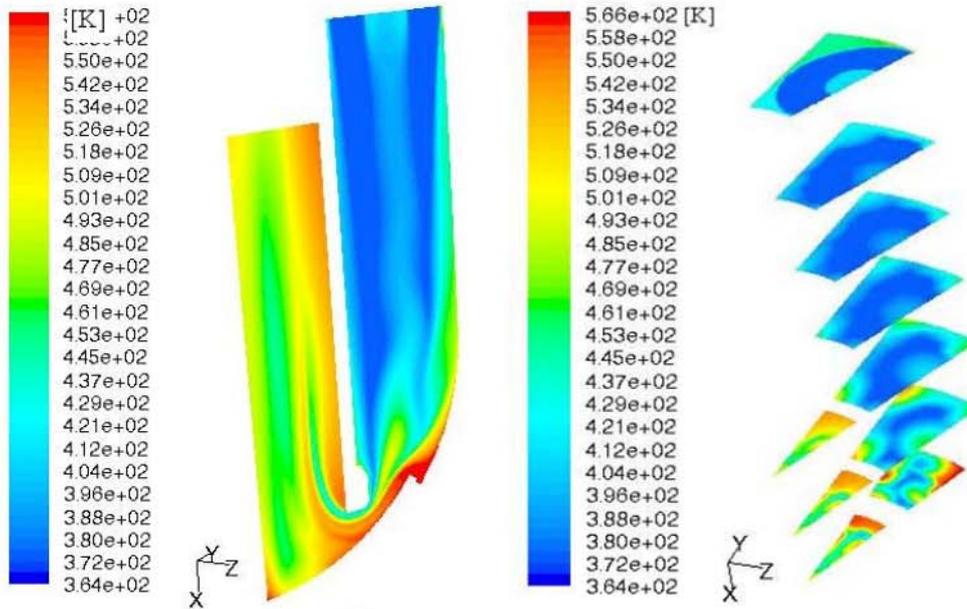


Figura.14 Andamento di temperatura dopo 27,5 s (550 time steps)

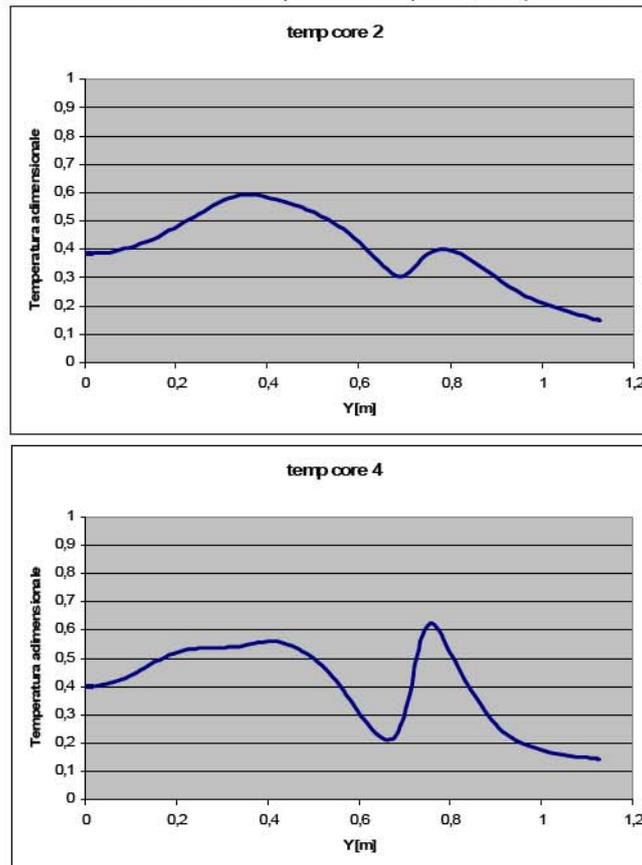


Figura.15 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 27,5 s (550 time steps)

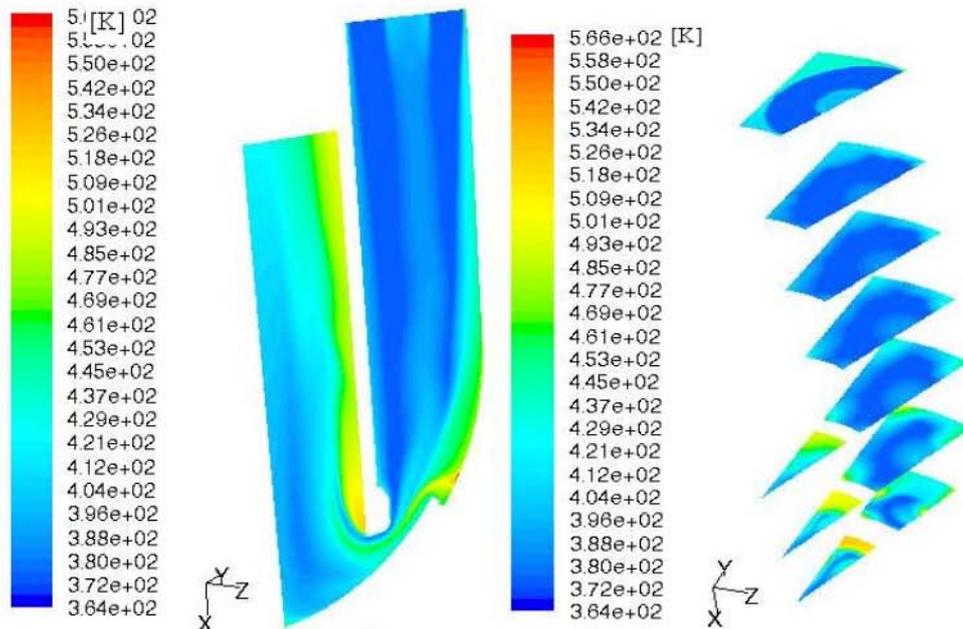


Figura.16 Andamento di temperatura dopo 32,5 s (650 time steps)

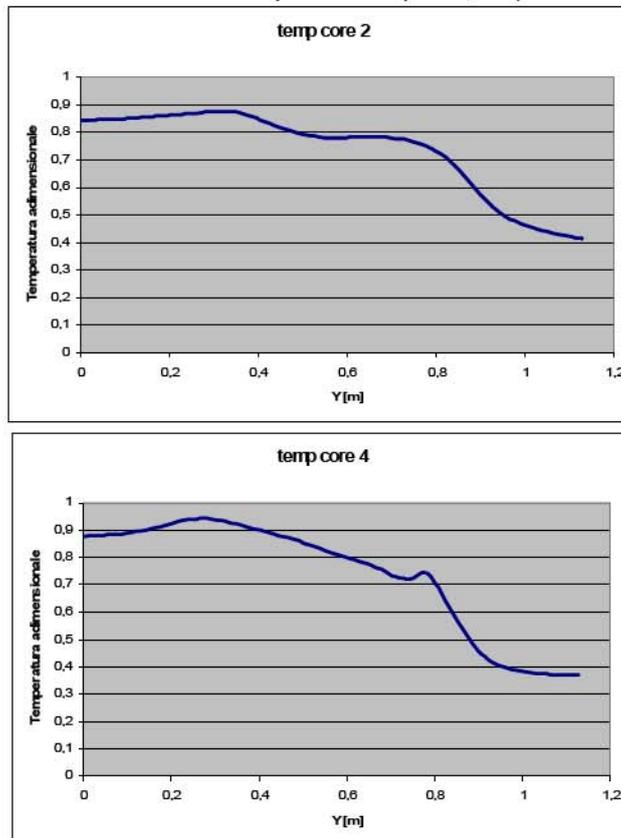


Figura.17 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 32,5 s (650 time steps)

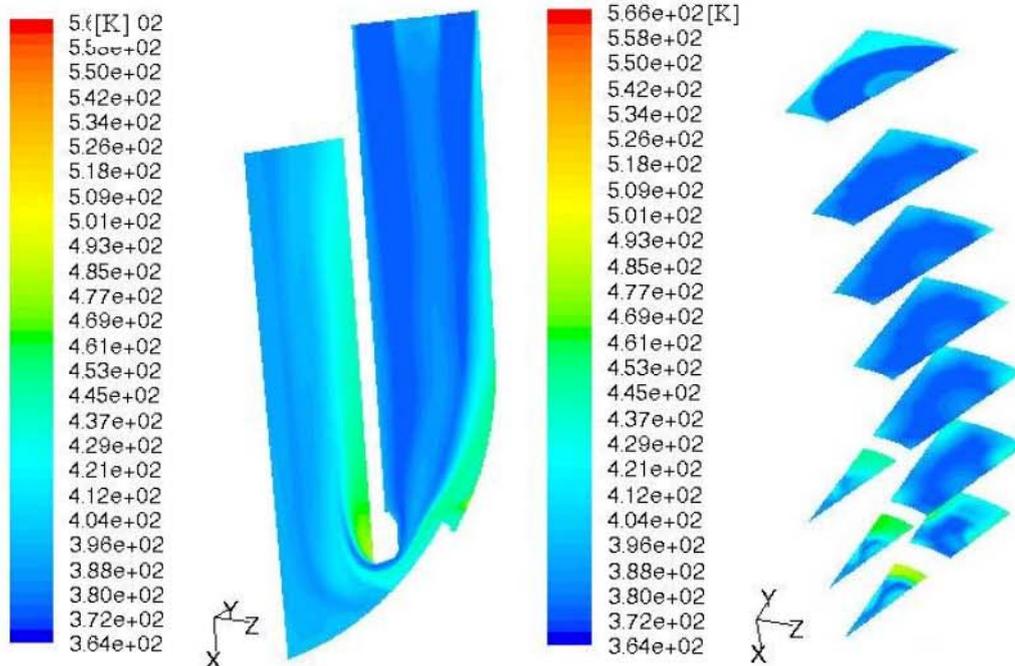


Figura.18 Andamento di temperatura dopo 37,5 (750 time steps)

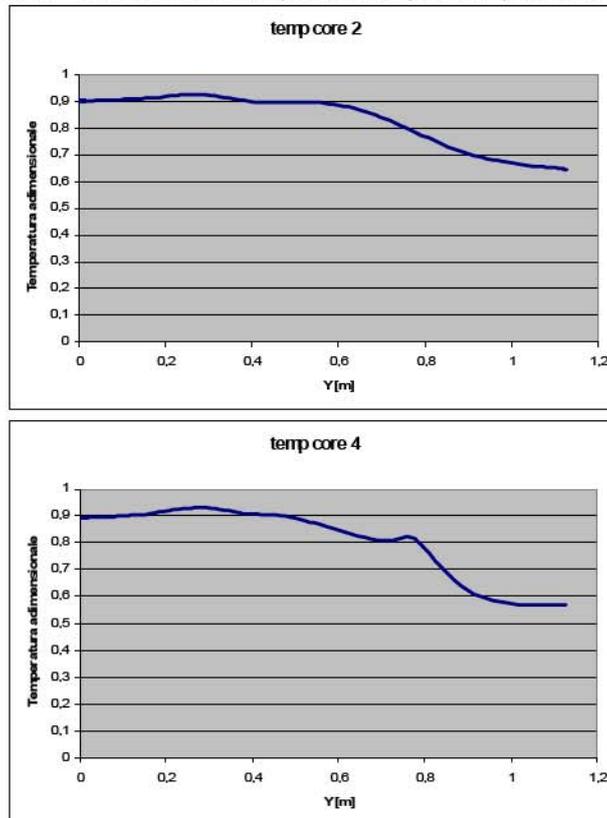


Figura.19 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 37,5 s (750 time steps)

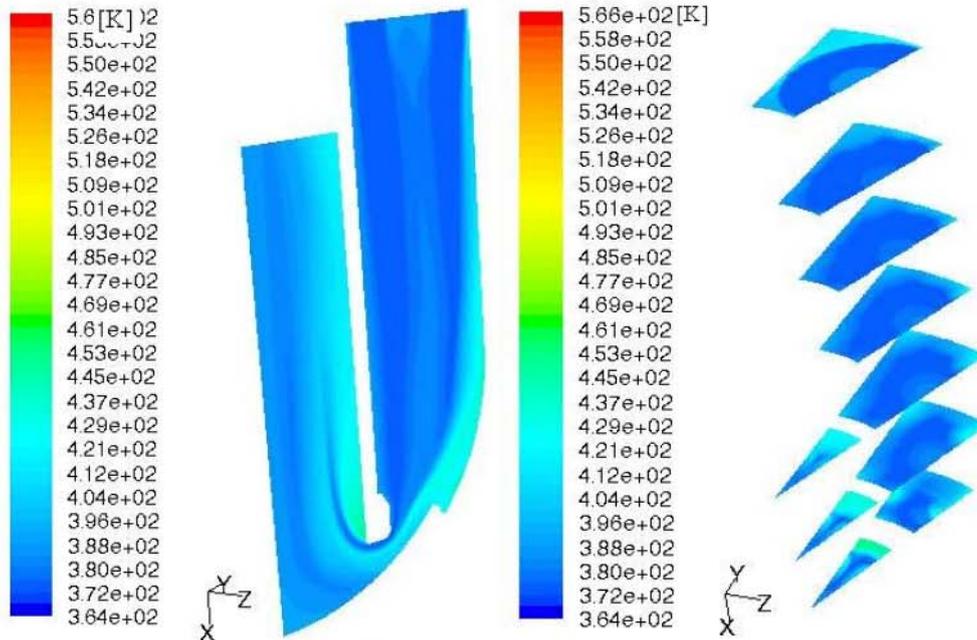


Figura.20 Andamento di temperatura dopo 42,5 s (850 time steps)

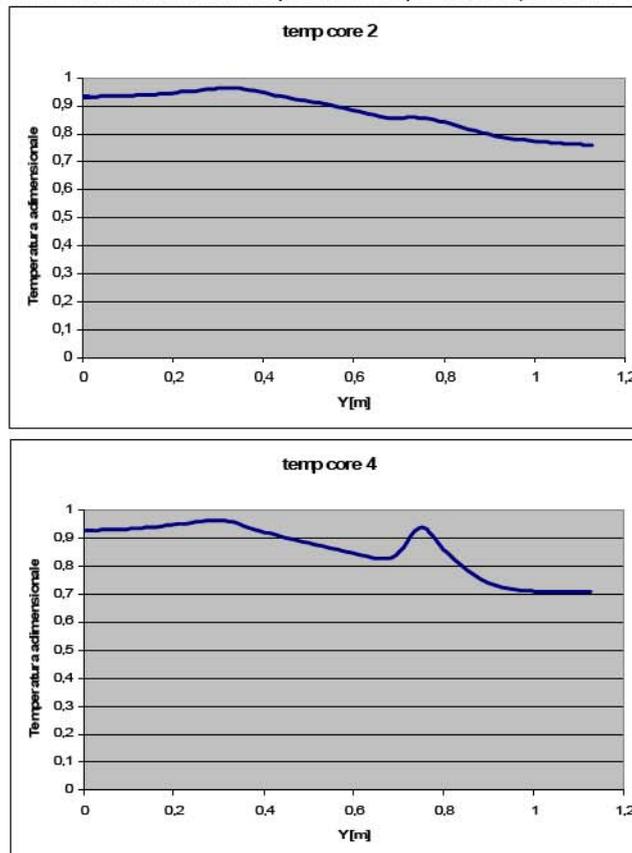


Figura.21 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 42,5 s (850 time steps)

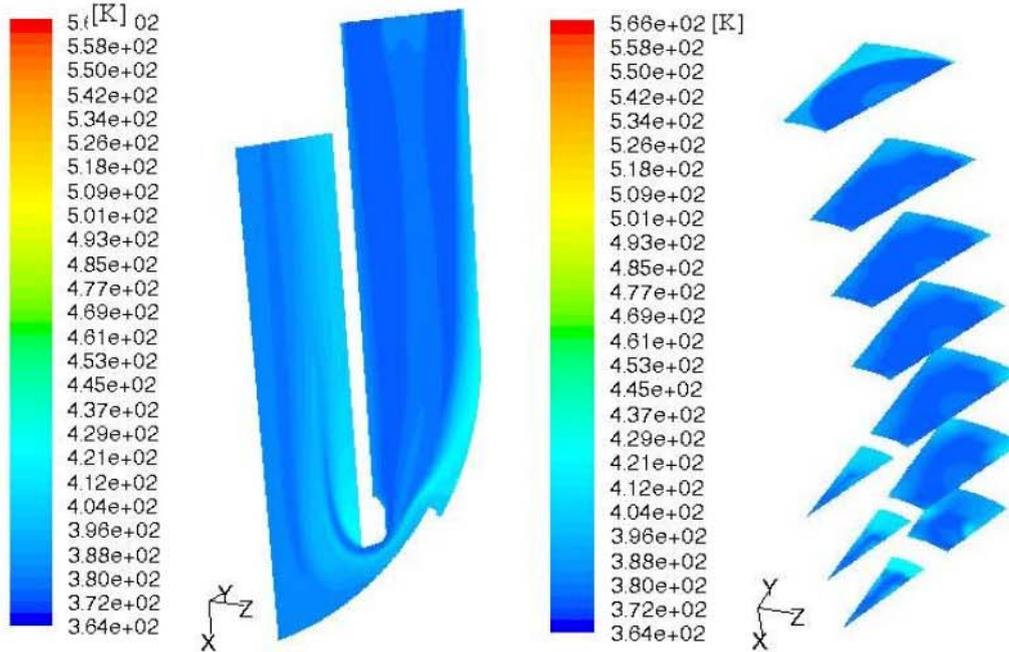


Figura.22 Andamento di temperatura dopo 47,5 s (950 time steps)

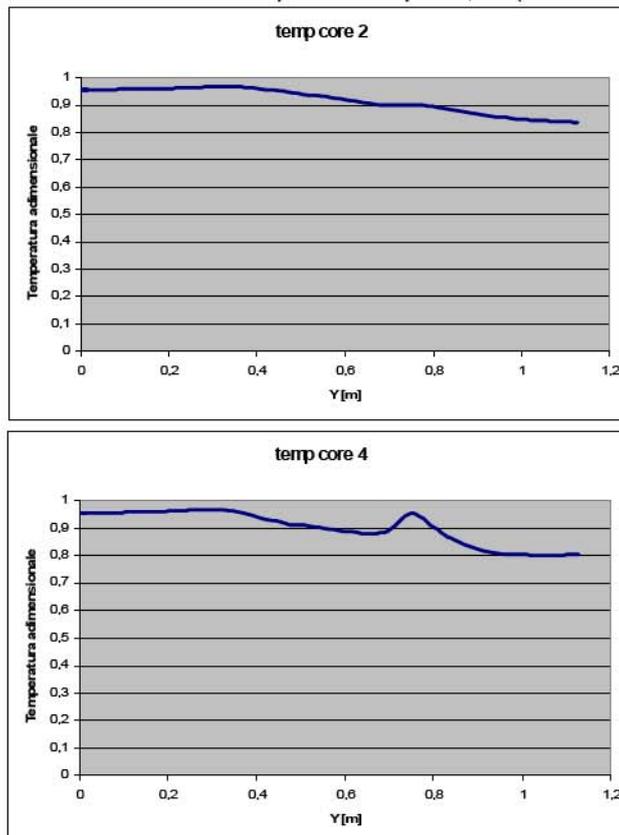


Figura.23 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 47,5 s (950 time steps)

All'interno di questo capitolo è stata presentata l'analisi dei risultati ottenuti da un sedicesimo del downcomer del reattore nucleare IRIS. Avere utilizzato solo questa porzione di volume ha consentito comunque di

simulare l'intero funzionamento del downcomer come se tutti ed otto gli ingressi venissero alimentati contemporaneamente dall'acqua a temperatura inferiore.

Avendo utilizzato una temperatura adimensionale è possibile estrapolare delle informazioni direttamente sulla concentrazione di boro. L'indice utilizzato, infatti, può essere visto come la concentrazione di boro raggiunta nei vari istanti di tempo.

In base ai risultati ottenuti e presentati si può dire che la concentrazione del "boro" non è uniforme come si vorrebbe. Lungo le linee prese in considerazione, durante i vari istanti di tempo si ha una variazione massima di concentrazione che raggiunge il 40%.

Questo potrebbe essere un problema imputabile alla restrizione e alla curvatura a monte del core. Esse infatti causano un aumento della velocità ed un distacco di vena che si traducono in una mancata uniformità già del campo di moto. Questi effetti determinano una diversificazione della concentrazione nelle varie zone che al trascorrere del tempo non presentano alcun tipo di stratificazione.

Un ulteriore problema riguarda il fatto che per ogni istante di tempo, come visibile nelle immagini 5.27 e 5.28, la concentrazione ha una variabilità anche nella terza dimensione. Questo comporta un evidente diversificazione dell'effetto utile a causa del quale si avrebbe una diversa efficacia sulla neutronica del reattore.

**CASO B** analisi in transitorio del miscelamento per le configurazioni a 1/16 e a 1/2 di downcomer per ottenere la distribuzione di temperatura nel core con cui risalire alla distribuzione della concentrazione di boro;

All'interno di questa sezione vengono presentati i risultati relativi a mezzo downcomer, sufficiente a simularne il comportamento con un numero di ingressi funzionanti inferiore ad otto. Tale situazione non era riducibile ad un dominio di dimensioni inferiori poiché caratterizzata da una periodicità di 1/2 reattore.

Verrà presentata in breve la parte in stazionario per dimostrare l'uguaglianza dei risultati dei differenti domini utilizzati, per poi lasciare spazio alla simulazione del transitorio.

Anche per l'analisi del transitorio saranno utilizzate le medesime visualizzazioni.

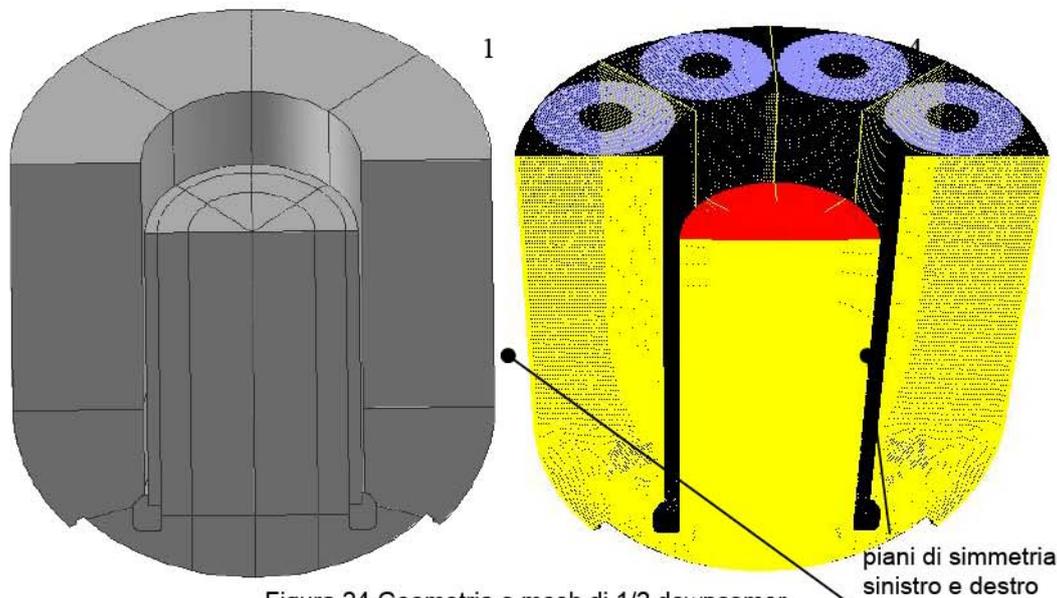


Figura.24 Geometria e mesh di 1/2 downcomer

#### Analisi stazionaria

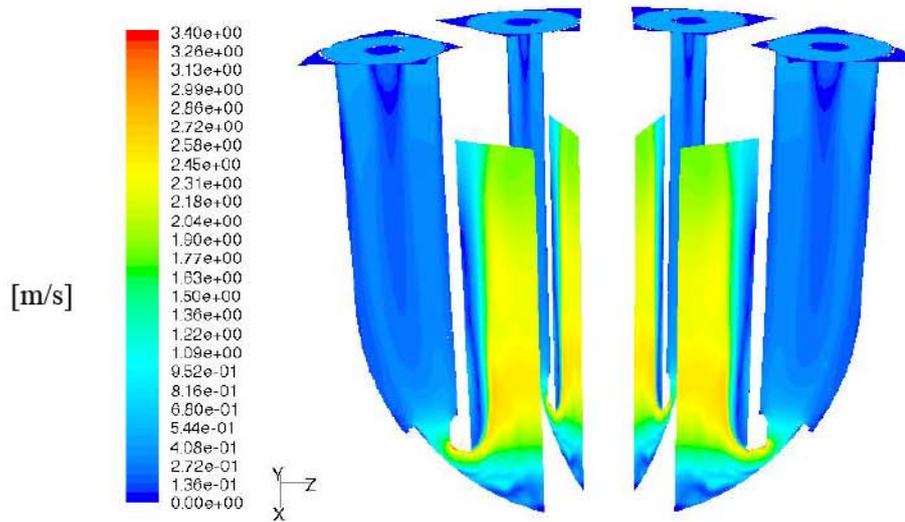


Figura.25 Andamenti della velocità

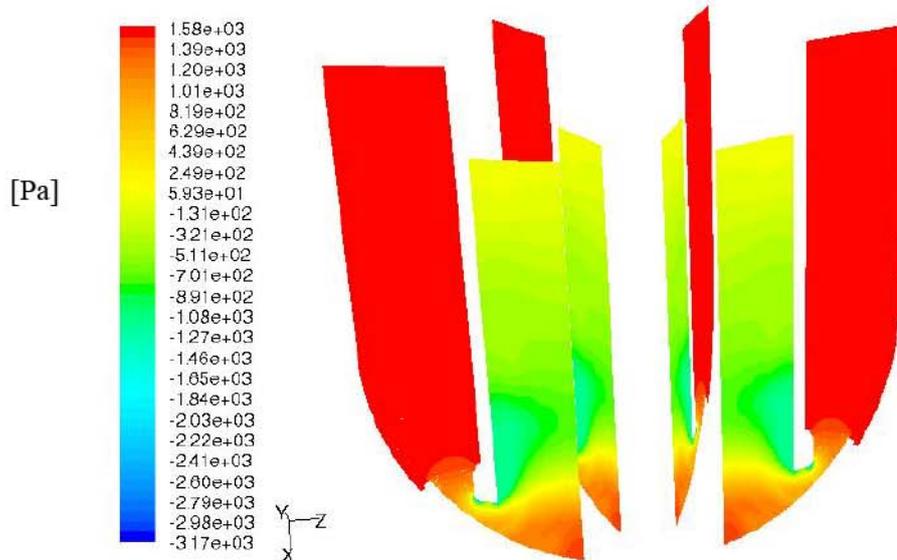


Figura.26 Andamenti della pressione

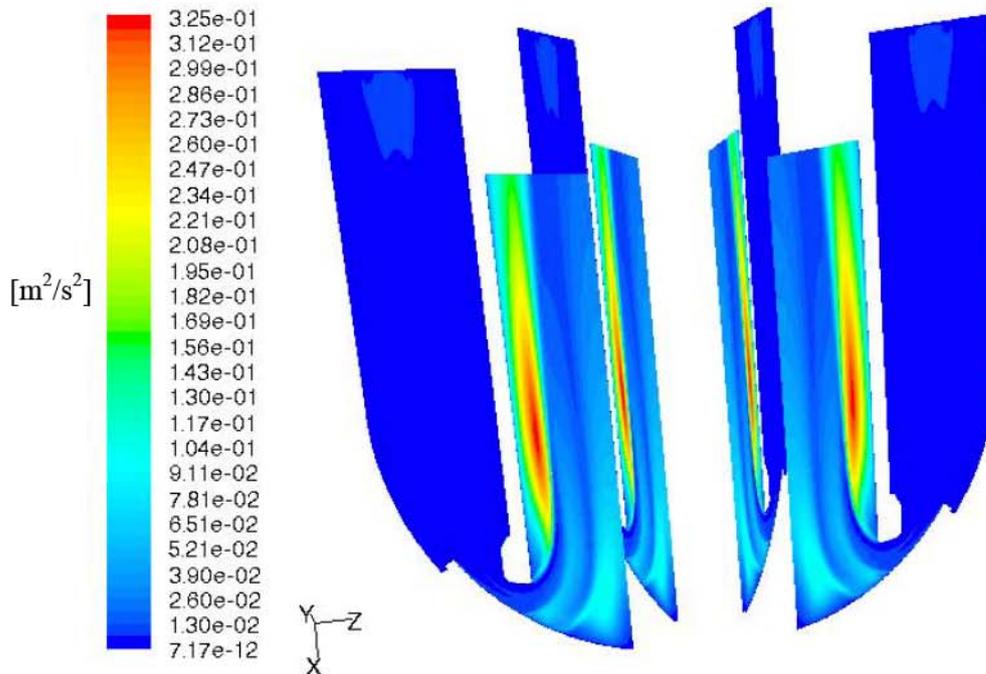


Figura.27 Andamenti dell'energia cinetica turbolenta

#### Analisi in transitorio

L'analisi in transitorio analizzata in questo paragrafo, riguarda l'immissione di acqua a differente temperatura da sei ingressi sul totale di otto dell'intero dominio. Nelle immagini che verranno presentate si potrà osservare l'immissione solo da tre ingressi perchè si è utilizzata la condizione di simmetria per cui, sull'intero downcomer, gli ingressi realmente attivi sono il doppio.

gli ingressi realmente attivi sono il doppio.

Durante la trattazione verranno indicati come "attivi" gli ingressi interessati dall'immissione della acqua a diversa temperatura. Rispetto all'analisi del sedicesimo, con il quale si voleva studiare la distribuzione del boro durante un transitorio che interessasse l'utilizzo di tutti e otto gli ingressi, in questo caso si vuole osservare ciò che accade in una condizione di immissione parziale. Durante questa analisi si vogliono osservare le distribuzioni all'interno dei settori interessati dall'immissione ma, specialmente, in quello non attivo.

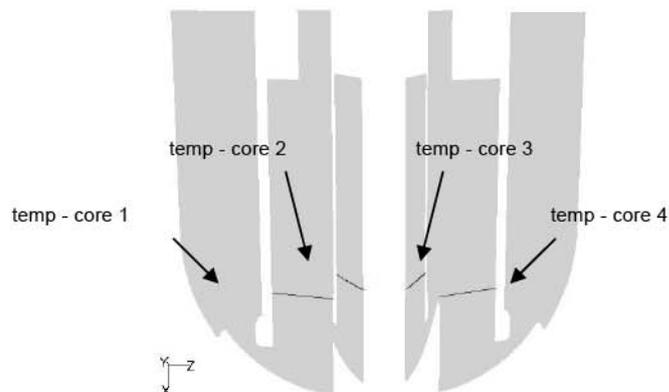


Figura.28 Linee utilizzate per la distribuzione della temperatura

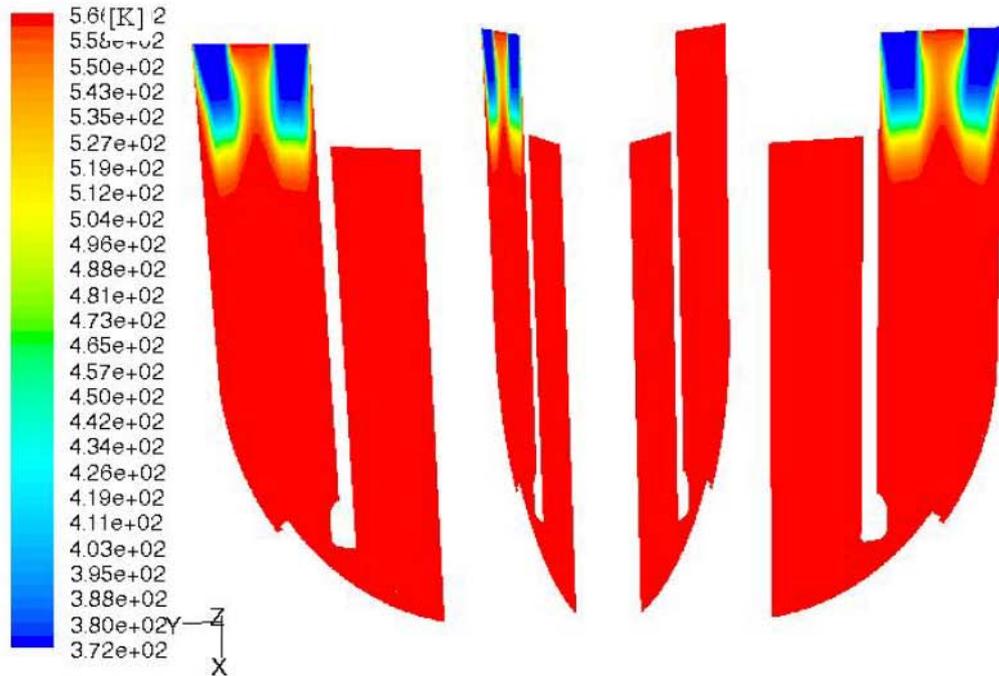


Figura.29 Andamento di temperatura dopo 4 s (20 time steps)

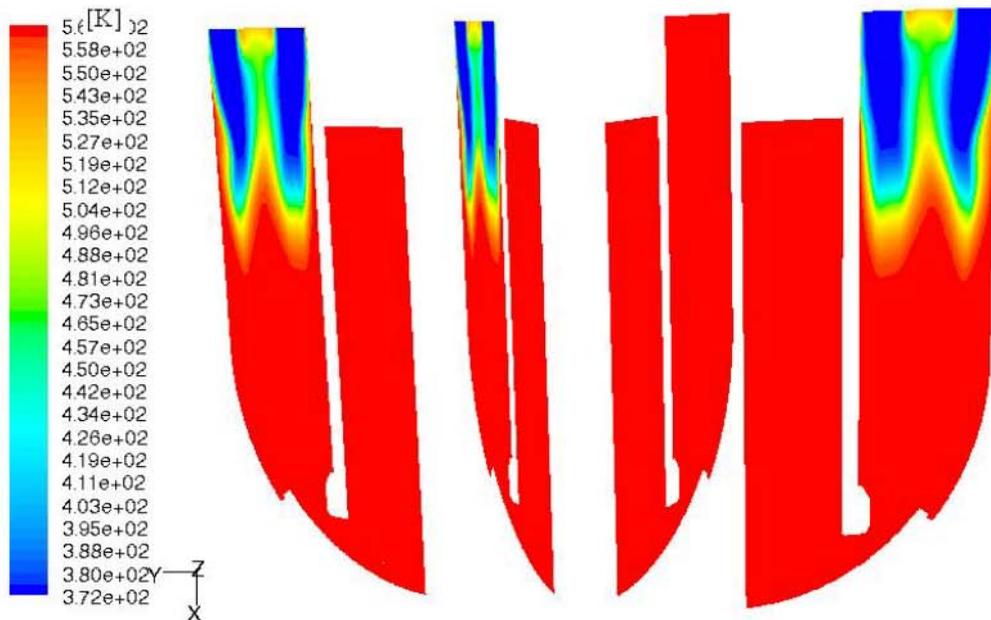


Figura.30 Andamento di temperatura dopo 8 s (40 time steps)

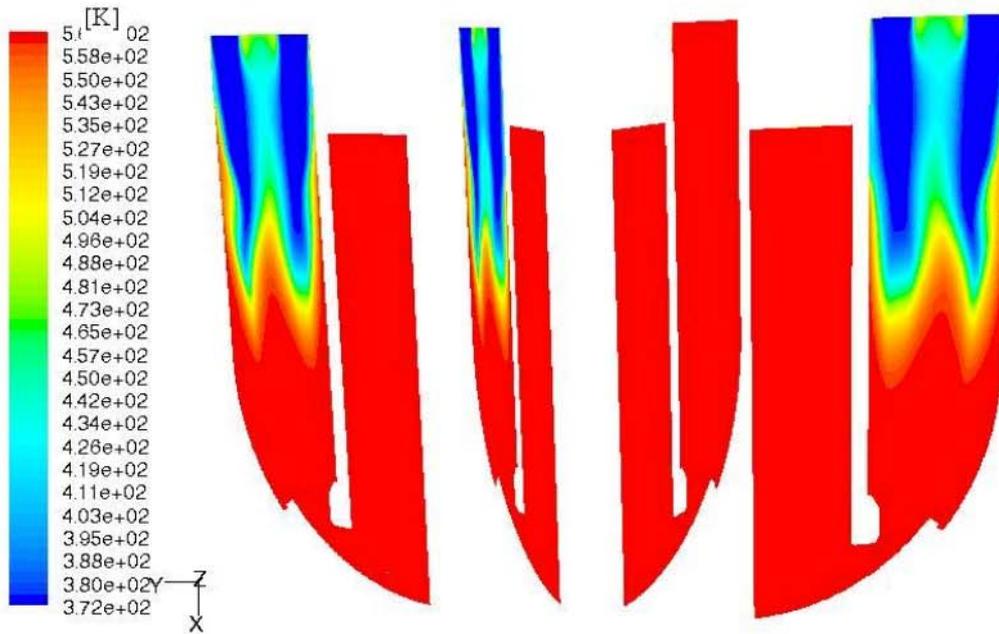


Figura.31 Andamento di temperatura dopo 12 s (60 time steps)

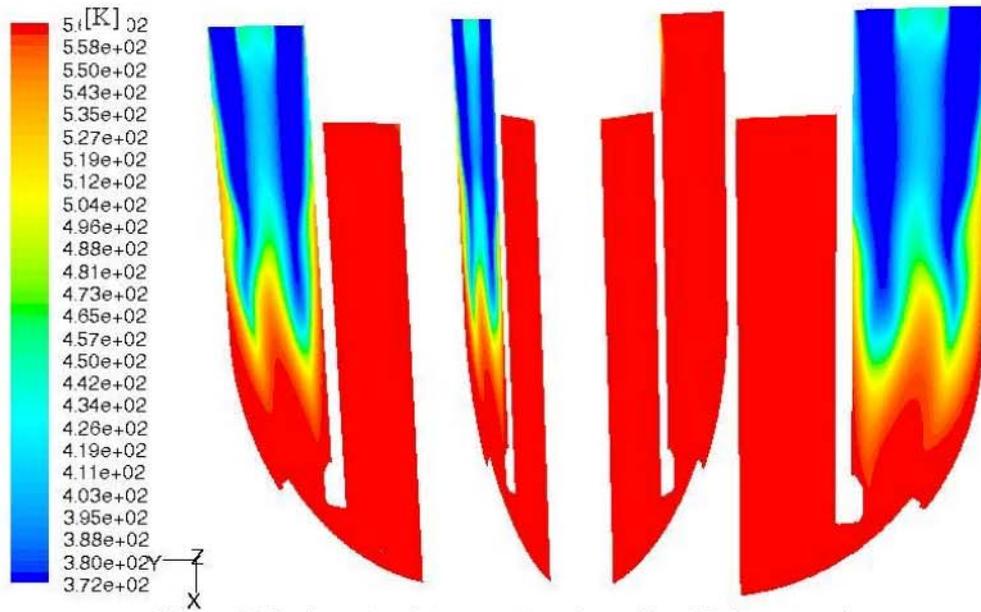


Figura.32 Andamento di temperatura dopo 16 s (80 time steps)

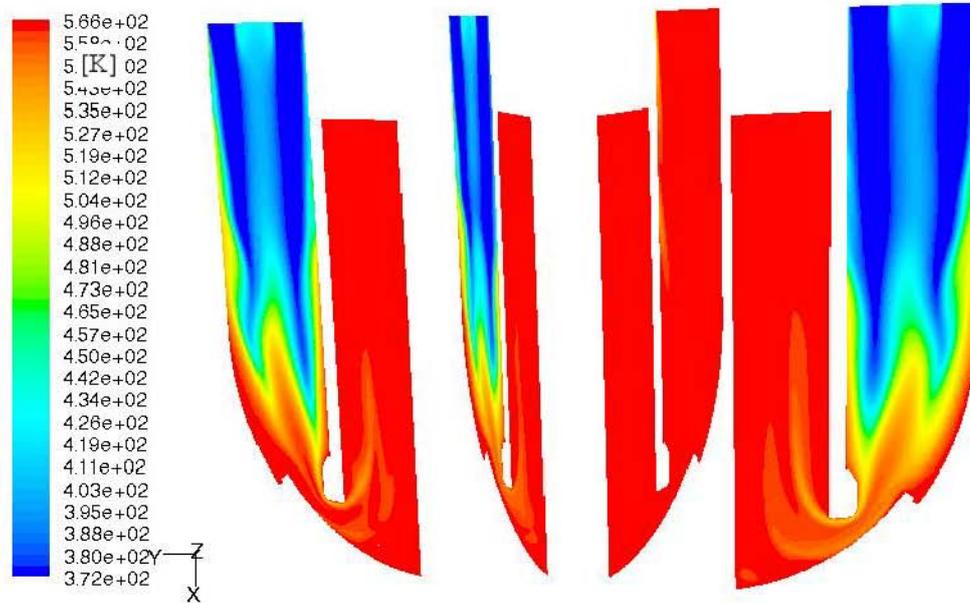


Figura.33 Andamento di temperatura dopo 20 s (100 time steps)

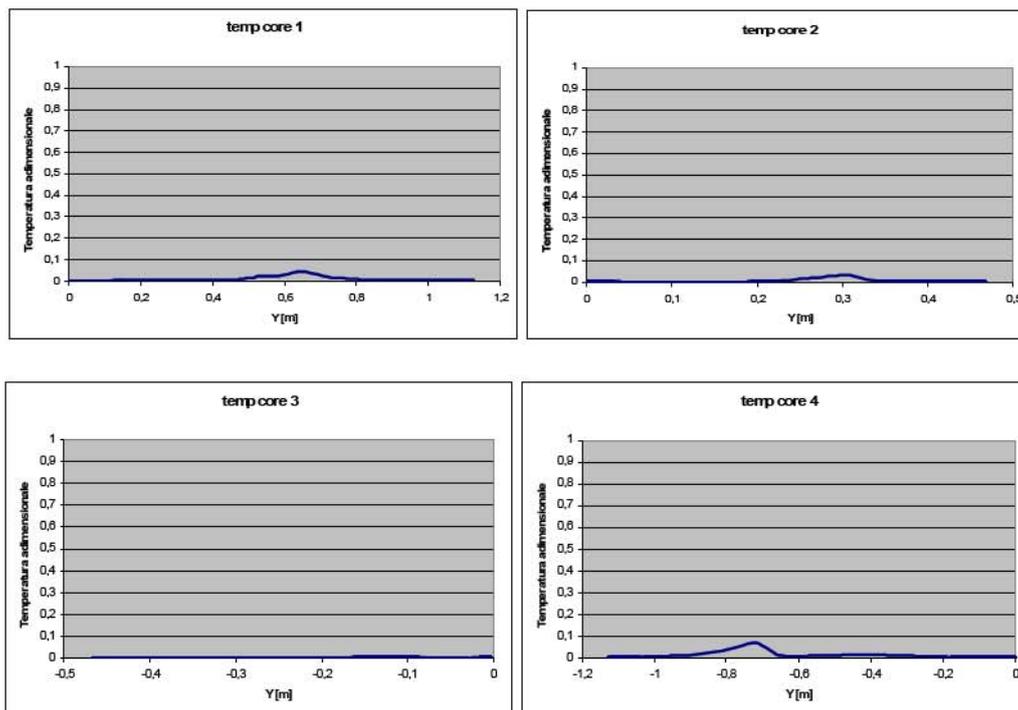


Figura.34 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 20 s (100 time steps)

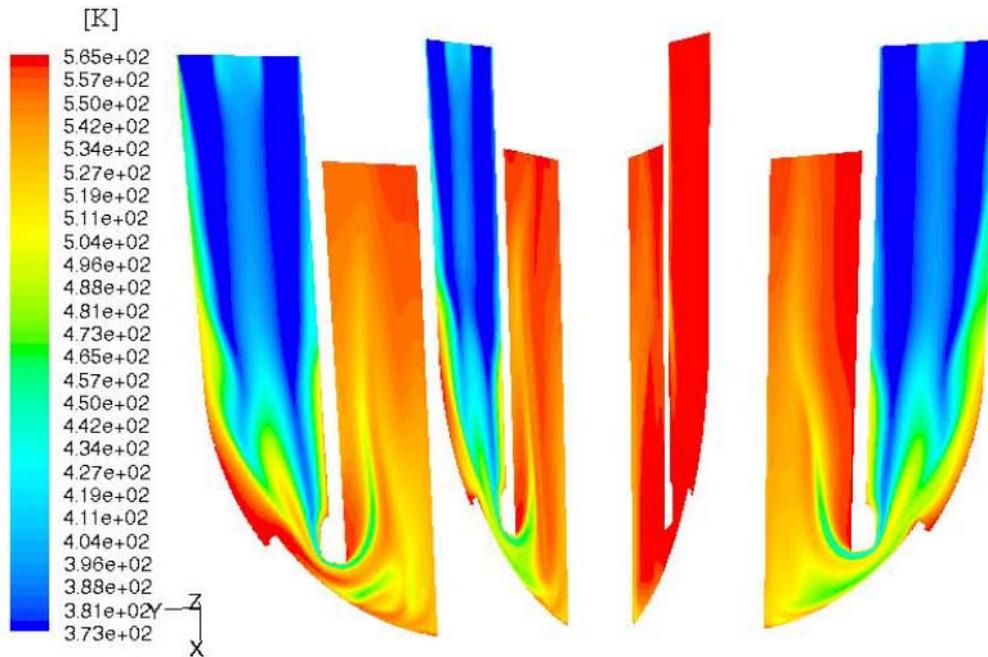


Figura.35 Andamento di temperatura dopo 24 s (120 time steps)

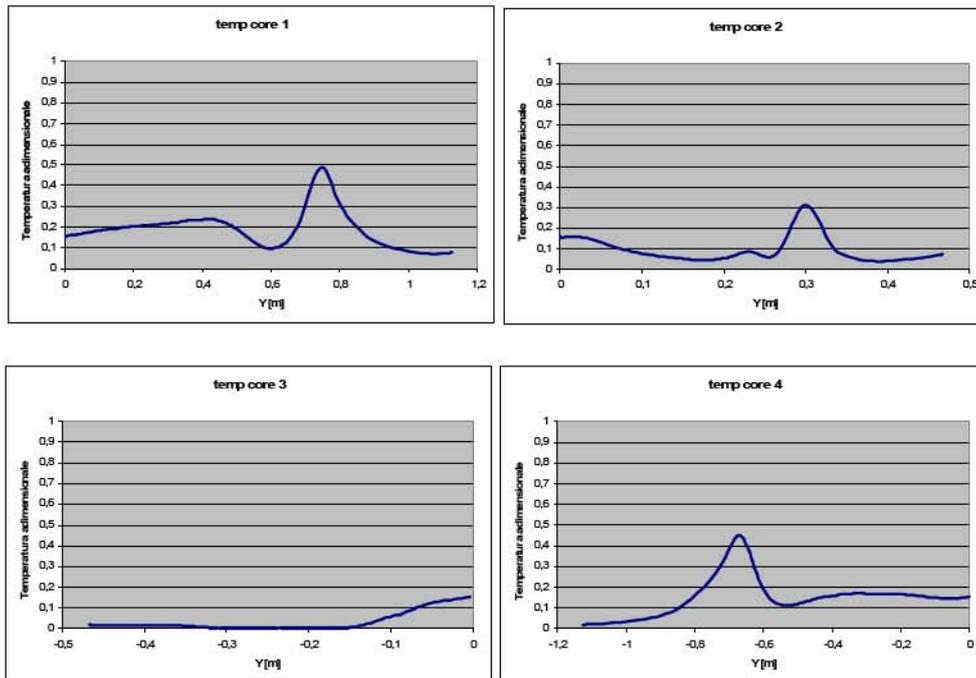


Figura.36 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 24 s (120 time steps)

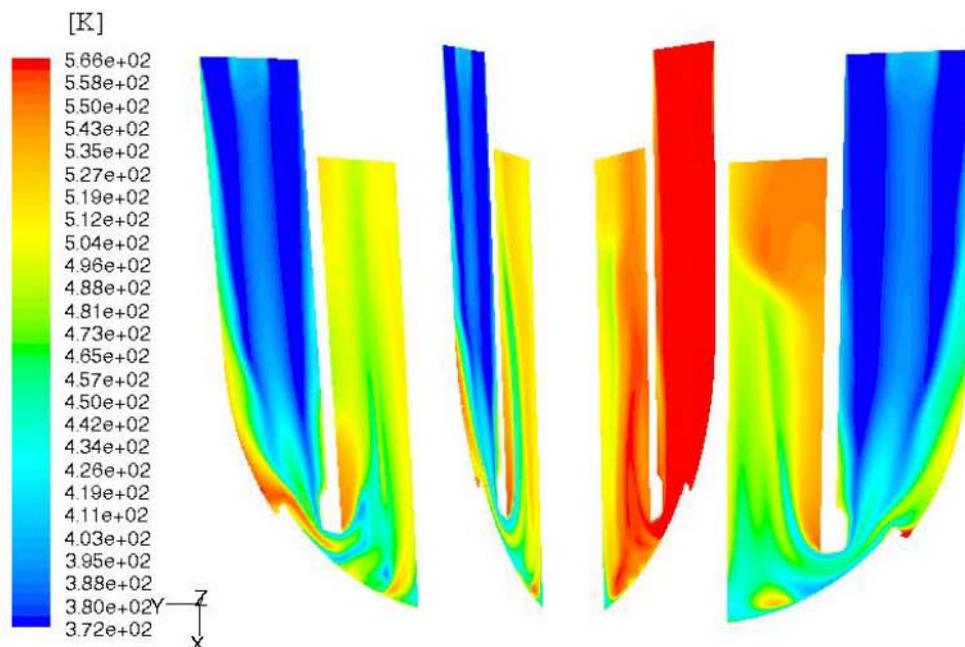


Figura.37 Andamento di temperatura dopo 28 s (140 time steps)

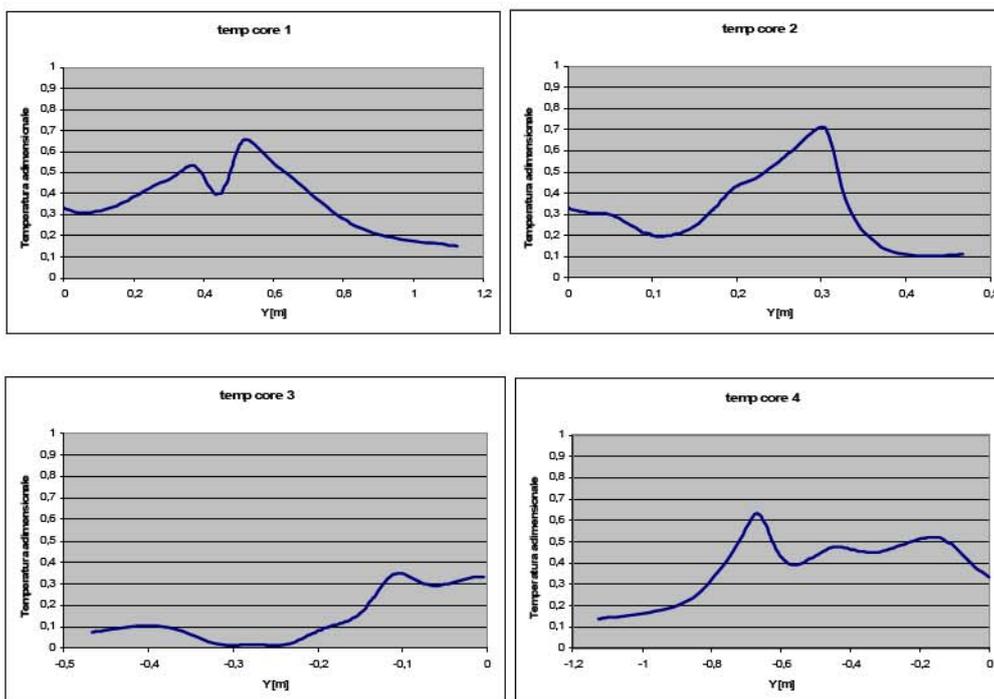


Figura.38 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 28 s (140 time steps)

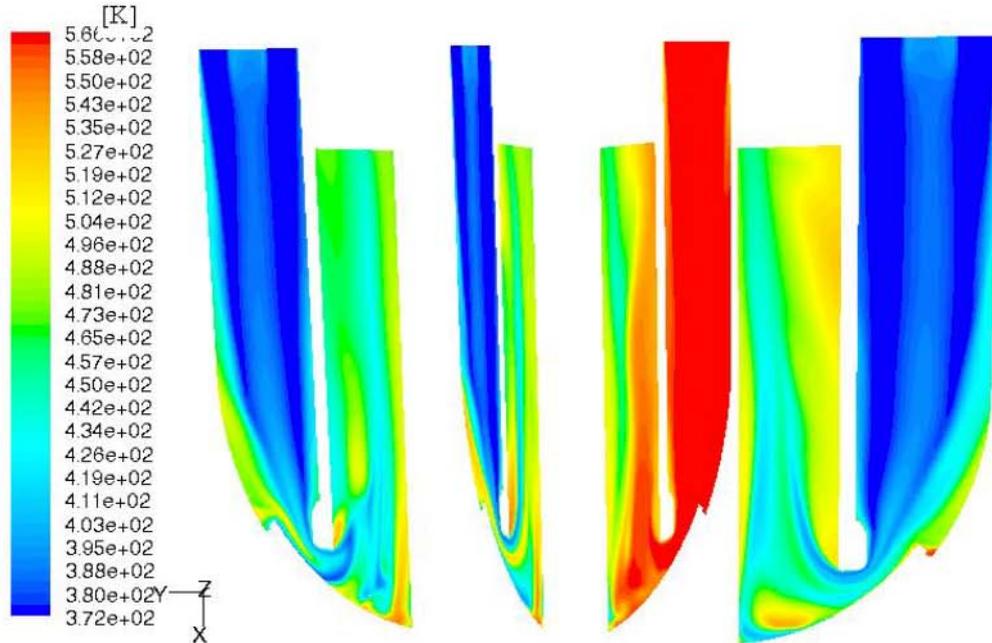


Figura.39 Andamento di temperatura dopo 32 s (160 time steps)

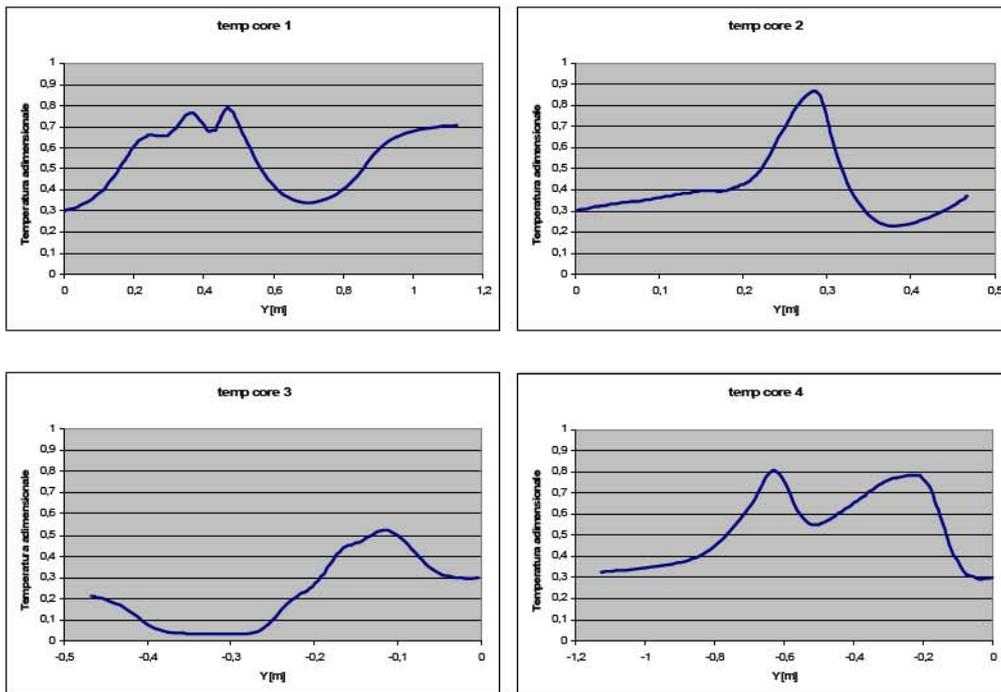


Figura.40 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 32 s (160 time steps)

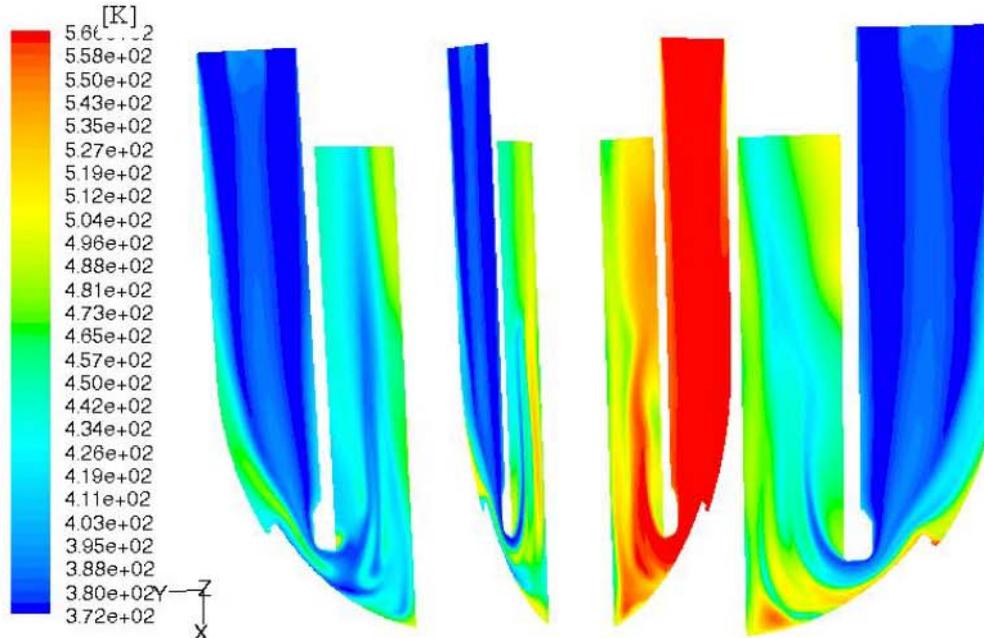


Figura.41 Andamento di temperatura dopo 36 s (180 time steps)

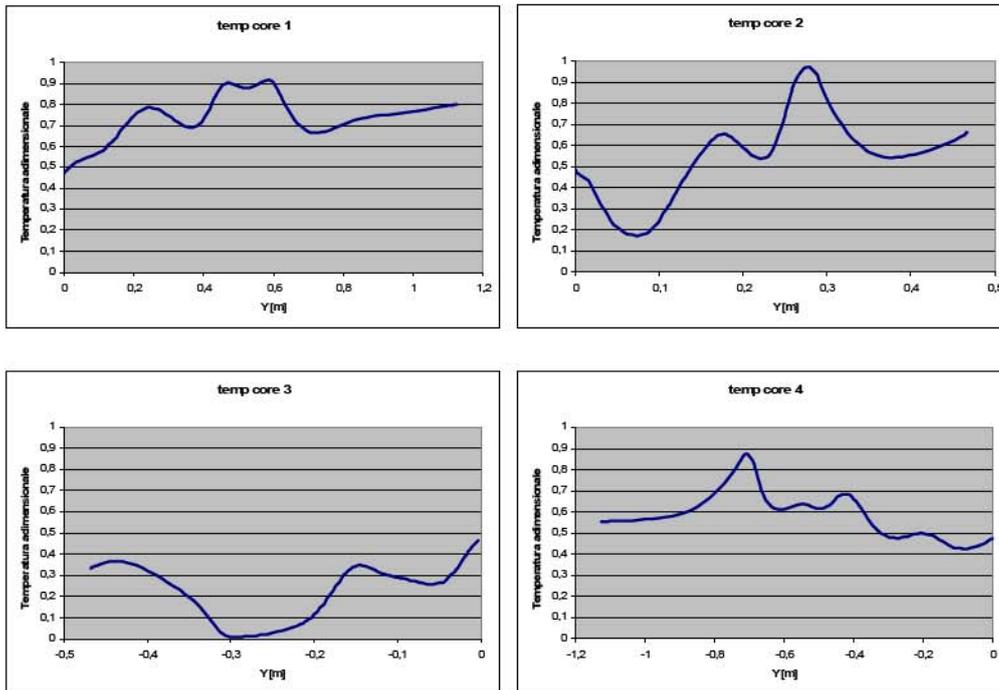


Figura.42 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 36 s (180 time steps)

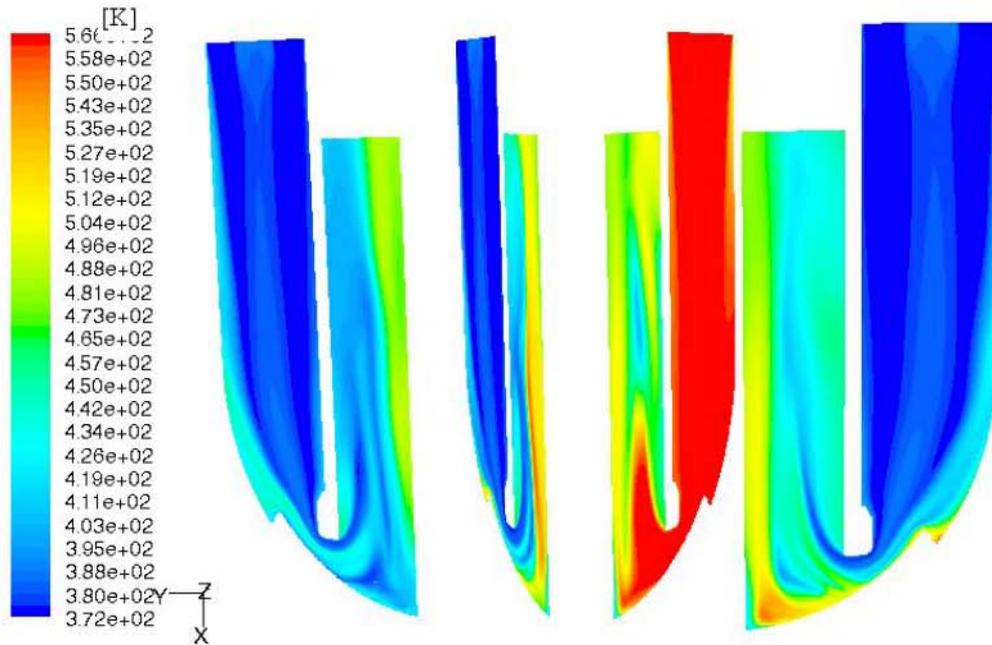


Figura.43 Andamento di temperatura dopo 40 s (200 time steps)

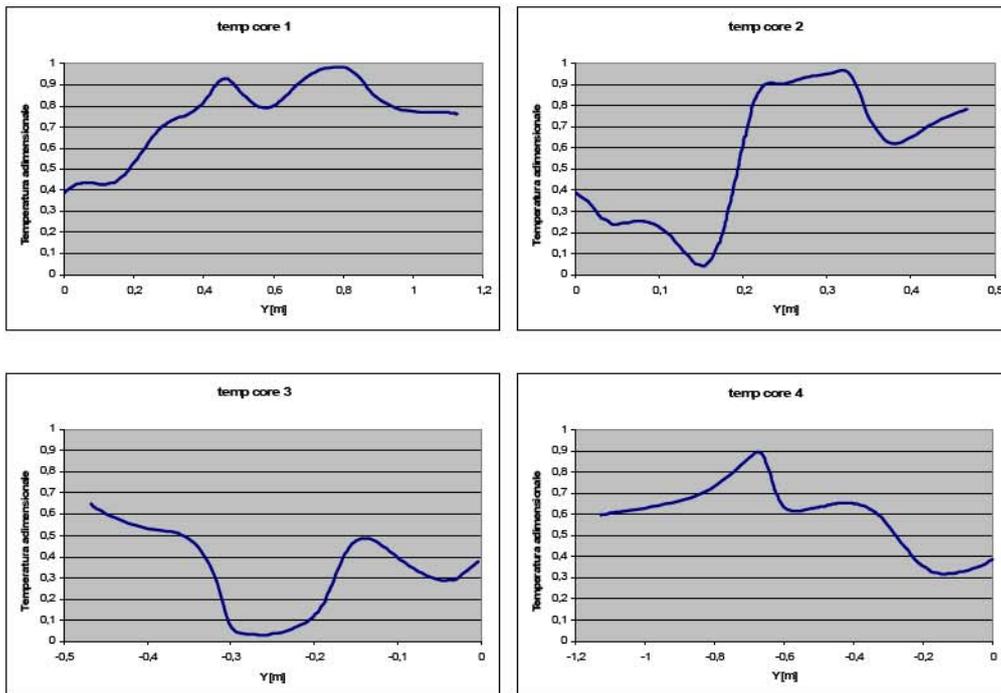


Figura.44 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 40 s (200 time steps)

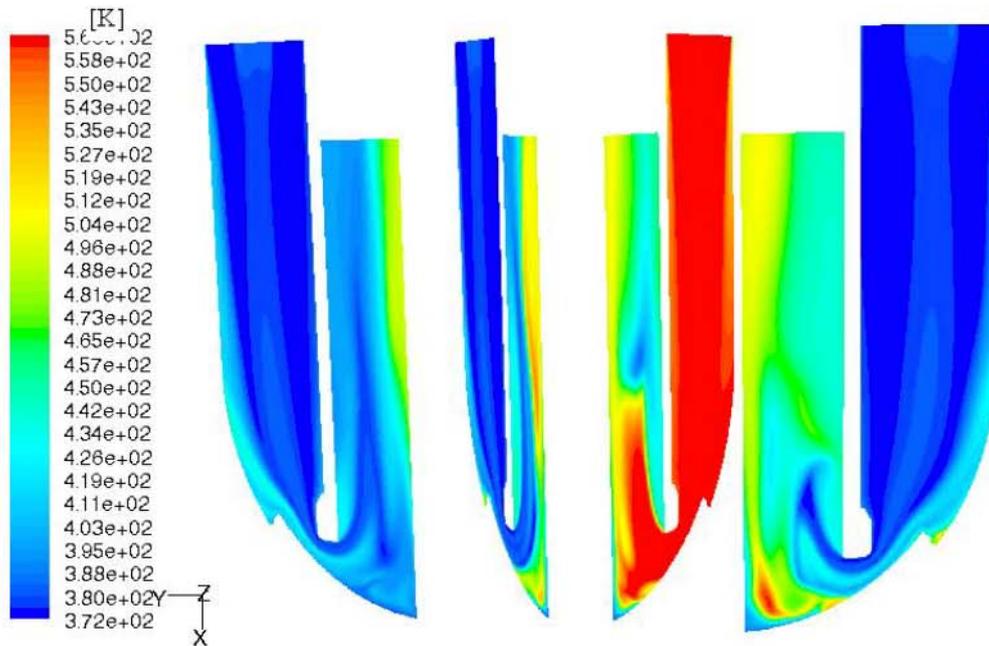


Figura.45 Andamento di temperatura dopo 44 s (220 time steps)

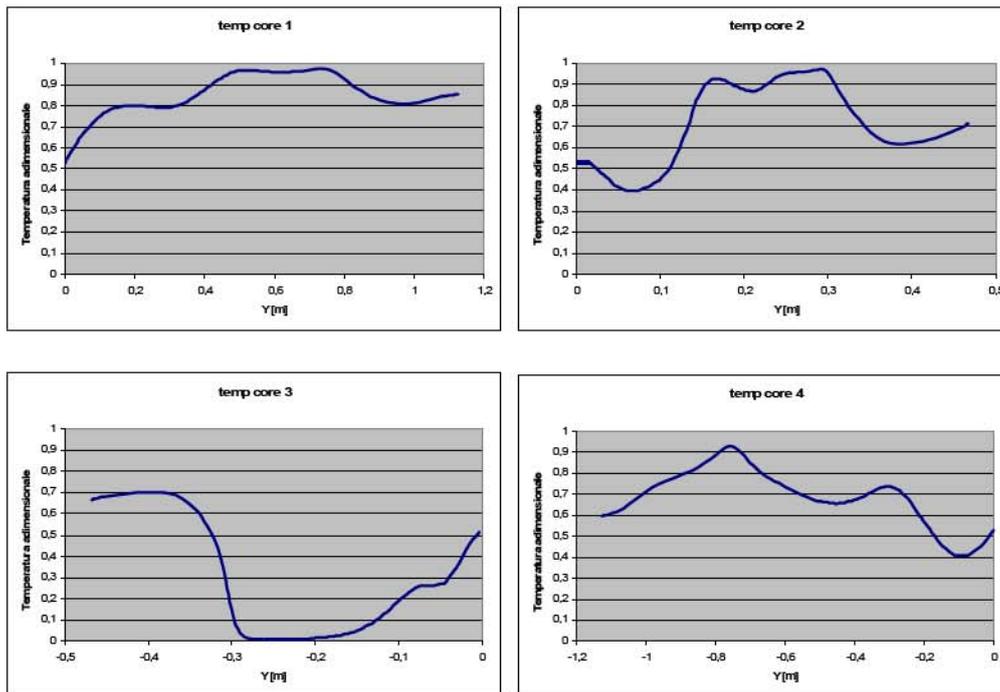


Figura.46 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 44 s (220 time steps)

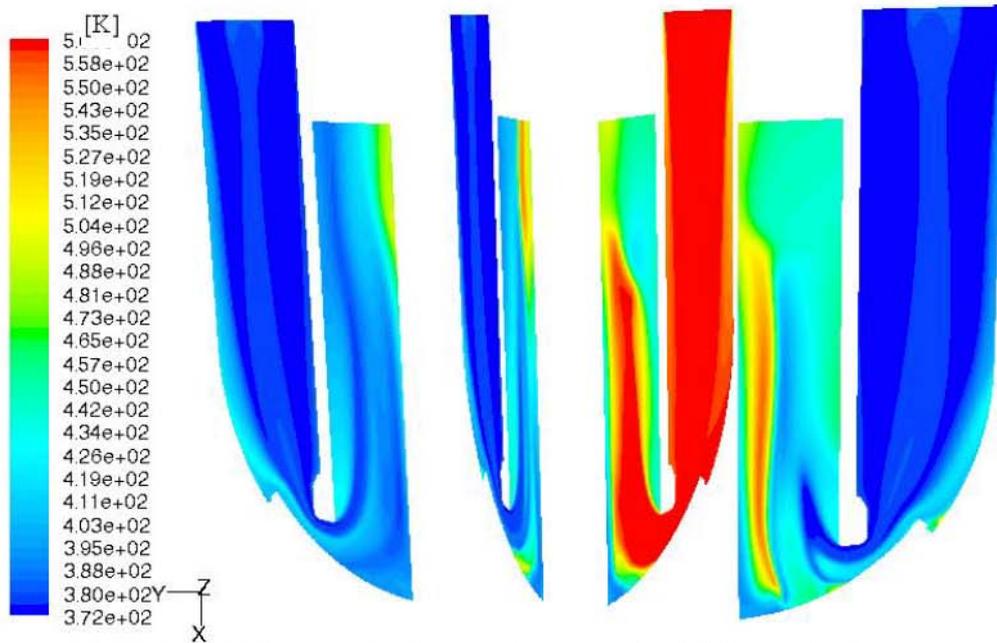


Figura.47 Andamento di temperatura dopo 48 s (240 time steps)

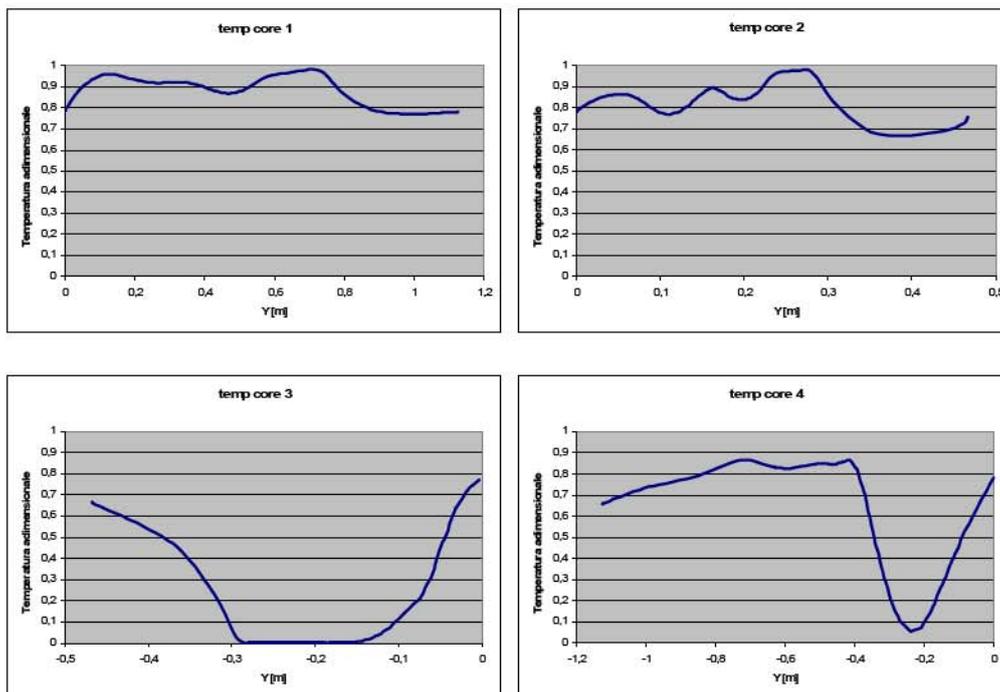


Figura.48 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 48 s (240 time steps)

Come si può osservare dalle immagini anche in questo caso, sia per i settori attivi che per quello non attivo, la distribuzione della temperatura non è uniforme.



Dalle immagini e dai diagrammi è possibile vedere che i settori si comportano tutti in modo differente perchè si trovano ad interagire con condizioni distinte. Questa situazione, infatti, non è simulabile se non con un dominio di questo tipo.

Ma la parte più interessante riguarda sicuramente l'interazione tra i settori attivi e quello non attivo. Osservando la sequenza delle immagini, infatti, è possibile notare che essi vengono poco influenzati dal settore non attivo nel senso che la concentrazione continua ad aumentare risentendo poco del comportamento del terzo ingresso.

Per il settore non attivo le immagini dimostrano infatti che si ha un trasporto della grandezza anche verso il settore con immissione a concentrazione nulla che subisce, quindi, un "miscelamento passivo". L'effetto appena citato, però, viene reso vano dalla continua immissione di acqua a concentrazione nulla che influenza fortemente la distribuzione della temperatura.

Per il settore non attivo, infatti, la concentrazione non raggiunge nemmeno il 50% se non dopo 40 s e solo in alcune zone.

**CASO C simulazione stazionaria e analisi in transitorio per le configurazioni a 1/16 di downcomer per ottenere le conseguenze sulla distribuzione di temperatura e valutare gli effetti di galleggiamento (buoyancy);**

All'interno di questa sezione viene ripresa l'analisi di un sedicesimo del downcomer di IRIS per studiare l'effetto delle buoyancy sul comportamento fluidodinamico del moderatore.

Prima di procedere con l'analisi dei risultati è importante spiegare il motivo per il quale si rende necessario tale studio.

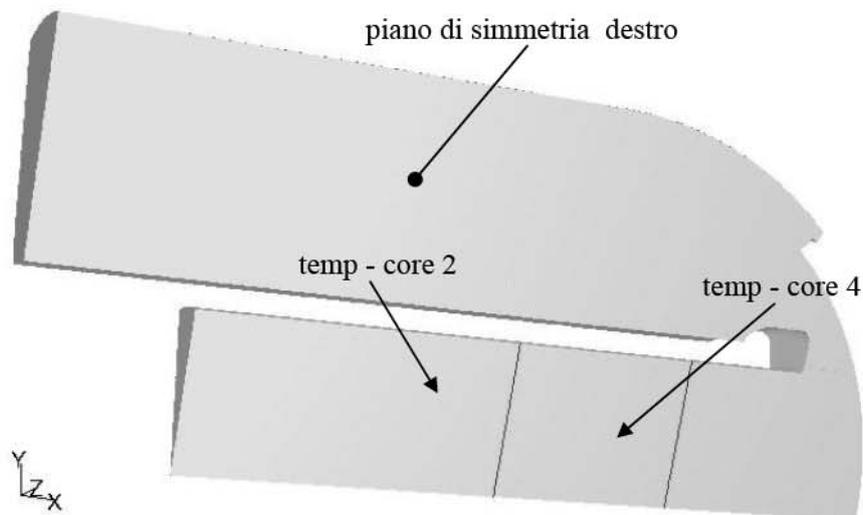


Figura.49 Linee di riferimento per la distribuzione della temperatura adimensionale

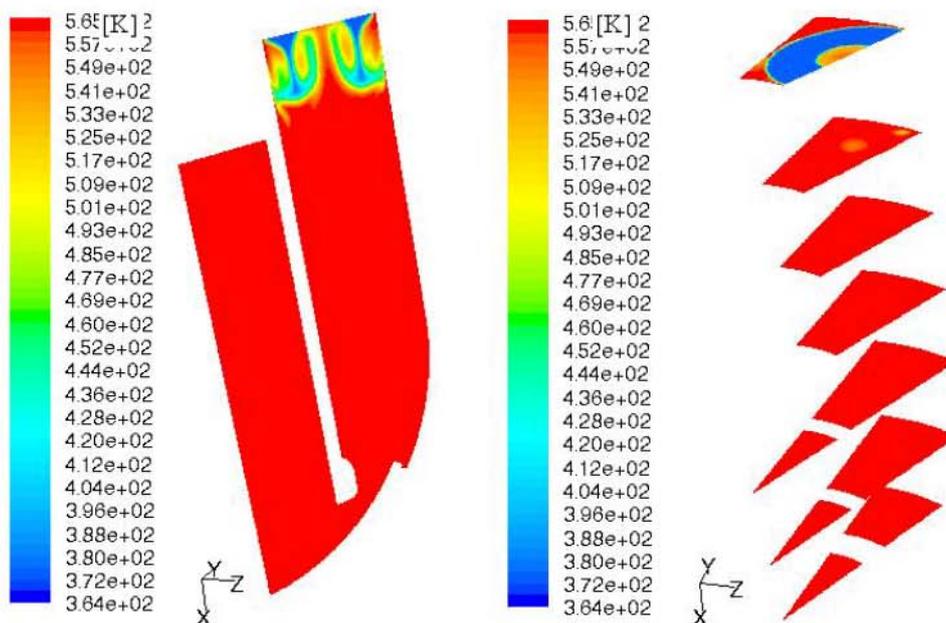


Figura.50 Andamento della temperatura dopo 2,5 s (50 time steps)

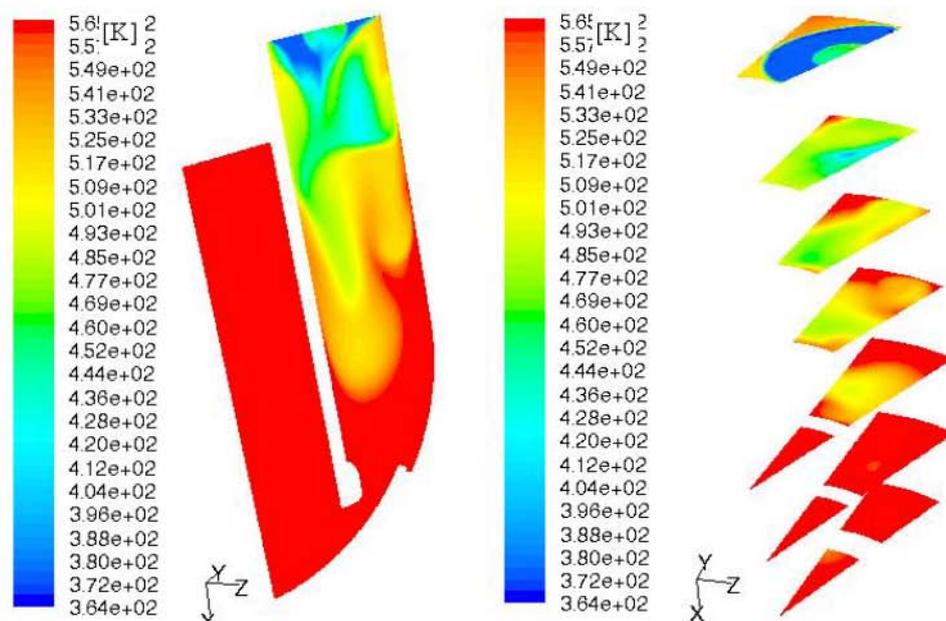


Figura.51 Andamento della temperatura dopo 7,5 s (150 time steps)

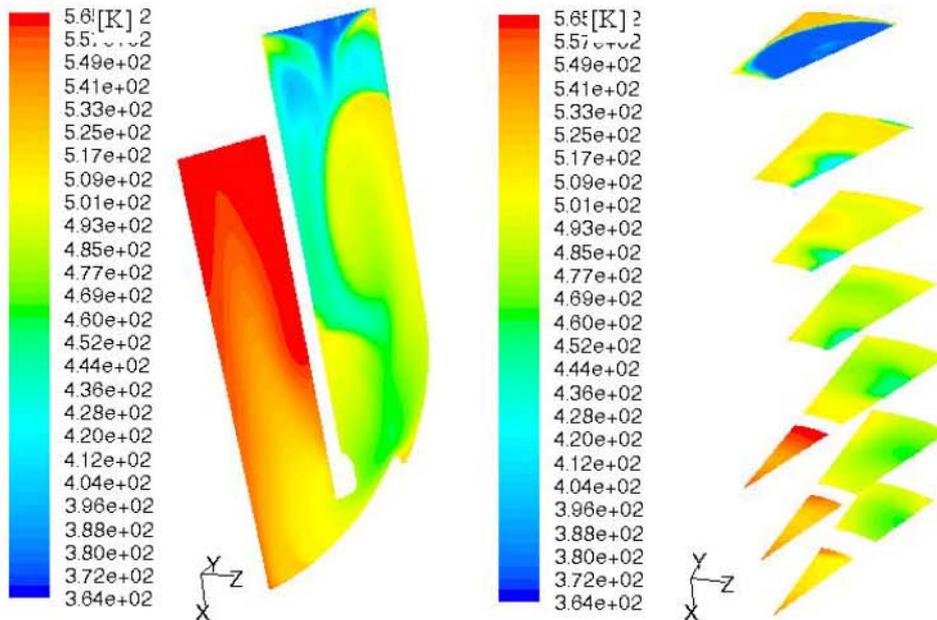


Figura.52 Andamento della temperatura dopo 12,5 s (250 time steps)

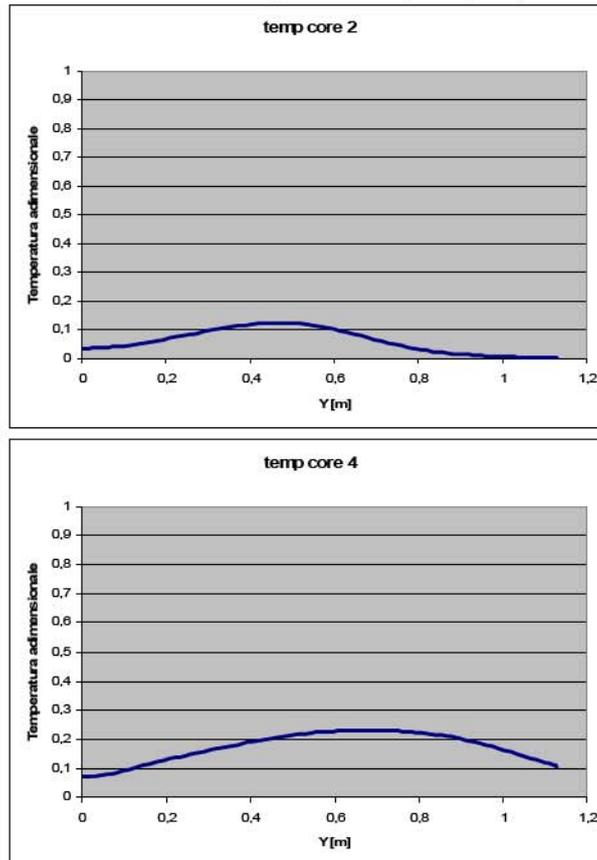


Figura.53 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 12,5 s (250 time steps)

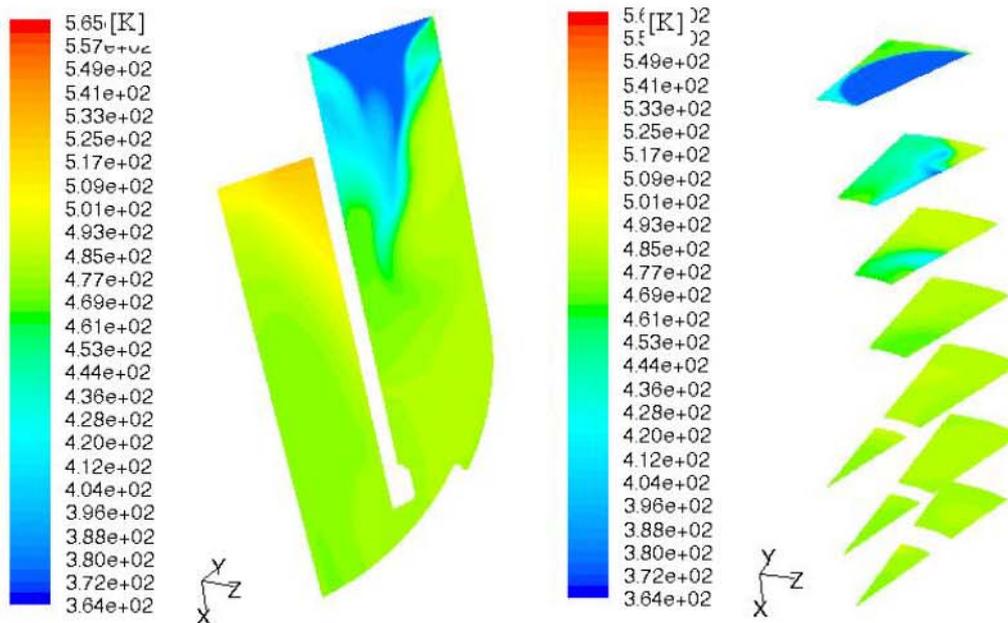


Figura.54 - Andamento della temperatura dopo 17,5 s (350 time steps)

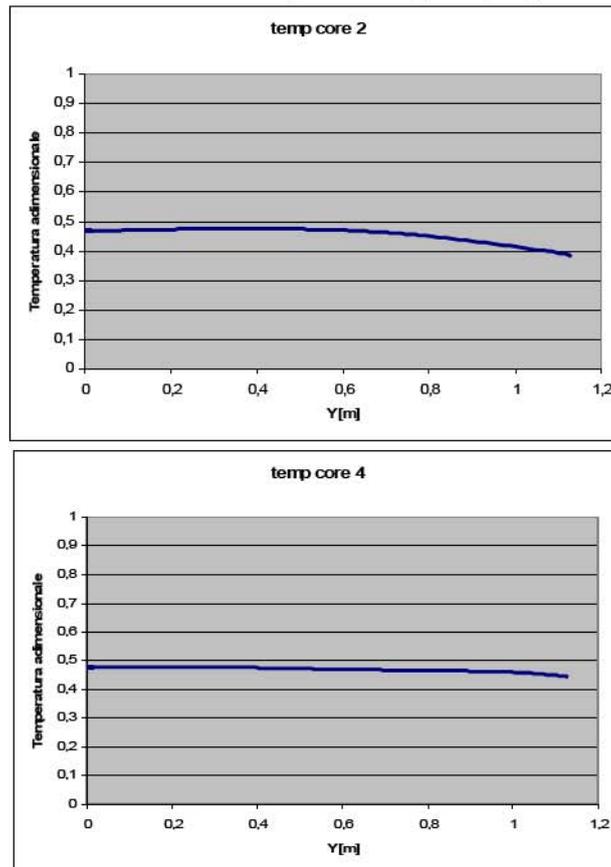


Figura.55 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 17,5 s (350 time steps)

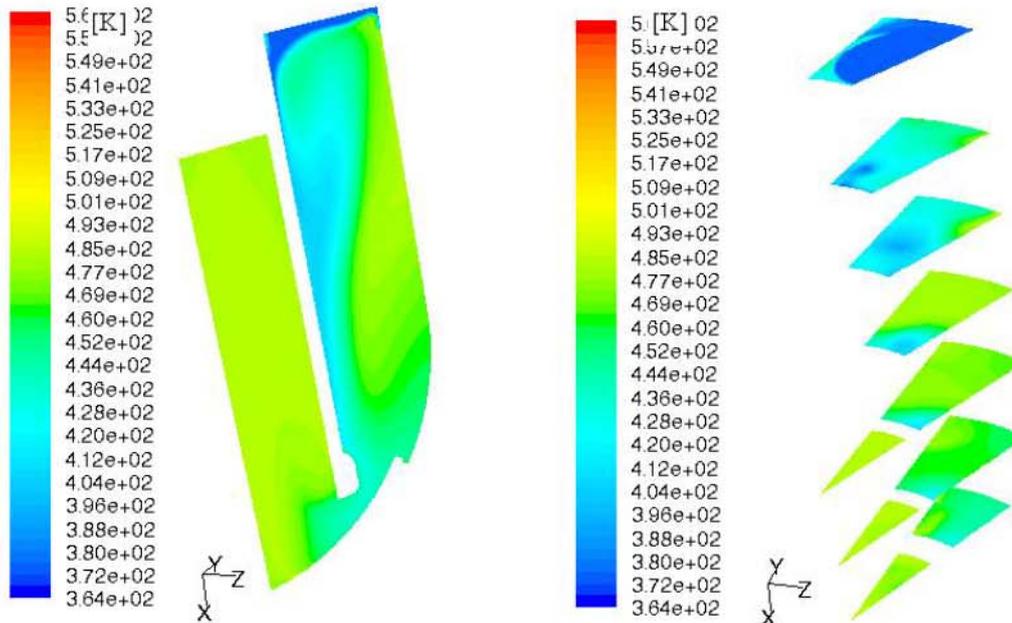


Figura.56 Andamento della temperatura dopo 22,5 s (450 time steps)

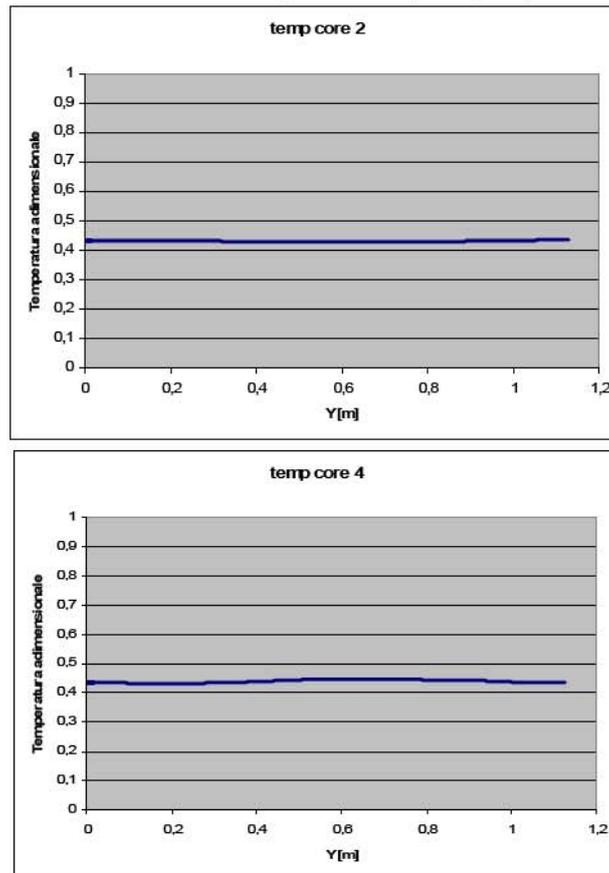


Figura.57 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 22,5 s (450 time steps)

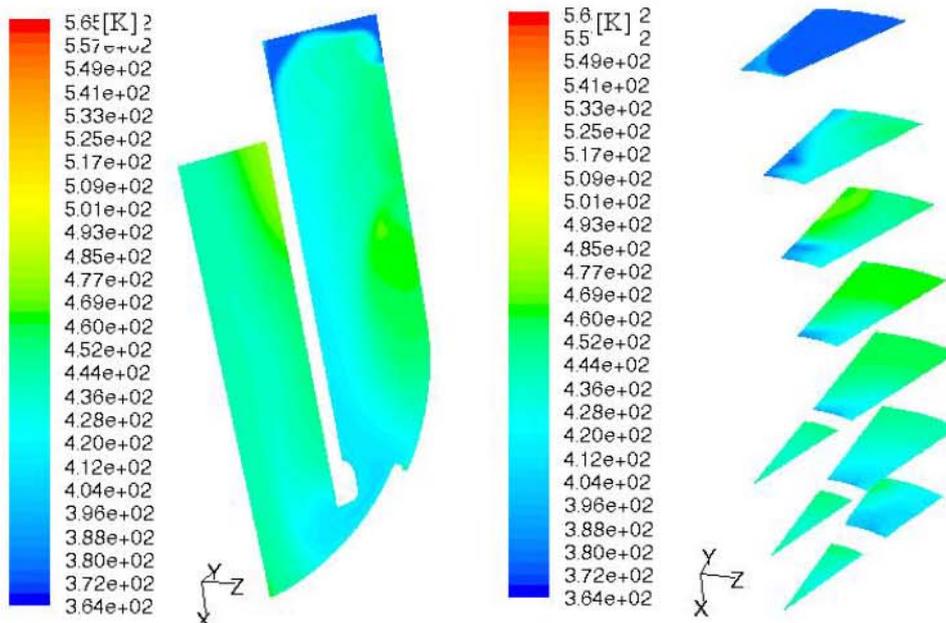


Figura.58 della temperatura dopo 27,5 s (550 time steps)

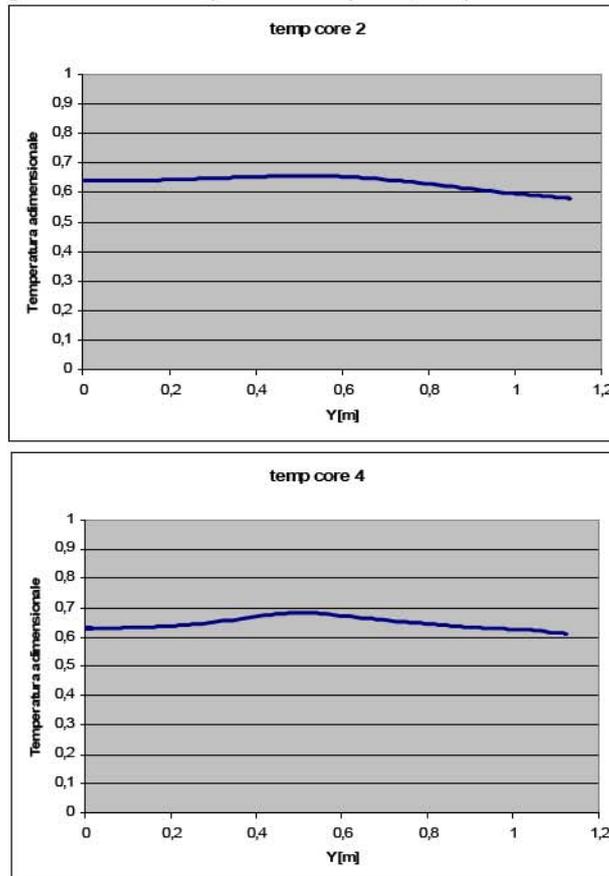


Figura.59 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 27,5 s (550 time steps)

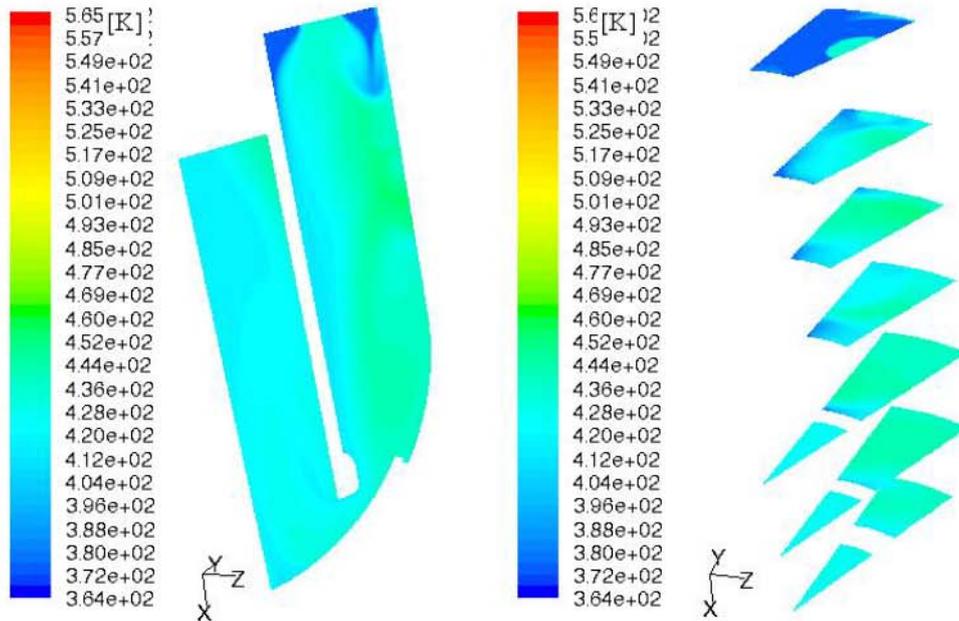


Figura.60 Andamento della temperatura dopo 32,5 s (650 time steps)

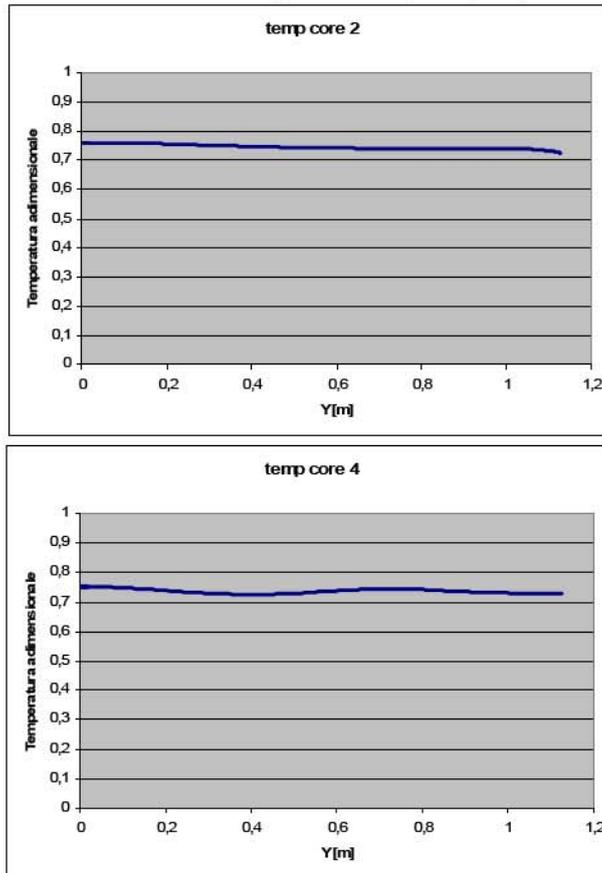


Figura.61 - Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 32,5 s (650 time steps)

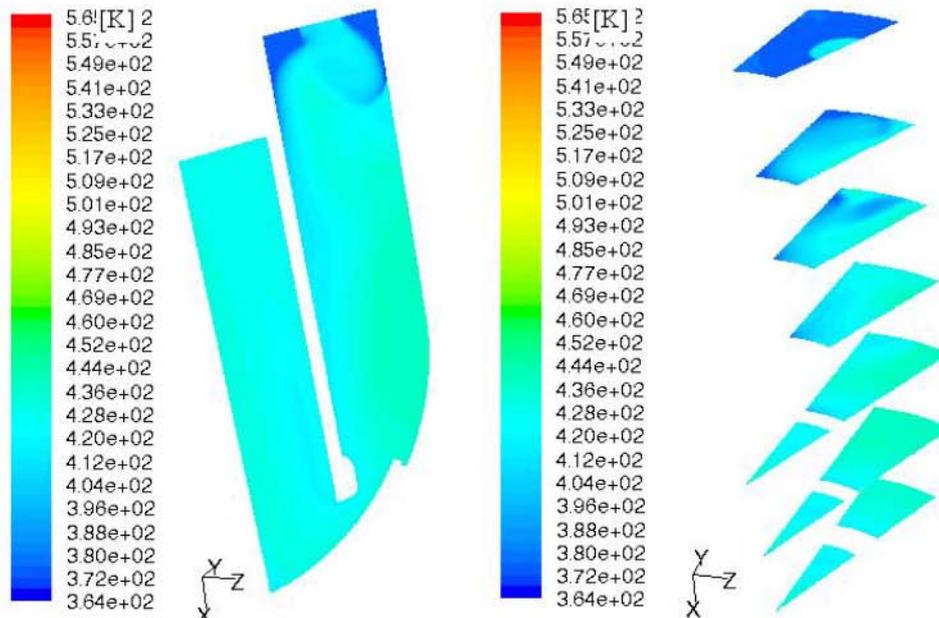


Figura.62 Andamento della temperatura dopo 37,5 s (750 time steps)

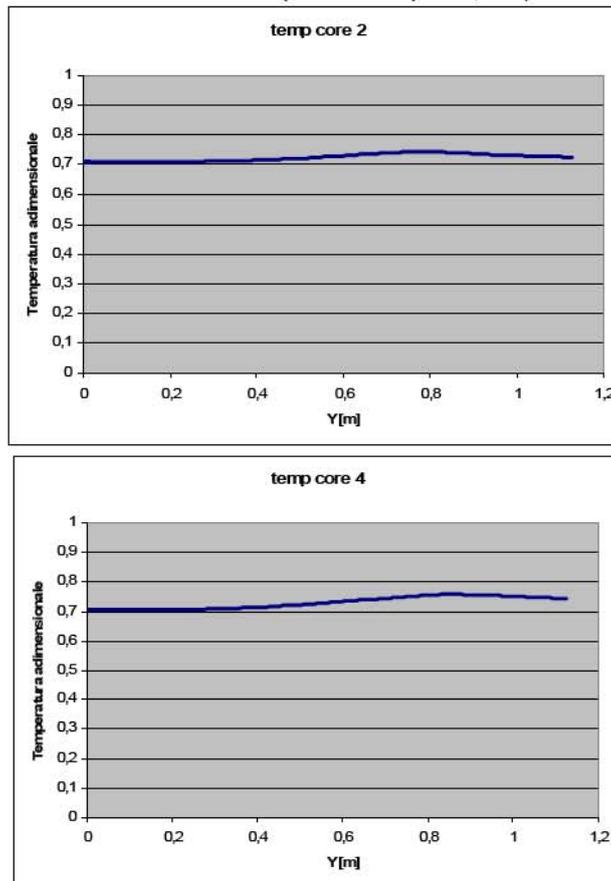


Figura.63 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 37,5 s (750 time steps)

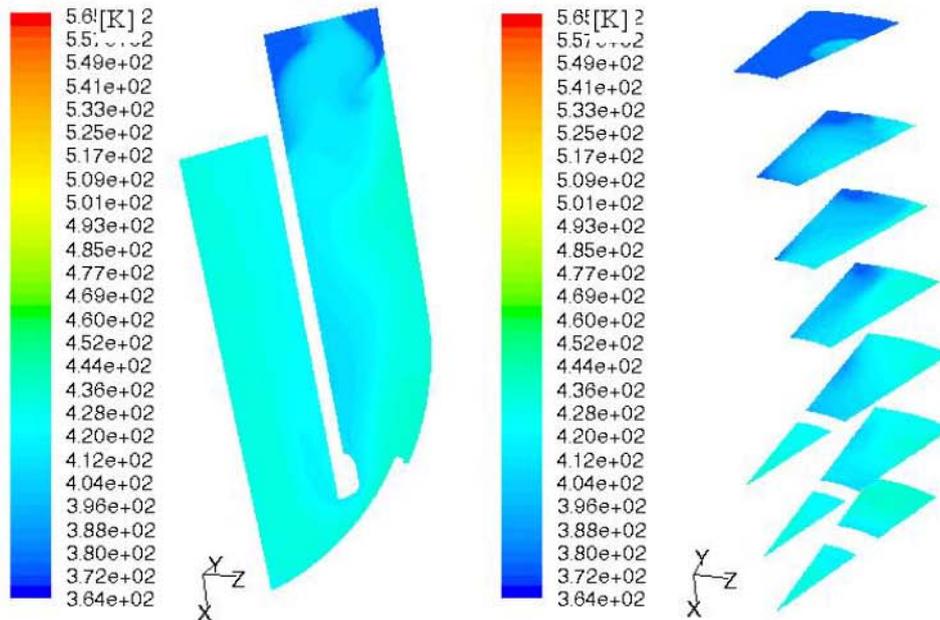


Figura.64 Andamento della temperatura dopo 42,5 s (850 time steps)

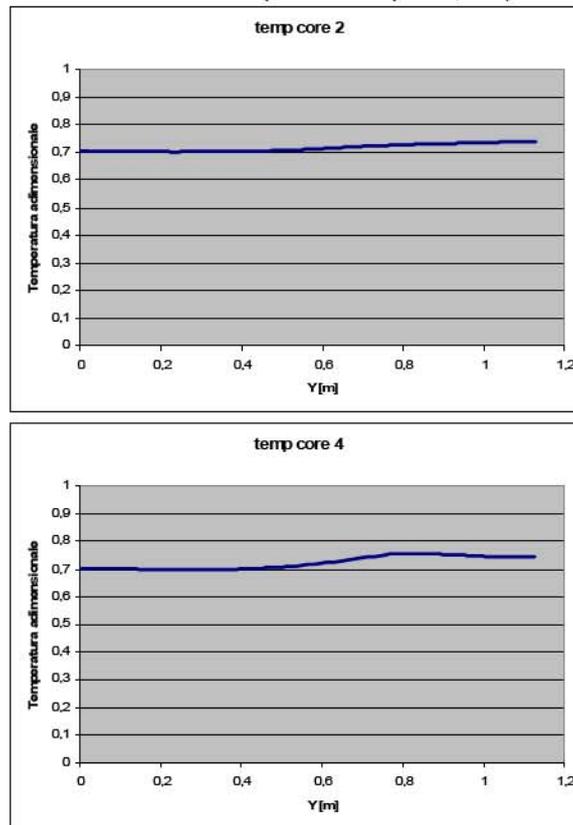


Figura.65 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 42,5 s (850 time steps)

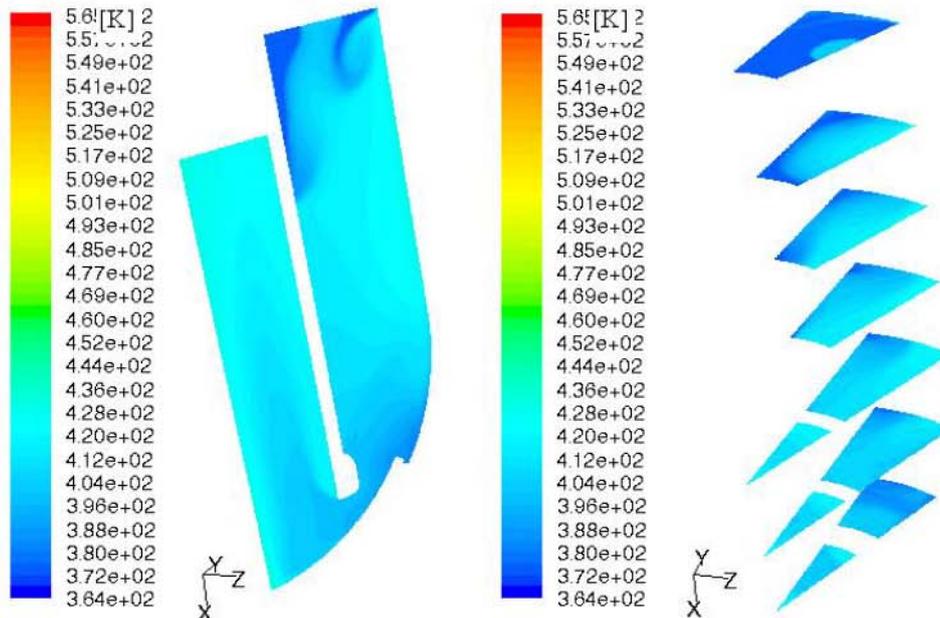


Figura.66 Andamento della temperatura dopo 47,5 s (950 time steps)

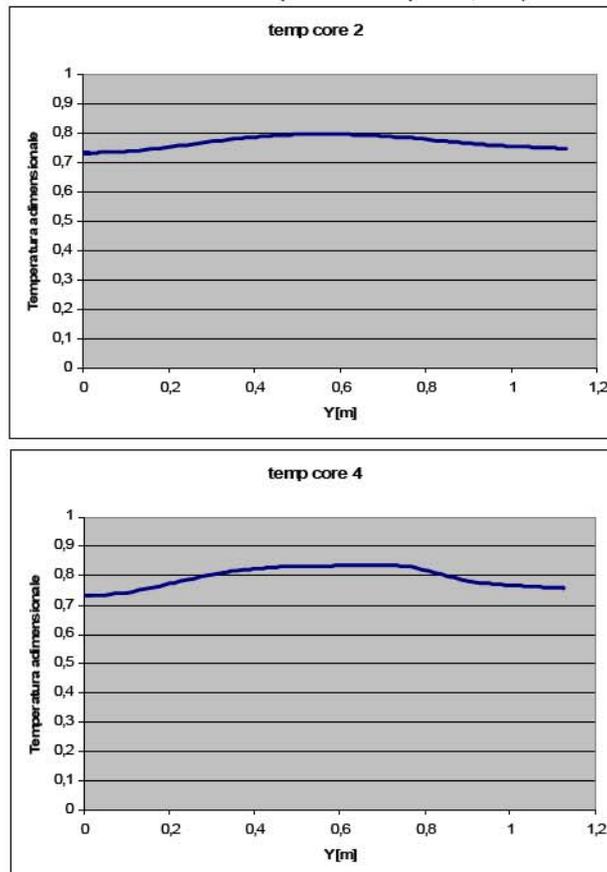


Figura.67 Distribuzione della temperatura adimensionale dopo 47,5 s (950 time steps)

La caratteristica più evidente riguarda la grande efficacia del miscelamento con conseguente riduzione del tempo necessario affinché inizi il fenomeno all'interno del core. A differenza del caso senza buoyancy in cui erano necessari 22,5 s, in questo caso dopo 12,5 s la concentrazione alla base del core è già superiore al



10%. Osservando tutti gli andamenti presentati, si nota molto facilmente la distribuzione quasi uniforme della concentrazione la cui variazione, all'interno di ogni istante temporale analizzato, è molto contenuta (praticamente sempre al di sotto del 10%).

E' semplice quindi trarre la conclusione che l'analisi della concentrazione basata sullo studio della temperatura, con un  $\Delta T$  di 192 K causa una grossa variazione dei risultati. Nel caso in cui si decidesse di sfruttare tale approccio durante una sperimentazione di laboratorio, sarebbe semplice misurare le differenze di temperatura ma si otterrebbero dei risultati che non potrebbero essere accoppiati al funzionamento reale di un reattore. In base a quanto analizzato si capisce come sia necessaria l'ottimizzazione, precedentemente descritta, affinché si possa sfruttare l'enorme vantaggio dell'utilizzo della temperatura senza alterare i fenomeni reali che regnano in un downcomer sottoposto a miscela di specie chimiche differenti.

In conclusione si vuole ricordare che questo lavoro è stato utilizzato come base di partenza per gli studi di "scalabilità", che verranno intrapresi in futuro.

Poter disporre di studi CFD affidabili rappresenterebbe un significativo passo avanti nel processo di testing e di licensing per tutta la progettazione nucleare e porterebbe ad una considerevole riduzione dei costi e dei tempi complessivi delle prove. Al momento non è ipotizzabile una sostituzione neppure parziale delle prove richieste dagli organismi regolatori mediante analisi CFD ma è altrettanto evidente che una fase di affiancamento sarà necessaria per poter arrivare ad ipotizzare uno scenario futuro in cui le due tecnologie possano lavorare in parallelo e supportarsi reciprocamente con piena accettazione delle autorità istituzionali e vantaggi economici e temporali del progetto.

#### 4.2.2 Tesi di Laurea: Modellazione CFD e Ottimizzazione geometrica per il downcomer

Tale lavoro si inserisce nell'obiettivo 1 ed è sintetizzato nel seguente lavoro di tesi:

Davide Frigerio,  
Modellazione CFD e Ottimizzazione geometrica per il downcomer del reattore nucleare IRISCFD e Ottimizzazione geometrica per il downcomer del reattore nucleare IRIS,  
Facoltà di Ing. Industriale - Laurea in Ingegneria Energetica  
AA 2006-2007

#### 4.3 DEFINIZIONE DI PROTOCOLLI PER L'ACCURATEZZA NELLA CFD

Il gruppo ha elaborato uno standard per l'analisi CFD che viene di seguito riportato e descritto.

Tale modello, in continua fase evolutiva, grazie al crescente interesse per la "Qualità nella CFD", è stato dimostrato essere utile ed efficace sia in ambito didattico (come elaborato finale di alcuni insegnamenti), sia nella documentazione delle fasi di Ricerca (Consorzio Internazionale IRIS che sviluppa un reattore di terza generazione avanzata, a brevetto congiunto Politecnico di Milano – Westinghouse). In questo ultimo caso il gruppo internazionale di lavoro sulla CFD utilizza il protocollo come strumento di condivisione dei risultati e lo adotta come metodologia condivisa di approccio all'analisi CFD.

Infine un estratto del protocollo è anche utilizzato dagli autori come report finale di consegna dei risultati alla chiusura dei rapporti di consulenza e/o ricerca applicata e, fino a oggi, ha sempre ottenuto ottimi apprezzamenti da parte del committente industriale.

##### 4.3.1 Ricerca in progress: la sfida della Qualità nella CFD

La sfida che, ad avviso di alcuni, si apre nella CFD si focalizza su un nuovo approccio al problema della qualità che sia tale da qualificare come affidabile la tecnologia CFD e il processo di analisi a questa associato, e indipendente (per quanto possibile) dai differenti settori in cui è applicata.

La sfida che si prospetta è triplice in quanto l'approccio indicato dovrebbe essere tale da garantire 3 livelli di qualità e per questo la chiameremo Qualità3:

1. La Qualità dei software utilizzati: codici commerciali, in house, accademici e open source;
2. La Qualità degli analisti: competenze e professionalità degli utenti;
3. La Qualità del processo di analisi: procedure e protocolli tali da garantire l'affidabilità dei risultati.

Il primo livello di qualità si presenta come una competenza specifica degli sviluppatori che devono garantire il processo di "verification" dei propri codici. In alcuni casi (tipicamente le software house leader di mercato)



hanno già attivato le procedure per certificare i processi di sviluppo dei codici di calcolo. Si ricorda infatti che nel campo dell'informatica non esiste alcuna opportunità di certificare la parte software, ma soltanto di certificare i metodi di sviluppo che vengono adottati. Tali procedure richiedono una struttura organizzativa che di fatto solo le grandi casi multinazionali possono mettere a disposizione, e sono di più complessa implementazione nelle aziende di limitate dimensioni o nelle strutture accademiche.

Il secondo livello di qualità si presenta come una competenza generale che potrebbe essere in carico tanto delle università che devono preparare i futuri analisti con competenze sempre più specifiche e adeguate ai nuovi sviluppi del settore, quanto dei dipartimenti di Ricerca e Sviluppo delle aziende che devono mettere a punto politiche adeguate di assunzione e in ultima analisi anche degli stessi analisti che devono dimostrare un alto livello di autocoscienza e di onestà intellettuale nel decidere di svolgere la propria professione nel settore.

Il terzo livello di qualità è connesso direttamente alla affidabilità, alla riproducibilità e pertanto alla accuratezza dei risultati delle analisi CFD.

Questo si presenta come un obiettivo da affidare ad una rete internazionale di esperti provenienti da differenti campi di applicazioni e settori scientifici, in grado, ciascuno apportando la propria competenza specialistica, di pervenire ad una visione sistemica che sia in grado di distillare le fasi o gli aspetti essenziali del processo CFD, indipendenti dalle applicazioni specifiche, su cui basare, implementare e divulgare protocolli standard di analisi CFD.

I primi due livelli di qualità, per quanto complessi da raggiungere, sono due strade sulle quali il settore ha già incominciato ad avviarsi.

Come rilevato alcune software house stanno andando nella direzione della certificazione dei propri processi di sviluppo e, dall'altra, le università hanno negli anni messo a punto un buon numero di corsi e percorsi di formazione nei convenzionali curricula accademici, di dottorato e post dottorali o di formazione permanente.

Il terzo è indubbiamente il più complesso e oneroso, ma rappresenta la strada che sembra più ragionevole percorrere per ottenere protocolli di natura più universale, che possano nascere da un confronto partecipato e da una integrazione coerente di competenze multinazionali e multisettoriali a beneficio dell'intera comunità scientifica del settore.

Un approccio di questo tipo (definizione di uno standard per la CFD e non per le applicazioni della CFD) si presenta come meno specifico, basato su concetti generali e più agevole da condividere a livello interdisciplinare ed è in linea con i principi generali della Qualità.

La filosofia di intervento può prendere spunto e beneficiare dell'esperienza proveniente dalle singole applicazioni senza essere necessariamente a queste vincolata. Inoltre, per non perdere in specificità, sulla struttura generale, ciascun settore può agevolmente definire addendum in funzione delle specifiche applicazioni.

Dall'altro lato, tale approccio si presenta più complicato da definire (perché più generale) e richiede necessariamente lo sviluppo di relazioni internazionali, non sempre agevole, tra esperti provenienti da differenti settori. Si presenta infine necessariamente meno analitica e pertanto meno vincolante sui dettagli specifici.

Condizione necessaria ma non sufficiente, questo livello di qualità si presenta soltanto come il terzo livello, essendo i primi due necessariamente propedeutici a questo.

Il ciclo della CFD e i protocolli di analisi sono lo strumento con cui si può garantire la qualità del processo di analisi imponendo quel minimo di standardizzazione richiesta per assicurare il monitoraggio e la ripetibilità dei risultati.

Non è compito di questa trattazione affrontare le problematiche legate al primo o al secondo livello di qualità definito dall'approccio appena descritto, tuttavia si vorrebbero comunque sottolineare brevemente l'aspetto della affidabilità dei software (primo livello di qualità) e di competenza degli analisti (secondo livello di qualità) perché considerati essenziali per preparare la strada alla contestualizzazione del terzo livello di qualità che è relativo al processo di analisi vero e proprio

### **Affidabilità dei software**

I codici commerciali: Tali codici sono venduti o affittati su licenza da una società commerciale tipicamente ad aziende, università o enti di ricerca. In questi codici lo sviluppatore non coincide con l'utente, ma tra sviluppatore e utente esiste un rapporto di tipo commerciale, regolato da un contratto definito. Eventuali bug o problematiche incontrate dall'utente sono riportate e gestite a livello di software house. Tra i desiderata dell'utente-cliente vi è senza dubbio l'aspettativa che il software sia sviluppato seguendo criteri di qualità e che un opportuno processo di verifica sia stato implementato e rispettato.



I codici in house e i codici accademici: Tali codici sono sviluppati e utilizzati da una azienda specifica e i codici accademici sviluppati e utilizzati da un gruppo di ricerca per scopi di ricerca interni. In entrambe queste tipologie di codice, l'utente di solito coincide o appartiene alla medesima struttura dello sviluppatore e inoltre il software viene verificato su problematiche specifiche che appartengono alla sfera di interesse dell'azienda e/o del gruppo di ricerca. Non vengono effettuati particolari sforzi per ampliare e verificare il campo di applicazione del software in contesti differenti in quanto con ogni probabilità non ne verrà fatto alcun utilizzo.

I codici open source: Tali codici sono sviluppati liberamente, disponibili in rete e utilizzati da utenti per differenti utilizzi. Per tali codici il processo di sviluppo è difficilmente verificabile poiché il codice viene assemblato in modo non strutturato grazie a una serie di subroutine ciascuna delle quali sviluppata da un ricercatore differente. La verifica del modello è effettuata dallo stesso sviluppatore. L'utente finale, non necessariamente un esperto di numerica, si trova a interagire con tale assemblato e a dover valutare i risultati delle proprie analisi.

Senza entrare in ulteriori dettagli, per quanto l'aspetto dei codici open source andrebbe analizzato con grande attenzione e interesse per lo sviluppo del settore nel prossimo futuro emerge una considerazione immediata: meno sia strutturata la modalità di sviluppo del software maggiori siano le necessità di spingere sulla qualità degli utenti e sulla qualità del metodo di analisi CFD utilizzato.

### Competenza degli analisti

La CFD oggi presenta una diversificazione piuttosto ampia in termini di utenti finali:

#### Utilizzatore-Base

Questa figura, fino a qualche anno fa piuttosto diffusa nelle imprese, è ormai quasi ovunque in fase di estinzione. E' rappresentata dall'utente che non ha alcun background di CFD sia in termini di numerica che in termini di termo-fluidodinamica e viene spinto dalle esigenze aziendali a utilizzare il codice CFD come uno strumento in grado di fornire alcuni output a fronte di una serie in input. L'utente conosce poco o non conosce del tutto la funzione di trasferimento del sistema e spesso non riesce a trasformare lo strumento in un utile investimento aziendale per ottenere dati ingegneristici significativi.

#### Utilizzatore-Sviluppatore

L'utente in grado di rivolgersi ad un codice di CFD con competenze da sviluppatore, per quanto raro, è senza dubbio un utente accorto, competente e motivato. In generale, se la sua attività analitica lo coinvolge profondamente a livello di numerica e il suo background è di questo tipo, può correre il rischio di perdere la visione sistemica sul problema fisico di natura termo fluidodinamica e delle relative implicazioni quando applicato a problemi ingegneristici.

#### Utilizzatore-Analista

Senza dubbio il miglior compromesso di utente per la fluidodinamica computazionale. Un analista con competenze specialistiche di settore (nell'ambito del campo applicativo di interesse) ma non avulso da competenze almeno generali di numerica. Si chiede all'utente di essere in grado di valutare l'effetto della numerica sui risultati ottenuti, comprenderne l'intervallo di validità ed esserne in grado di stimare le approssimazioni effettuate.

### 4.3.2 Ricerca in progress: Il controllo del processo: errori e incertezze

Veniamo ora a descrivere la parte di qualità del processo di analisi. A partire dalle sorgenti di accuratezza intrinsecamente riscontrabili nella CFD si arriverà a descrivere alcune procedure e protocolli in grado di supportare l'affidabilità dei risultati e del processo ciclico tipico dell'analisi CFD.

#### Fonti di incertezza ed errore

La CFD è per sua natura fonte di una serie di "in-accuratezze" che sono caratteristiche del suo approccio numerico e che non possono non essere tenute in considerazione. Genericamente si distinguono:

- Gli errori, non imputabili ad alcuna mancanza di conoscenza, come ad esempio:



- gli errori numerici legati alla convergenza, alla discretizzazione e alla precisione di calcolo dei calcolatori in utilizzo;
- gli errori di soluzione legati a possibili banchi esistenti nel codice e/o a errori dell'utente.
- Le incertezze, direttamente associabili ad una eventuale mancanza di conoscenza:
- le incertezze legate ai modelli di turbolenza, di irraggiamento, delle equazioni di stato e delle proprietà termofisiche dei materiali
- le incertezze legate alla analisi specifica come eventuali condizioni al contorno non note con il dettaglio richiesto o i dettagli della geometria.

Occorre sottolineare che nella letteratura di riferimento il termine "incertezza" spesso è stato utilizzato, in modo non esattamente corretto, per indicare ed intendere una certa "stima dell'errore numerico commesso". Ad esempio, date due soluzioni numeriche su griglie progressivamente adattate, la differenza che si dovesse rilevare in un indicatore sensibile scelto come riferimento (il campo di velocità, un profilo di una componente della velocità in una sezione, le perdite di carico, la potenza scambiata o l'andamento delle temperature) fornisce una stima (cioè una indicazione) dell'incertezza dell'errore commesso. Tale valutazione, fornita come differenza di due indicatori di errore, è puramente qualitativa e non fornisce invece alcuna indicazione quantitativa non potendo certamente assumere che il range dell'errore, se valutato analogamente a quanto avviene in campo sperimentale, sia confinato tra due soluzioni fornite. Inoltre, si ricorda che l'incertezza o l'errore numerico sono qualche cosa di profondamente distinto dall'incertezza con cui possono essere definiti alcuni parametri fisici e che rappresenta l'effetto che la non accurata conoscenza di una proprietà termofisica specifica (o di una condizione al contorno) può avere sui risultati della simulazione. In questo caso, l'incertezza non rappresenta più un errore della simulazione, ma piuttosto un valore aggiunto (inteso come outcome) della simulazione che sfrutta uno dei più interessanti e decisamente potenziali vantaggi del calcolo computazionale: la capacità di effettuare analisi di sensitività della soluzione in esame al variare dei parametri in gioco. Analisi di sensitività possono essere effettuate ad ampio spettro utilizzando metodi e tecniche matematiche appropriate che spaziano dai principi variazionali per piccole perturbazioni, alle analisi non lineari fino ai metodi Monte Carlo per campionare intere distribuzioni.

#### **Verifica di un codice e di un calcolo e Validazione**

Per ridurre al minimo le numerose fonti di errore e incertezza che certamente riducono l'affidabilità di un codice commerciale è necessario ricorrere ad alcune procedure che permettono di monitorare la qualità delle simulazioni. Comunemente si fa riferimento a due termini tecnici, Verifica e Validazione, che coinvolgono però tre aspetti distinti.

Il termine "Verifica" si riferisce a due attività distinte tra loro ma entrambe di natura puramente matematica.

La "Verifica" del codice (generale ed effettuata pertanto dagli sviluppatori) permette di garantire che il metodo numerico è ben implementato (consistente, convergente e stabile). Tale aspetto implica una valutazione dell'errore a partire da una soluzione nota di un problema non banale; esistono differenti metodologie applicabili a sistemi di risoluzione sviluppati specificatamente per equazioni differenziali o integrali, ma in tutti il punto chiave è la disponibilità di una soluzione (anche se non necessariamente realistica) analitica del sistema.

La "Verifica o calibrazione" di un calcolo (effettuata ancora dagli sviluppatori o da team di utenti esperti in grado di accedere al codice) è la procedura che consente di tarare la capacità del codice di effettuare previsioni su specifiche problematiche ingegneristiche. Tale fase implica invece una stima dell'errore dal momento che, per il caso specifico, non si ha a disposizione alcuna soluzione nota a priori. Così come la comunità sperimentale si è operata per pubblicare con standard di presentazione dei propri risultati attorno al 95% della confidenza nella banda di errore, anche la comunità numerica sta maturando standard propri per includere nella presentazione dei propri risultati una adeguata banda di errore.

Un metodo per ottenere una valutazione quantitativa dell'errore commesso e dipendente dalla discretizzazione geometrica adottata (Grid Convergence Index) viene descritto in dettaglio nel paragrafo 6 del capitolo 7a cui si rimanda per una trattazione dettagliata di questo aspetto.

La "validazione" di un modello numerico (specifica ed effettuata pertanto dall'analista) è la procedura che consente di valutare la misura in cui il modello proposto può rappresentare la realtà fisica in analisi. La validazione implica la identificazione delle differenze ottenute tra i risultati numerici (con la loro banda) e i risultati sperimentali (con la relativa banda) e non può che essere eseguita a valle delle verifiche per evitare che casualmente (per cancellazione di errori) si verifichi un ottimo match tra i dati numerici, forniti con un modello non verificato, e i dati sperimentali elaborati. In particolare tale rischio diviene significativo quando l'analisi è mirata al controllo di un solo parametro specifico (come ad esempio la lunghezza di riattacco nel caso classico del gradino "backward"). Su questo aspetto, che coinvolge l'accuratezza delle leggi fisiche in gioco nel problema specifico, si ritornerà nel corso del capitolo sull'aspetto della Validazione.

In un processo scientificamente accurato ha senso effettuare i passi di verifica e validazione solo nella sequenza indicata per evitare che eventuali effetti di compensazione dell'errore possano inficiare l'intero processo.

Prima si effettua una verifica del software per assicurarsi che il codice sia ben implementato e poi si procede alla verifica del calcolo per assicurarsi, attraverso la stima dell'errore, che la discretizzazione effettuata sia adeguata al problema applicativo in studio.

Solo a seguito delle due verifiche si procede alla validazione del modello numerico attraverso la comparazione dei risultati, possibilmente forniti con la relativa banda di errore numerico e una adeguata banda di sensitività effettuata su alcuni parametri chiave, con i risultati sperimentali e la relativa banda di errore.

### Il ciclo di progetto

Partendo dal presupposto che l'analisi CFD non ha mai come obiettivo l'analisi CFD stessa cioè la riproduzione della realtà attraverso una tecnica numerica che necessariamente induce a ovvie semplificazioni, ma ha come obiettivo la produzione di una serie di dati che abbiano un significato ingegneristico e possano essere utilizzati nella progettazione, nello sviluppo prodotto, nella ottimizzazione di componenti e processi, è necessario che il problema termofluidodinamico computazionale venga affrontato con le consuete metodologie di analisi e approcci di un problema fisico.

I passi procedurali possono essere schematizzati come segue in forma lineare sequenziale:

1. analisi del problema fisico-ingegneristico reale;
2. astrazione di una fisica e geometria semplificata e formulazione del modello matematico;
3. identificazione e implementazione del modello e dell'approccio numerico;
4. risoluzione numerica;
5. analisi dei risultati;
6. revisione del modello numerico;
7. revisione della semplificazione matematica.

Sovente le fasi sopra riportate nella letteratura di riferimento e utilizzando la nomenclatura anglosassone univocamente accettata, vengono indicate come Pre Processing (1-3), Processing (4) e Post Processing (5). L'elaborazione della necessità delle fasi 6 e 7 ha portato a identificare una quarta fase fondamentale nel processo di analisi. La revisione critica del modello (sia del modello numerico che della semplificazione matematica) porta il processo lineare della CFD a essere formulato come un processo ciclico che deve essere percorso più volte avvicinando, a ogni ciclo, la soluzione numerica al problema fisico o ingegneristico di partenza e rendendo i risultati progressivamente più affidabili.

In figura vengono riportati i passi procedurali in forma ciclica descritti di seguito con maggior dettaglio.

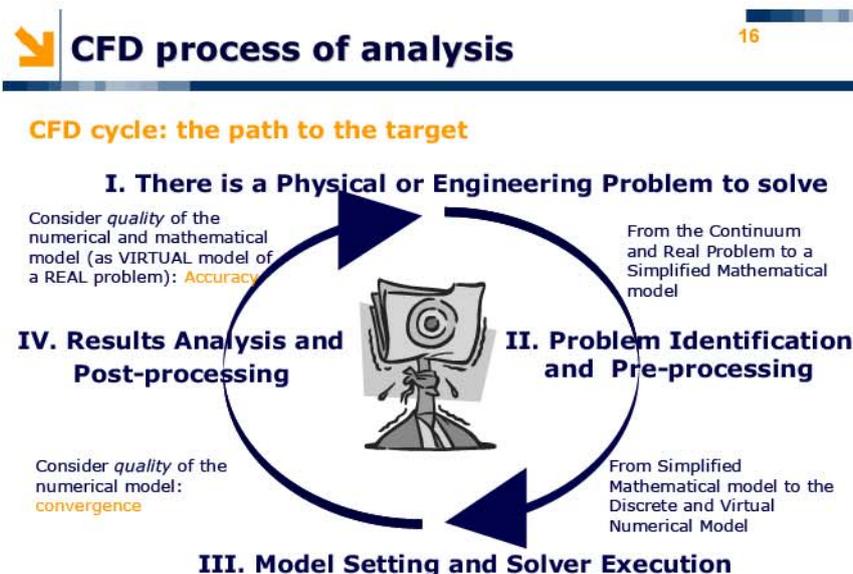


Fig 68 Processo ciclico di analisi CFD



#### La prima parte del ciclo

Tale insieme di passaggi è necessario che ogni utente si trova a doverlo percorrere. Il percorso che porta dalla semplificazione matematica al modello numerico viene eseguito con attenzione e si articola nel processo di definizione del caso: mesh, modelli, proprietà termofisiche dei materiali coinvolti, condizioni al contorno, algoritmi di calcolo. Tuttavia si sottolinea come tale metà del ciclo non sia sufficiente ad assicurare risultati affidabili. Tutti gli utenti-analisti dovrebbero guardarsi bene dal fornire risultati a seguito di tale percorso.

#### La seconda parte del ciclo

L'insieme di passaggi analitici che caratterizza la seconda parte del ciclo è un percorso obbligatorio per avviarsi verso l'affidabilità dei risultati provenienti dall'analisi CFD. L'analisi dei risultati deve essere effettuata con grande attenzione ed è necessario:

- essere consapevoli delle fonti di incertezza;
- valutare la convergenza numerica del singolo caso;
- valutare l'accuratezza del modello implementato attraverso il confronto tra i risultati numerici e altre fonti di informazione (dati da letteratura, dati sperimentali, teorie fisiche).

Questo ultimo passaggio permette, se condotto con attenzione e spirito critico, di aprire la fase di revisione del modello proposto. Il ciclo della CFD deve essere percorso integralmente almeno una volta per portare a valutare solo casi a convergenza e deve portare, una volta valutata l'accuratezza dei risultati ottenuti, di migliorare il modello proposto attraverso ulteriori "iterazioni" del ciclo di progetto.

#### Le iterazioni interne

Completato una prima volta il ciclo di progetto, che ha portato alla analisi dei primi risultati, con ogni probabilità, il modello deve essere rivisto e devono essere rivalutate:

- la ipotesi che hanno portato alla modellazione matematica del problema fisico (semplificazioni geometriche ad esempio, imposizione di contorni virtuali imposti al dominio reale);
- la modellazione fisica (modelli fisici, proprietà termofisiche dei materiali, condizioni al contorno);
- la modellazione numerica (schemi di discretizzazione, infittimenti della griglia).

Più di una iterazione ciclica è richiesta prima di poter pensare di ottenere risultati indipendenti dalla griglia e garantire la massima accuratezza possibile ottenibile con gli strumenti (modelli e algoritmi) messi a disposizione dal codice di calcolo in uso nello specifico problema in esame.

Come si rilevava nei paragrafi iniziali del capitolo, si conferma come l'accuratezza (la qualità ottenibile nel nostro caso), oltre a essere opzionale e dipendere dagli obiettivi del progetto è necessariamente vincolata dagli strumenti in uso.

### 4.3.3 Ricerca in progress: protocolli di gestione del progetto

#### La pianificazione del progetto

Non si intende dettagliare in questa sede le numerose necessità che sottostanno ad una buona gestione del progetto rimandando ai riferimenti bibliografici presenti in letteratura sul project management. Tuttavia, per una maggior comprensione e assimilazione delle linee guida espresse di seguito nel protocollo proposto per le analisi CFD si evidenzia quando segue.

L'avvio del progetto richiede la definizione di alcuni aspetti essenziali:

- il problema ingegneristico deve essere compreso a livello di fenomenologia fisica prima di pianificarne una analisi CFD, inoltre lo stato dell'arte deve essere valutato con attenzione prima dell'avvio dello studio;
- gli obiettivi generali del progetto devono essere identificati con chiarezza estrema, e in linea con le risorse disponibili, perché vincolano tanto le scelte di modellazione numerica che la valutazione della accuratezza dei risultati ottenibili;
- la disponibilità di risorse va elencata in termini di
  - o competenze CFD indispensabili;
  - o numero di ore lavoro necessarie e ripartizione dei compiti;
  - o le richieste hardware.
- le tempistiche di progetto vanno dichiarate per poter effettuare
  - o stima della durata del progetto;



- o previsione delle consegne intermedie;
- o lasciare spazio sufficiente per gli eventuali imprevisti.
- la revisione della progettazione deve essere effettuata con costanza e vanno definite le metodologie di controllo dell'avanzamento lavori.

### **Il protocollo applicativo**

Al fine di controllare il processo, uno strumento utile per l'analista, che si aggiunge ad una buona pianificazione, è l'utilizzo di un protocollo applicativo per guidare, seguendo le indicazioni sopra riportare, l'approccio di analisi.

Gli autori, basandosi sulla propria esperienza in vari campi applicativi della CFD e, grazie all'interazione con gruppi di lavoro internazionali, ha elaborato negli anni una procedura con l'obiettivo di garantire la riproducibilità dei risultati e un approccio solido per poter validare le conclusioni e i risultati finali delle ricerche che utilizzano come strumento la fluidodinamica computazionale. Attraverso l'utilizzo di queste linee guida ci si aspetta che la fluidodinamica computazionale possa aiutare gli analisti e i progettisti a:

- ridurre i test sperimentali e la costruzione dei prototipi;
- supportare e velocizzare i processi di prototipazione;
- ridurre i costi della progettazione;
- creare un patrimonio di informazioni e metodologie condivise.

Questa procedura ingloba in parte il lavoro dell'ERCOFTAC e alcune considerazioni emerse sia da QNET che dal lavoro di INL.

Nelle figure 6.8 e 6.9 si evidenziano copertina e sommario del protocollo CFD implementato al Politecnico di Milano e di seguito se ne spiegano in dettaglio i vari paragrafi.

Tale protocollo e il documento relativo sono garantiti principalmente dall'applicazione di uno standard condiviso, della rintracciabilità delle fasi di lavoro, della concretizzazione del processo ciclico in una metodologia opportunamente gestita e non autoreferenziale (si rimanda alla parte di risultati per un descrittivo completo).



**Politecnico di Milano**  
**Dipartimento di Energetica**

POLITECNICO DI MILANO



Milano - 25 March 2008

## **FINAL REPORT**

### **REFERENCE**

**Academic Year 2007-2008**

Corso Laboratorio Progettuale di CFD  
Laurea Specialistica in Ingegneria Energetica

**Prof. Emanuela Colombo**

### **TITLE**

Internal document

**PROBLEM MANAGING**

authors

**Dipartimento di Energia**  
**Politecnico di Milano**

Redattore	R. Mereu, E. Colombo, F. Inzoli	Pag 1 di 12
Data	13-12-06	

Fig 69 Protocollo della CFD – esempio di pagina iniziale



Politecnico di Milano  
Dipartimento di Energetica

Milano - 25 March 2008

<b>Purpose of the document</b> .....	4
<b>Problem analysis: Results and Approach</b> .....	5
<b>1. Introduction:</b> .....	5
1.1 Frame of action and General purposes.....	5
1.2 Problem identification.....	5
<b>2. Project Purposes</b> .....	5
2.1 Specific goals of the CFD analysis.....	5
1.3.1 State of the art of CFD in the field.....	5
2.2 Expected results.....	5
2.3 General approach: main assumption and working hypothesis.....	5
2.4 Activities and Plan.....	5
<b>3. Approach Verification and Validation</b> .....	7
3.1 Identification of a similar simplified case with bibliography references.....	7
3.2 Description of the model implemented and grid convergence evaluation.....	7
3.2.1 Geometry and Mesh.....	7
3.2.2 Materials and Operating conditions.....	7
3.2.3 Physical models.....	7
3.3 Analysis of results.....	7
3.4 Extension of the model to the current project.....	7
3.4.1 Verification: Grid Convergence index.....	7
3.4.1 Limitations and Advantages.....	7
3.4.2 Source of additional uncertainties.....	8
<b>Problem setting and solving: Deployment</b> .....	9
<b>4. Numerical model</b> .....	9
4.1 Pre-processing.....	9
4.1.1 Domain identification and Geometry setting.....	9
4.1.2 Mesh Strategy and generation.....	9
4.2 Model setting.....	9
4.2.1 Solver.....	9
4.2.2 Physical models and options.....	9
4.2.3 Physical properties.....	9
4.2.4 Operating conditions.....	9
4.2.5 Boundary conditions.....	9
4.3 Numerical setting.....	9
4.3.1 Numerical strategy.....	10
4.3.2 Convergence control.....	10
4.3.3 Accuracy analysis: Error evaluation and Grid Convergence Index.....	10
<b>Problem Post Processing and Cycling: Assessment and Review</b> .....	11
<b>5. Results Analysis</b> .....	11
5.1 Model XXX (one section for each configuration tested).....	11
5.1.1 Qualitative analysis: trends and comparative results.....	11
5.1.2 Quantitative analysis: comparisons with data.....	11
5.1.3 Validation and Critical review of the model.....	11
5.1.4 Strategy Improvement.....	11
<b>6. Conclusion</b> .....	12
6.1 General remarks.....	12
6.2 Future development.....	12
<b>Bibliography</b> .....	12

Author		Pag. 2 of 12
Date		

Fig 70 Protocollo della CFD – esempio di sommario

Di seguito viene riportata e brevemente descritta nei suoi sottoparagrafi, la struttura logica generale del protocollo, come implementato e adottato. Questo paragrafo vuole rappresentare un esempio applicativo del



protocollo ma non costituisce riferimento assoluto e può subire modifiche e variazioni a seconda delle esigenze dello specifico gruppo e/o dello specifico progetto.

\*\*\*\*\*

## *Analisi del Problema: Risultati attesi e Approccio*

### *1. Introduzione:*

*Le informazioni generali vengono allocate in una parte introduttiva*

#### *1.1 Contesto di azione*

*In questa sezione è opportuno inquadrare il contesto di azione. E' opportuno cercare di collocare lo specifico progetto CFD in un contesto di rilievo generale per le attività della Società e/o dell'ente o del gruppo di Ricerca all'interno del quale la specifica attività di CFD è richiesta.*

#### *1.2 Identificazione del Problema*

*E' opportuno inserire una breve descrizione del problema fisico o ingegneristico e, ove possibile, riportare disegni costruttivi, schemi di progetto e fornire indicazione delle condizioni operative.*

### *2. Obiettivi del Progetto*

*In questa sezione vengono dichiarate alcune informazioni di rilievo per la futura gestione del progetto e del team di progetto e agevolare al definizione dell'approccio e delle tempistiche.*

#### *2.1 Obiettivi specifici dell'analisi CFD*

*Nell'ambito del progetto, come definito in 1.1, devono essere a questo punto delineati con attenzione gli obiettivi specifici richiesti all'analisi CFD. In particolare si suggerisce di identificare con chiarezza se l'impiego della CFD avviene a scopo di verifica, di ottimizzazione o di supporto alla progettazione*

#### *2.2 Stato dell'arte della CFD nel settore di applicazione specifico*

*Come in ogni progetto di ricerca, prima di avviare i lavori, è opportuno identificare compiutamente lo stato dell'arte in merito alla problematica che si intende investigare. Occorre investigare nella letteratura di settore con il fine di individuare da chi e come il problema è già stato affrontato al fine di evitare la duplicazione degli sforzi e eventuali scelte inopportune.*

#### *2.3 Risultati attesi*

*E' importante definire i risultati che ci si aspetta di ottenere dall'analisi CFD in modo da poter condividere la visione all'interno del gruppo di lavoro, tra questo e il project manager e tra il project manager e l'esterno. Questa paragrafo deve risultare necessariamente coerente con gli obiettivi specifici espressi in 2.1 e con il contesto generale introdotto in 1.1.*

#### *2.4 Approccio generale, assunzioni e ipotesi principali*

*In accordo con gli obiettivi specifici, devono essere descritte le assunzioni e le ipotesi principali adottate per semplificare il problema reale e arrivare a una sua formulazione matematica. Queste assunzioni fissano sostanzialmente il range di validità del modello stesso. E' importante essere pienamente consapevoli delle restrizioni geometriche e fisiche effettuate e dei conseguenti effetti sulla accuratezza dei risultati finali al fine di poter pensare a eventuali soluzioni alternative che rimuovano questi vincoli, nelle fasi di revisione del modello.*

#### *2.5 Pianificazione delle attività*

*Al fine di garantire la tracciabilità è fondamentale definire un piano delle attività identificando le priorità e i legami di interconnessione utilizzando strumenti del project management come il diagramma di GANNT. Si suggerisce di assegnare le attività a specifici referenti quando il progetto è gestito da un team di lavoro.*

### *3. Verifica e Validazione dell'approccio*

*Questa sezione, di rilievo in tutti i progetti CFD, è tuttavia obbligatoria nei casi in cui non ci siano dati sperimentali a disposizione (tipicamente nei casi di ottimizzazione e di supporto alla progettazione). In questi casi il modello, prima di essere applicato al caso in studio, deve essere validato. I dati per la validazione devono essere presi da test sperimentali che riportino le caratteristiche termo fluidodinamiche più vicine a quelle del caso che si intende studiare e per i quali è necessario costruire il modello numerico ad hoc, Nel*



caso in cui siano disponibili risultati sperimentali (nei casi ad esempio di verifica) tale fase può essere post-posta e realizzata nel paragrafo 5.2. Anche in tale fase è ovviamente necessario procedere alla valutazione della verifica del calcolo e alla valutazione dell'indice di convergenza della griglia).

### 3.1 Identificazione del caso di validazione

Non sempre è immediato ricavare dal caso in studio una semplificazione che presenti simile comportamento sia dal punto di vista geometrico che fluidodinamico e termico sul quale testare il modello numerico che si intende poi applicare al caso in studio (come tipologia di griglia, numero di elementi, proprietà dei materiali, modelli di turbolenza, di radiazione...). Spesso è necessario per mantenere le analogie fluidodinamiche e termiche ricorrere a casi separati.

### 3.2. Descrizione del modello

In questo paragrafo viene descritto il modello numerico che si intende implementare per il caso di validazione e successivamente, nelle sue scelte essenziali, estendere al caso in studio. Non si forniscono ulteriori descrizioni nei sottoparagrafi di seguito, in quanto si assume che tale aspetto descrittivo faccia parte del background di qualunque utente CFD e non richieda in questa sede ulteriori o aggiuntive spiegazioni. Si devono descrivere i seguenti aspetti:

#### 3.2.1 Geometria e Mesh

#### 3.2.2 Proprietà dei Materiali

#### 3.2.3 Condizioni operative

#### 3.2.4 Modelli fisici

#### 3.2.5 Condizioni al contorno

Ci si riferisce ai modelli che vengono aggiunti al sistema di equazioni di Navier Stokes (turbolenza, combustione, trasporto delle specie, radiazione, ect.)

### 3.3 Analisi dei risultati

I risultati ottenuti dal modello devono essere confrontati con i dati reperiti in letteratura con il fine di giustificare la scelta del modello numerico proposto.

### 3.4 Estensione del modello al caso in studio.

L'aspetto complesso dell'estensione del modello utilizzato per il caso di validazione al caso in studio deve essere trattata con accortezza. Vanno trattati e discussi i seguenti aspetti, per ciascuno dei quali è previsto un sottoparagrafo apposito:

#### 3.4.1 Valutazione degli errori: indice di convergenza della griglia

Valutazione della banda di errore mediante stima quantitativa.

#### 3.4.2. Limitazioni e opportunità

Specificando in quale contesto tale estensione è valida.

#### 3.4.2 Sorgenti di incertezze aggiuntive

Riportando una lista delle possibili incertezze non considerate che possano ridurre la validità dell'estensione al caso in studio.

## Modello numerico e Soluzione: come arrivare ai risultati

### 4. Modello numerico

In questa sezione viene descritto il modello implementato insieme a tutte le condizioni richieste come dati di ingresso per ottenere i risultati attesi.

#### 4.1 Pre-processing

In questo paragrafo si descrive il dominio di calcolo estrapolato dal dominio reale e si indica quale approccio è stato seguito per la discretizzazione geometrica. Si indicherà il numero di celle, la tipologia utilizzata e la qualità della griglia misurata in termini di deformazione degli elementi di griglia, rapporto tra le dimensioni della cella nelle due o tre direzioni del dominio bi o tridimensionale e indice di variazione progressiva nel caso di griglie non uniformi. Seguono le sezioni specifiche:

##### 4.1.1 Identificazione del dominio geometrico

##### 4.1.2 Strategia di discretizzazione

#### 4.2 Identificazione del modello

Di seguito vengono descritte le caratteristiche principali del modello implementato. La lista degli aspetti da affrontare segue sostanzialmente i menù e le sequenze proposte dai più noti codici commerciali e



rappresenta un serie di passaggi che si consiglia di seguire in sequenza. Nel caso, piuttosto comune, che più di una configurazione venga testata, si suggerisce di identificare con una opportuna nomenclatura le differenti configurazioni e di raccoglierle in una tabella esplicativa sia le differenze geometriche che le differenze di condizioni operative e/o al contorno. Il modello viene in seguito descritto, in analogia con quanto già percorso a livello di validazione, mediante completa trattazione degli aspetti che seguono:

#### 4.2.1 Solutore

#### 4.2.2 Modelli fisici e opzioni particolari

#### 4.2.3 Proprietà dei Materiali

#### 4.2.4 Condizioni operative

#### 4.2.5 Modelli fisici

#### 4.2.5 Condizioni al contorno

### 4.3 Aspetti numerici

Il settaggio numerico deve essere descritto e giustificato.

#### 4.3.1 Strategia numerica

Si suggerisce di spingere la convergenza dei casi utilizzando sempre gli algoritmi di ordine più elevato a disposizione nel codice in uso.

#### 4.3.2 Accuratezza spaziale e temporale

#### 4.3.3 Controllo di convergenza

Si suggerisce di controllare con grande attenzione l'aspetto della convergenza della soluzione, prima di valutare i risultati ottenuti. Tra i requisiti fondamentali: i residui, la stabilità di alcune grandezze al procedere delle iterazioni per tutti i casi a cui si aggiungono i bilanci di massa ed energia nei casi stazionari:

##### 4.3.3.1 Residui

##### 4.3.3.2 Monitoraggio di grandezze locali

##### 4.3.3.3 Monitoraggio dei bilanci globali

#### 4.3.4 Analisi dell'accuratezza e valutazione dell'indice di convergenza della griglia.

Si descrive l'accuratezza attesa in termini delle approssimazioni geometriche effettuate, delle condizioni al contorno imposte, dei modelli fisici impiegati e della strategia numerica applicata. Si procede alla verifica del calcolo ad esempio mediante metodo GCI.

##### 4.3.3.2 Incertezze

Si descrivono eventuali incertezze legate ancora alle approssimazioni geometriche, alle condizioni al contorno, ai modelli fisici e alla strategia numerica applicata.

### Analisi dei risultati e Revisione del modello

#### 5. Analisi dei risultati

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'analisi sia in termini di andamenti quantitativi e di immagini che aiutano la visualizzazione del comportamento temofluidodinamico sia in termini di valori integrali o medi. Viene inoltre riportato ogni eventuale dato significativo che evidenzia il raggiungimento dei risultati attesi

#### 5.1 Modello XYZ

Per esigenze di chiarezza si suggerisce di utilizzare un insieme di N paragrafi, uno per ognuna delle N configurazioni testate, nei quali separatamente si mostrano i risultati e, se necessario e significativo, prevedere un paragrafo finale per un confronto comparativo. Nel caso di studi parametrici (analisi di ottimizzazione o supporto alla progettazione) può essere invece necessario prevedere solo il confronto comparativo.

La scelta sarà di volta in volta effettuata dall'analista a seconda delle necessità.

In tale paragrafo, e in accordo con gli obiettivi specifici espressi dal paragrafo 2.1 si suggerisce di approfondire quanto segue:

##### 5.1.1 Analisi qualitative: andamenti e risultati comparativi

##### 5.1.2 Analisi quantitative: confronto con dati sperimentali esistenti

##### 5.1.3 Validazione e revisione critica del modello

Questo passaggio è, come approccio, equivalente a quanto esposto nella sezione 3 da percorrere in assenza di risultati sperimentali per il caso in studio. Nel caso in cui i risultati sperimentali ci fossero e nel caso il confronto con i risultati numerici non fosse soddisfacente, occorre necessariamente proporre una revisione del modello e dell'approccio seguito sia dal punto di vista geometrico, che fisico, che numerico.

##### 5.1.4 Strategie di miglioramento



Le strategie vengono indicate proprio nell'ottica del ciclo di progetto caratteristico della CFD e possono richiedere più di una revisione. Si consiglia di documentare brevemente tutti i passaggi e di presentare compiutamente in questo paragrafo solo il passaggio finale che ha portato ai risultati descritti.

#### 6. Conclusioni

Una conclusione generale che ripercorra l'analisi brevemente e che evidenzi la coerenza tra gli obiettivi specifici, le attività svolte, i risultati attesi rispetto ai risultati ottenuti e allo sforzo effettuato in modo da identificare il reale contributo del progetto agli obiettivi generali e al contesto di riferimento nel quale è stato inserito. Può essere significativo descrivere brevemente alcuni sviluppi futuri da perseguire.

##### 6.1 Considerazioni generali

##### 6.2 Sviluppo futuri

\*\*\*\*\*

#### 4.3.4 Pubblicazioni Scientifiche

E. Colombo, F. Inzoli, M. Ricotti, R. Uddin, Y. Yan, N. Sobh, "**COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS AS A SUPPORT FACILITY FOR R&D ACTIVITIES IN THE IRIS PROJECT: AN OVERVIEW**", 5th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Croatian Nuclear Society (HND) Ed., CD-Rom (ISBN 953-96132-8-0), pp. 1-9, 2004