

**UNIVERSITÀ DI PISA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione

Tesi di Dottorato di Ricerca in:

INGEGNERIA NUCLEARE : Sicurezza degli Impianti Nucleari

**Studio per la realizzazione
di un codice di calcolo termoidraulico
con capacità interna di valutazione dell'incertezza**

Candidato

Ing. Walter GIANNOTTI

Relatori

Prof. Ing. Francesco D'AURIA

Ing. Paolo MARSILI

Pisa, Dicembre 1999

INDICE

Sigle ed abbreviazioni	3
Sommario	5
1. Introduzione.....	6
2. Premesse	7
2.1 UMAE	7
2.2 Il codice RELAP5.....	9
Cenni sulle versioni del codice di calcolo RELAP	9
3. CIAU	10
3.1 Principi Generali.....	10
Concetto di stato del transitorio.....	12
Quantità identificative dello stato.....	13
Indipendenza dal tempo.....	14
Indipendenza dal transitorio	14
Intervalli temporali	15
3.2 – Idee base realizzative.....	15
Matrice accuratezza/incertezza quantitativa (ipercubi)	16
Vettore accuratezza/incertezza temporale	17
3.3 Procedure	19
Introduzione.....	19
3.3.1 AFE.....	21
Test utilizzabili	21
Determinazione degli intervalli di confronto	22
Confronto quantitativo e temporale : ottenimento accuratezza.....	24
Peso delle variabili sperimentali.....	27
Raggruppamento dei dati di accuratezza	28
3.3.2 DAST.....	29
Distorsioni di scala	30
Peso complessivo del dato di accuratezza	30
Ottenimento della incertezza adimensionale	33
3.3.3 UBEP	37
Struttura	37
4. Matrici QUM e vettori TUV realizzati.....	39
TUV e QUM appartenenti al set n.1	39
TUV e QUM appartenenti al set n.2.....	42
TUV e QUM appartenenti al set n.3.....	42
TUV e QUM appartenenti al set n.4.....	43
5. Conclusioni.....	45
Bibliografia.....	46

Appendice 1
Appendice 2
Appendice 3
Appendice 4
Appendice 5
Appendice 6
Appendice 7

Indice delle figure

Figura 1 - Rappresentazione grafica accuratezza incertezza.....	10
Figura 2 -Schema semplificato di interrelazione delle procedure che compongono la CIAU	20
Figura 3 - Diagramma di flusso della procedura AFE	21
Figura 4 - Confronto tra dati calcolati e sperimentali	23
Figura 5 - Intervalli di confronto	24
Figura 6 - Ottenimento dell'errore quantitativo Q_A	26
Figura 7 - Ottenimento dell'errore temporale T_A	27
Figura 8 - Pesi in funzione del fattore di scala	32
Figura 9 – Schema a blocchi della procedura AFE	36
Figura 10 – Composizione della incertezza quantitativa e temporale	38
Figura 11 – Rappresentazione grafica della banda di incertezza	38

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Definizioni di Accuratezza.....	12
Tabella 2 - Intervalli delle variabili identificative degli ipercubi.....	17
Tabella 3 - Suddivisione degli intervalli di confronto.....	18
Tabella 4 - Eventi per la definizione degli intervalli di confronto	24
Tabella 5 - Pesi dati sperimentali	28
Tabella 6 - Formule del processo di estrapolazione	31
Tabella 7 - Determinazione dell'indice Q	32
Tabella 8 - Calcolo dei pesi correlati al fattore di scala	32
Tabella 9 - Diverse tipologie di QUM e TUV realizzate	39
Tabella 10 - Transitori considerati per la creazione di TUV e QUM set n. 1	40
Tabella 11 - Esempio di risultati QAM/QUM e TAV/TUV	41
Tabella 12 - Ipercubi e intervalli temporali relativi al test SB-CL-18	42
Tabella 13 - Calcoli effettuati per testare la procedura CIAU	43
Tabella 14 - Test utilizzati per la realizzazione di QUM eTUV set n. 4.....	44

Sigle ed abbreviazioni

AFE	= Accuracy Finalized to Extrapolation
AFW	= Auxiliary FeedWater
ASM	= Analytical Simulation Model
ATWS	= Anticipated Transient Without Scram
BWR	= Boiling Water Reactor
CFR	= Code of Federal Regulation
CIAU	= Code with (capability of) Internal Assessment of Uncertainty
CL	= Cold Leg
CSNI	= Committee on the Safety of Nuclear Installations
CTHP	= Counterpart Test – High (core) Power
CTLTP	= Counterpart Test – Low (core) Power
D & A	= Development and Application
DAST	= Computer tool of the CIAU to perform the statistical data analysis
EOP	= Emergency Operating Procedures
FW	= FeedWater
HL	= Hot Leg
HPIS	= High Pressure Injection System
IPA	= Integral Parameter (to characterize the RTA)
ID	= Identification
ITF	= Integral Test Facility
K.Ph.	= Key Phenomenon
LBLOCA	= Large Break LOCA
LOCA	= Loss of Coolant Accident
LOFW	= Loss of FeedWater
LPIS	= Low Pressure Injection System
MFW	= Main FeedWater
MSL	= Main Steam Line
MSLB	= Main Steam Line Break
NDP	= Non Dimensional Parameter (caratterizzano gli RTA)
NPP	= Nuclear Power Plant
OECD	= Organisation for Economic Cooperation and Development
PCT	= Peak Cladding Temperature
PORV	= Pilot Operated Relief Valve
PRZ	= Pressurizer
PWR	= Pressurized Water Reactor
QA	= Quantity Accuracy
QAM	= Quantity Accuracy Matrix (or Matrices)
QUM	= Quantity Uncertainty Matrix (or Matrices)
RTA	= Relevant Thermalhydraulic Aspect
SBLOCA	= Small Break LOCA
SETF	= Separate Effect Test Facility
SG	= Steam Generator
SGTR	= Steam Generator Tube Rupture
SRV	= Steam Relief Valves
SVP	= Single Valued Parameter (caratterizzano gli RTA)
TA	= Time Accuracy
TAV	= Time Accuracy Vector
TSE	= parametro appartenente alla Time Sequence of Events (caratteriz. gli RTA)
TUV	= Time Uncertainty Vector

UBEP	= Uncertainty Bands from Extrapolation Process
UMAE	= Uncertainty Methodology based on the Accuracy Extrapolation
UMS	= Uncertainty Method Study
UP	= Upper Plenum
US NRC	= US Nuclear Regulatory Commission

Sommario

La possibilità di quantificare in modo automatico l'incertezza dei risultati ottenuti dal calcolo relativo ad un impianto di potenza nucleare, costituisce una capacità desiderabile per un codice termoidraulico di sistema. Nella presente tesi di dottorato è mostrato il risultato conseguito circa la realizzazione di una procedura per introdurre nel codice la capacità di ottenere l'incertezza relativa ai risultati ottenuti dal calcolo. Alla base di questa procedura denominata CIAU (Code with - the capability of - Internal Assessment of Uncertainty), è la metodologia di incertezza UMAE (Uncertainty Methodology based on the Accuracy Extrapolation), proposta dalla Università di Pisa, benché altre metodologie possano essere utilizzate.

L'idea della CIAU è quella della identificazione e caratterizzazione di stati del transitorio e di associare ad ogni stato un valore di incertezza. Gli "ipercubi" ed gli "intervalli temporali" descrivono tutto un transitorio e l'incertezza quantitativa e temporale sono combinate insieme per ottenere l'incertezza totale.

Il codice di sistema Relap5/mod3.2 rilasciato dalla US NRC (Nuclear Regulatory Commission) è utilizzato per mostrare l'applicabilità della procedura proposta. I risultati del codice relativamente a transitori in reattori PWR (Pressurized Water Reactor) sono mostrati insieme alle bande di incertezza ottenute dall'applicazione della procedura CIAU.

1. Introduzione

L'evoluzione degli impianti nucleari di potenza in condizioni incidentali è stato il principale scopo della ricerca nel campo nucleare negli ultimi 40 anni; diversi codici termoidraulici di sistema sono stati messi a punto per simulare il comportamento dei reattori nucleari; inoltre esiste una ampia base di dati raccolti per situazioni rilevanti per i PWR e BWR.

In particolare una speciale attenzione è stata posta dalla comunità scientifica nella quantificazione della incertezza del codice nel predire il comportamento di un impianto durante un transitorio. A tale scopo è operante il UMS (Uncertainty Method Study) che prevede il confronto dei risultati di incertezza ottenuti dalle diverse metodologie. I congressi organizzati a Annapolis (1996) e Ankara (1998) dal OECD/CSNI^{/1/ /2/} hanno espresso le necessità future relativamente allo sviluppo, qualifica e capacità per l'uso di codici e metodologie di incertezza nel processo di licensing.

Quanto detto ha orientato la presente tesi di dottorato alla ricerca volta all'ottenimento di un codice con capacità interne di determinazione della incertezza (Code with – the capability of – Internal Assessment of Uncertainty, CIAU).

Più in particolare le origini della attività derivano dalle seguenti osservazioni.

Nonostante i progressi compiuti fino ad ora, le predizione dei codici come per esempio il Relap5 sono affette da incertezza perché:

- la qualifica del codice avviene quasi per intero mediante dati che sono ottenuti in simulatori in scala e non su impianti di potenza;
- i modelli sono delle approssimazioni dei fenomeni fisici^{/3/}.

I dati ottenuti dai codici non possono quindi fornire esatte informazioni sul comportamento degli impianti durante scenari incidentali. Inoltre il confronto tra 5 metodologie di incertezza^{/4/} ha mostrato che:

- i diversi metodi portano a valori diversi di incertezza;
- user differenti della stessa metodologia ottengono risultati diversi di incertezza;
- la quantità di risorse necessarie per l'applicazione delle metodologie di incertezza è generalmente elevata.

L'impiego della CIAU permette di ovviare ai punti sopra esposti, portando ad una semplificazione e quindi ad una riduzione dei costi della applicazione della metodologia di incertezza.

La CIAU essenzialmente opera l'integrazione tra codice di calcolo e metodologia di incertezza permettendo di ottenere le bande di incertezza relative ai risultati del calcolo automaticamente, durante l'esecuzione del codice.

Data l'ampia esperienza acquisita presso l'Università di Pisa, il codice di calcolo termoidraulico prescelto in questo studio è il Relap5/mod3.2 sviluppato dalla US NRC^{/5/}. Per ragioni analoghe la metodologia UMAE^{/6/ /7/} (Uncertainty Methodology based on Accuracy Extrapolation) è stata utilizzata quale strumento per l'ottenimento dei dati di incertezza.

2. Premesse

La procedura CIAU compie l'integrazione tra il codice RELAP5/mod3.2 e la metodologia di incertezza UMAE. Prima di illustrare la procedura CIAU, verrà fatta una breve descrizione della metodologia e del codice; informazioni più approfondite circa la UMAE e il RELAP5 sono riportate nelle Appendici 1 e 2 rispettivamente.

2.1 UMAE

La base della metodologia^{4/,/6/} può essere illustrata mediante i punti seguenti che sono relativi alle esperienze eseguite sui simulatori dell'impianto reale ed ai codici di calcolo utilizzati per predire il comportamento dell'impianto reale. Quando ci si riferisce a simulatori e codici di calcolo si deve tenere presente che si intende per entrambi lo stato dell'arte nei rispettivi settori^{12/}; così i simulatori sono riproduzioni ottenute mediante opportune leggi di scala di LWR presi come riferimento (per esempio conservazione delle altezze, del rapporto tra potenza e volumi, ecc.¹⁾ ed i codici di calcolo sono basati sulle sei equazioni di bilancio e devono essere intesi come qualificati cioè idonei a riprodurre gli eventi termoidraulici che si verificano negli impianti per i diversi transitori.

Le ipotesi su cui la metodologia si basa possono essere così riassunti:

1. la diretta estrapolazione dei risultati ottenuti nei test sperimentali agli impianti non è attuabile anche se le stesse variabili presentano andamenti temporali simili;
2. a parità di tutte le altre condizioni è legittimo ipotizzare che i risultati sperimentali derivanti da simulatori più vicini al proprio impianto di riferimento (ovvero quelli realizzati con una scala di riduzione minore, cioè in poche parole più grandi) diano risultati più simili a quelli presunti per l'impianto reale rispetto ai simulatori più piccoli;
3. i codici qualificati rimangono strumenti indispensabili per ottenere previsioni sul comportamento di un impianto in condizioni normali o in un particolare transitorio;
4. la precisione delle previsioni del codice deve aumentare se il numero dei test sperimentali relativi ad un certo fenomeno aumenta;
5. l'incertezza circa le previsioni del codice relativamente al comportamento dell'impianto non può essere inferiore alla discrepanza che il codice presenta nel confronto tra risultati sperimentali e calcolati relativamente ai vari simulatori; tale incertezza e discrepanza deve essere valutata in relazione alla complessità dell'impianto reale o del simulatore considerato, ma anche del transitorio in esame;
6. la metodologia deve prendere in considerazione anche gli effetti correlati alla nodalizzazione e all'utilizzatore.

L'idea base della procedura è quella di ottenere l'incertezza della previsione del calcolo relativo ad un impianto, dalla accuratezza del codice nel riprodurre i risultati nei simulatori (fissato il transitorio sul quale si vuole indagare). Si parla di accuratezza poiché questa è valutabile direttamente dal confronto tra dati sperimentali (ottenuti dai simulatori) e dati calcolati (ottenuti dal codice di calcolo), e di incertezza poiché questa è a priori non nota non avendo il riscontro di dati sperimentali dell'impianto reale.

Molte problematiche sono correlate alla applicazione concreta della idea base della metodologia e sono in seno alla metodologia affrontate e risolte:

- disponibilità di dati sperimentali che siano simili e rappresentativi del comportamento di un impianto nucleare;
- quantificazione della accuratezza e giustificazione delle relazioni tra il valore della accuratezza, ottenuta su simulatori in scala e la incertezza relativa ad impianti reali.

Preliminarmente a questi due punti si deve operare una valutazione del progetto del simulatore delle condizioni al contorno ed iniziali dell'esperimento, della strumentazione impiegata,

¹Per questioni strutturali implicite del modello, non sempre è possibile rispettare in ogni parte del circuito un'unica legge di scala.

della qualità dei dati registrati, nonché una analisi dei fenomeni occorsi; contemporaneamente deve essere stato intrapreso il processo di qualificazione del codice, verificata la possibilità del codice di riprodurre ed identificare i fenomeni termoidraulici rilevanti, nonché la qualifica della nodalizzazione e dell'utilizzatore.

L'extrapolazione della accuratezza per ottenere la incertezza, viene fatta considerando un parametro^{/6/} (che può essere geometrico o termoidraulico) che funga da guida al quale si riferiscano i valori della accuratezza sia nei simulatori che nell'impianto (incertezza).

La scelta di tale parametro deve rispondere ad alcuni requisiti che possono essere qui riassunti:

- deve esprimere il legame tra dati ottenuti per i simulatori e per gli impianti;
- deve essere correlato, da un punto di vista globale, con i fenomeni che si presentano;
- deve essere rappresentativo dello stato tecnologico-realizzativo del simulatore (in particolare rispetto all'impianto di riferimento).

Il parametro scelto è il volume del simulatore o, in forma adimensionale, il rapporto tra il volume del simulatore e dell'impianto di riferimento. In questo modo le discrepanze tra risultati calcolati e risultati sperimentali può essere posto in relazione ai volumi dei simulatori da cui i dati derivano. I dati devono essere tanto più significativi quanto più il simulatore si avvicina (da un punto di vista dimensionale) all'impianto di riferimento poiché sono ridotte le inevitabili distorsioni di scala.

Si può pensare alla metodologia UMAE come divisa in due parti tra loro integrate:

- preparazione, organizzazione ed ottenimento dei dati sperimentali e calcolati;
- extrapolazione dei risultati ottenuti.

Nella prima parte si raccolgono, si valutano e si accettano (oppure no) i dati sperimentali ottenuti dai 'counterpart tests' (test relativi allo stesso transitorio su simulatori diversi, ma tutti eseguiti imponendo un comune set di condizioni al contorno ed iniziali) e 'similar test' (test sperimentali dello stesso transitorio su simulatori diversi, ma operanti con condizioni al contorno ed iniziali diverse); la verifica ed accettazione dei dati sperimentali è fatta in base alla loro esaustività nel descrivere il transitorio, le condizioni al contorno ed iniziali in cui il test sperimentale ha avuto luogo, al fine di avere una completa descrizione degli eventi termoidraulici che si sono verificati nel transitorio; contemporaneamente si deve rendere disponibile un codice, nodalizzazioni e utilizzatori qualificati, per riprodurre col calcolo i test sperimentali; le due attività sono parallele, ma strettamente correlate: ciascun test relativo al transitorio in esame viene accuratamente analizzato e si verifica costantemente la corrispondenza tra transitorio sperimentale e calcolato, e tale verifica può comportare un riesame dei dati ottenuti sperimentalmente o una fase successiva di messa a punto dell'input del codice di calcolo.

L'analisi del transitorio è compiuta attraverso i seguenti passi^{/6/}:

- divisione in finestre fenomenologiche (PhW) che determinano le fasi principali attraverso cui si evolve il transitorio;
- si determinano i fenomeni chiave (KPh) e gli aspetti termodinamicamente rilevanti (RTA); i KPh identificano i fenomeni termoidraulici per le differenti tipologie di transitori (LOCA, AT, ecc.), mentre gli RTA descrivono il fenomeno per quel particolare transitorio; gli RTA forniscono una descrizione quantitativa dei fenomeni e sono costituiti da parametri, eventi temporali, valori integrali di parametri o valori adimensionali (nel seguito indicati rispettivamente con SVP, TSE, IPA e NDP) ai quali è associato un valore numerico.

Nella seconda parte, la disponibilità dei dati rende possibile l'ottenimento della accuratezza e quindi la successiva extrapolazione della incertezza; questa seconda fase mira a ridurre quanto più possibile l'intervento del giudizio di esperti (a tutti i livelli e non solo nel processo di extrapolazione) facendo ricorso per esempio a strumenti di tipo statistici.

In App. 1 è riportata una più dettagliata descrizione della metodologia UMAE.

2.2 Il codice RELAP5

Il RELAP5 è un codice termoidraulico per l'analisi di transitori di sistema che sono di interesse per la sicurezza dei reattori ad acqua leggera, sviluppato per simulare al meglio i transitori di reattori ad acqua in pressione e dei sistemi associati. Il codice è in grado di simulare transitori incidentali dovuti a situazioni di LB e SB-LOCA così come di AT, perdita di acqua di alimentazione, trip di potenza e perdita della portata.

Cenni sulle versioni del codice di calcolo RELAP

La serie delle diverse versioni del codice di calcolo RELAP è iniziata col codice RELAPSA (REactor Leak and Power Safety Excursion, 1966). Hanno fatto seguito la versioni RELAP2, RELAP3, RELAP4 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program). Tutti queste versione sono basate su un modello omogeneo di equilibrio del processo di flusso bifase. Nel 1976 lo sviluppo di un modello non-omogeneo di non-equilibrio venne realizzato per il RELAP4. Apparve subito evidente che si rendeva necessario riscrivere totalmente il codice per poter ottenere risultati significativi. Ciò portò allo sviluppo della versione RELAP5.

Il RELAP5 è un codice termoidraulico per l'analisi dei transitori di sistema che sono di interesse per la sicurezza dei reattori ad acqua leggera, sviluppato per simulare al meglio i transitori dei reattori ad acqua in pressione e dei sistemi associati^{/8/}.

La principale caratteristica del RELAP5, rispetto ai codici precedenti, consiste nell'uso di un modello idrodinamico non-omogeneo di non-equilibrio per la simulazione dei transitori dei sistemi bifase. L'uso del modello a due fluidi elimina la necessità, presente nel codice RELAP4, di ricorrere a sottomodelli come quelli di salita delle bolle e del trasporto di entalpia, necessari per superare le limitazioni del modello ad un fluido, ma condizionati dal fatto di ricorrere quasi esclusivamente a relazioni di tipo empirico.

In App. 2 è riportata una descrizione più dettagliata del codice RELAP5.

3. CIAU

3.1 Principi Generali

L'utilizzazione di un codice di calcolo pone il problema della determinazione della affidabilità e correttezza dei risultati ottenuti dal codice; esiste l'esigenza di disporre di una stima di quanto il dato calcolato sia vicino al dato sperimentale, sia esso disponibile o ipotetico; la Figura 1-3 riporta l'andamento calcolato e sperimentale di una generica variabile relativa ad un generico transitorio e le curve delimitanti una banda di errore del risultato calcolato.

Si noti che in questa sede non si vuole valutare se il dato calcolato sia fenomenologicamente corretto, poiché questa fase risulta espletata a monte della valutazione della correttezza del dato nel senso detto.

Il concetto di correttezza di un dato calcolato si concretizza tramite la misura della accuratezza/incertezza; benché entrambi questi termini abbiano lo stesso significato formale, specificano quantità assolutamente diverse concettualmente e quindi nel loro significato operativo; di accuratezza ed incertezza si parlerà nel proseguo di questo capitolo.

Le fonti che concorrono a determinare la accuratezza/incertezza di un risultato sono di diversa natura: alcune sono implicite nel codice stesso, altre derivano dall'utilizzatore, altre sono intrinseche al data-base utilizzato, altre ancora dalle condizioni iniziali ed al contorno del test considerato.

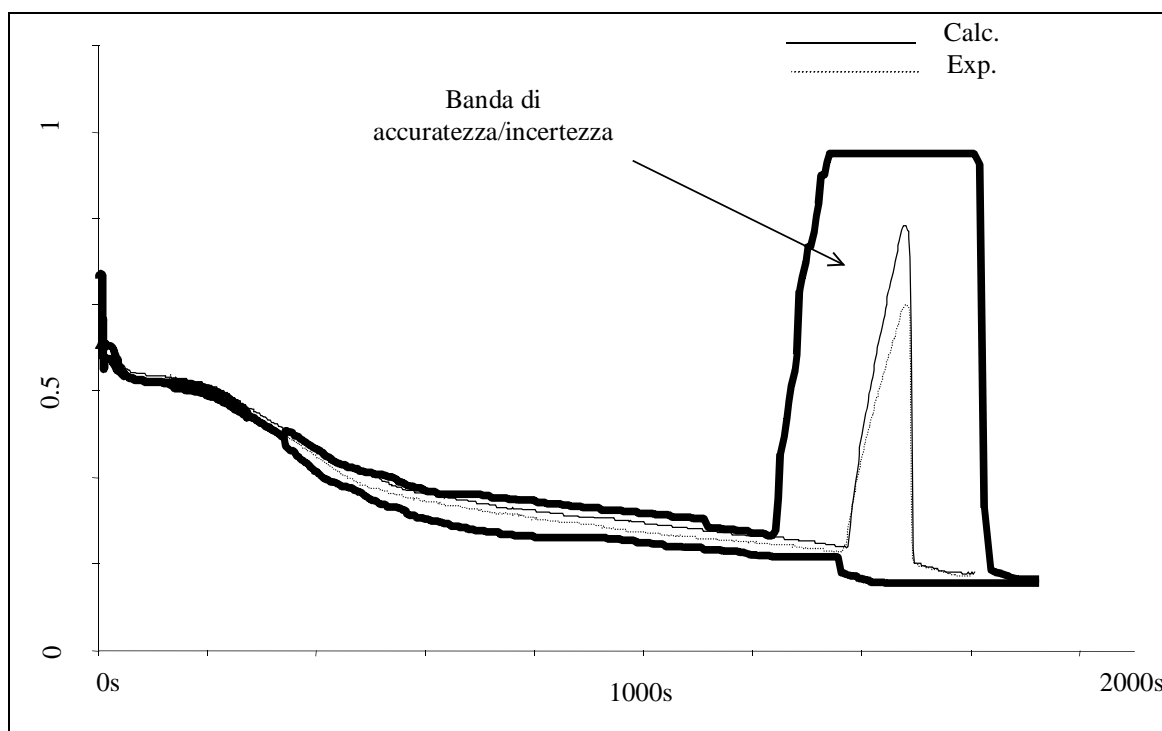


Figura 1 - Rappresentazione grafica accuratezza incertezza

Un elenco per sommi capi delle fonti che concorrono a generare una discrepanza tra dati sperimentali e risultati del calcolo è il seguente:

- inadeguatezza dei modelli matematici riproducenti i fenomeni fisici;
- approssimazioni degli algoritmi matematici usati per la risoluzione delle equazioni;
- inesperienza e opzioni selezionate dall'utilizzatore nell'uso del codice;

- inadeguatezza della nodalizzazione utilizzata per il codice;
- incompleta conoscenza dei dati che definiscono le condizioni iniziali ed al contorno di un test;

Una strada per la valutazione dell'errore che il codice commette nel calcolo dei risultati, può essere quella di valutare il contributo delle singole fonti e comporre i vari contributi ottenuti per ottenere un valore della accuratezza/incertezza. Tra i vantaggi c'è la possibilità di valutare gli errori del codice attraverso l'osservazione delle variazioni dei risultati ottenuti da calcoli parametrici e di sensitività; tra gli svantaggi si può considerare la necessità di condurre un certo numero di calcoli, e quello di dover identificare correttamente le fonti di errore.

Un altro metodo per la valutazione dell'accuratezza/incertezza del codice è quello di valutare in modo globale tale quantità. Questo approccio consiste nel confronto diretto tra dati calcolati e sperimentali disponibili. Anche in questo caso esistono vantaggi e svantaggi: tra i vantaggi c'è il fatto che l'errore del codice viene valutato in modo diretto e inequivocabile derivando da un confronto diretto tra quantità; tra gli svantaggi invece è sicuramente rilevante il fatto che l'errore così determinato è riferibile con certezza al caso contingente, il che rende necessario sviluppare una procedura di estrapolazione dell'accuratezza ai casi per i quali non sia disponibile il dato sperimentale (avvero ai calcoli di impianto).

La metodologia di incertezza UMAE segue il secondo approccio per la determinazione della accuratezza/incertezza dei risultati del codice. La procedura CIAU adotta la metodologia UMAE e quindi determina l'accuratezza/incertezza del codice attraverso un confronto tra dati calcolati e sperimentali.

La metodologia UMAE introduce i due concetti fondamentali di accuratezza e incertezza, entrambi esprimenti l'errore che i dati calcolati presentano rispetto ai dati sperimentali.

Ancora una volta si deve specificare che parlando di errore tra calcolato e risultati sperimentali, in questa sede, non si intende la mancata riproduzione nei risultati nel calcolo di uno o alcuni fenomeni termoidraulici, ma di errori intesi come differenza tra calcoli e dati sperimentali nel valutare uno stesso fenomeno (ed in senso più ampio un intero transitorio).

I due concetti, benché esprimano in senso stretto lo stesso concetto, sono assai diversi.

L'**accuratezza** è l'espressione dell'errore esistente tra i dati calcolati e sperimentali.

La definizione della accuratezza è la seguente:

$$A = \left| \frac{Y_e - Y_c}{Y_c} \right|$$

dove A è l'accuratezza, Y_e è il valore sperimentale di una generica grandezza e Y_c è il corrispondente valore calcolato.

L'accuratezza è misurabile (supposta l'esistenza dei dati sperimentali e calcolati): è sufficiente confrontare i dati sperimentali e quelli derivanti dal calcolo; è direttamente individuabile con precisione. Di contro il singolo dato di accuratezza ha generalmente valore solo per lo specifico test da cui è ottenuto, generalmente condotto su un simulatore e quindi non è applicabile direttamente ad un calcolo di impianto; per questa ragione l'UMAE prevede una estrapolazione dei valori di accuratezza per l'ottenimento della incertezza.

Per sgombrare il campo da eventuali fraintendimenti si deve fare notare che il concetto di accuratezza qui illustrato è una delle definizioni operative di accuratezza; infatti il concetto di accuratezza si ritrova nella metodologia UMAE anche con significati specifici diversi; la tabella seguente chiarisce i concetti di accuratezza relativi alle diverse fasi della metodologia UMAE e della procedura CIAU

Nella metodologia UMAE il concetto di accuratezza è anche impiegato nella fase di accettazione dei dati sperimentali, della nodalizzazione e dei dati calcolati; in questa fase il concetto di accuratezza conserva la definizione sopra data, ma con significativo operativo diverso: in questa fase fornisce un criterio (qualitativamente, punto I, II, III e quantitativamente punto IV, Tab. 1), per valutare l'accettabilità dei risultati ottenuti dal calcolo; in questa fase l'accuratezza è uno strumento di controllo e non di determinazione dell'errore (punto V, Tab. 1).

Type		Identification method	Involved parameters	Finalization	Acceptability criteria
I	Qualitative	Use of K. Ph.	K. Ph.	<ul style="list-style-type: none"> Acceptability of facilities Acceptability of experiments Acceptability of calculation 	Correspondence (existence in both involved DB) and <ul style="list-style-type: none"> Excellent Reasonable Minimum Unsatisfactory
II	Qualitative	RTA first step	RTA	<ul style="list-style-type: none"> Similarity between experiments DB Similarity between calculated and experimental DB Nodalization (ITF and ASM) qualification 	Correspondence (existence in both involved DB)
III	Qualitative	RTA second step	<ul style="list-style-type: none"> TSE IPA SVP NPA 	As above	<ul style="list-style-type: none"> Excellent Reasonable Minimum Unsatisfactory
IV	Quantitative	FFT	More than 20 significant trends	Calculation acceptability	$AA < 0.4$ $AAp < 0.1$
V	Quantitative	AFE	<ul style="list-style-type: none"> Primary side pressure Primary side inventory Core rods superficial temperature 	Accuracy extrapolation	Involved DB acceptability from previous method point of view

Tabella 1 - Definizioni di Accuratezza

La valutazione della accettabilità del valore del dato calcolato non rientra nella fase di valutazione dell'accuratezza della procedura CIAU, ma è una fase che si trova a monte di essa. La definizione di accuratezza qui utilizzata, stima l'errore dei risultati del calcolo, ma non entra nel merito della accettabilità del dato calcolato.

L'**incertezza** è definita come l'errore da associare ai risultati ottenuti dal codice quando viene eseguito un calcolo di un test (tipicamente un calcolo di impianto), quando per quel test non sono disponibili dati sperimentali. L'incertezza non è valutata direttamente, ma, nella metodologia UMAE, risulta come espressione di un processo di estrapolazione della accuratezza. Inoltre l'incertezza ha valore generale e non risulta definita per un transitorio particolare.

L'incertezza risulta così il prodotto del processo messo in atto dalle metodologie di incertezza.

Concetto di stato del transitorio

L'evoluzione dei transitori avviene attraverso una successione temporale di fenomeni termoidraulici ed eventi imposti in cui risulta chiara ed individuabile la sequenza causa/effetto che lega i fenomeni osservati. L'analisi fenomenologica non è però lo scopo del presente studio; ciò che si vuole ottenere è l'incertezza/accuratezza associabile ai risultati ottenuti dal codice. Si è introdotto il concetto di "stato" del transitorio, come condizione determinata del transitorio (simulato o reale),

ma indipendente dal tipo di transitorio che ha originato tale stato. Il concetto di stato del transitorio non ha un valore di analisi fenomenologica, ma solo di identificazione di condizioni del codice (riproducendo quindi una situazione del transitorio) cui sia possibile associare una determinabile e costante valutazione della incertezza/accuratezza; il concetto di stato lo stato è introdotto per poter considerare contemporaneamente i dati derivanti da molti transitori/test contemporaneamente; non è specifico di una fase specifica di un transitorio/test né di una specifica tipologia di transitorio/test; è quindi inadatto per lo studio di uno specifico transitorio/test.

Ovviamente lo stato non è svincolato dai fenomeni fisici che si verificano in un test/transitorio:

- le condizioni (stati) che il codice può rappresentare sono teoricamente infinite, ma non tutte significative se si considerano come parte di un transitorio di un impianto;
- gli stati del codice hanno significato solo se ad essi è associabile un valore di accuratezza/incertezza e quindi sono considerati solo quegli stati che si determinano durante un transitorio ovvero che prevedono l'esistenza di valori di confronto sperimentali.

Quanto detto pone in rilievo che lo stato del codice non è slegato dalla sequenza di causa-effetto dei fenomeni che si svolgono durante il transitorio, pur costituendo uno strumento che è indipendente dallo specifico transitorio.

Volendo dare una definizione di stato esso è una condizione del codice in cui il valore della accuratezza/incertezza quantitativa dei risultati del codice sono (circa) costanti ovvero non molto diversi.

Quantità identificative dello stato

La definizione di stato che è stata data precedenti deve essere concretizzata in una definizione operativa, che permetta l'uso del concetto di stato in una procedura applicabile dall'operatore della CIAU.

L'identificazione dello stato è effettuata selezionando un certo numero di variabili fisiche, che costituiscono le coordinate identificative dello stato. La scelta di tali variabili risulta delicata poiché ha ripercussioni sia a livello operativo che più generale nella interpretazione dei dati di accuratezza.

Si deve da un lato evitare di selezionare troppe variabili, poiché:

- sul piano operativo significa dover trattare un numero di dati molto elevato (vedi anche oltre) che può comportare un appesantimento nella realizzazione informatica della procedura;
- sul piano concettuale si rischia di introdurre un numero di stati così elevato da rendere molto bassa la "densità" di dati di accuratezza per gli stati così definiti, da inficiare il processo di estrapolazione (vedi oltre).

D'altro canto un numero di stati troppo basso rischia di rendere inefficace il concetto stesso di stato, in quanto stati diversi per il contenuto di accuratezza verrebbero ad essere identificati come uno stesso stato con conseguente commistione di dati non confrontabili tra loro.

Le variabili selezionate nel presente studio sono state scelte secondo i seguenti principi:

- la disponibilità di data-base sperimentali e calcolati qualificati;
- variabili che siano rappresentative in via generale dei fenomeni (e quindi degli stati) presenti nei transitori considerati;
- esperienza guadagnata nella applicazione del codice e della metodologia di incertezza UMAE.

Queste scelte hanno portato alla selezione di sei grandezze:

- pressione del circuito primario;
- massa del refrigerante del circuito primario;

- pressione del circuito secondario;
- temperatura superficiale delle barrette di combustibile a $2/3$ della altezza del nocciolo;
- potenza prodotta dal nocciolo
- livello del down-comer del generatore di vapore.

Le sei grandezza selezionate definiscono lo spazio entro cui sono individuati gli stati; non è rilevante che alcune delle grandezze scelte siano dipendenti dalle altre, perché, benché questo possa avere significato da un punto di vista fisico, lo scopo degli stati non è quello di una indagine fenomenologica del transitorio, ma è relativo alla determinazione dell'errore commesso dal codice, e sotto questo punto di vista è sufficiente che gli stati si differenzino per il diverso valore della accuratezza/incertezza. Per chiarire il concetto si può pensare che in talune situazioni alcune variabili siano effettivamente funzione delle altre ed in questo caso basterebbe specificare una numero minore di quantità per identificare lo stato, ma poiché gli stati coprono tutto l'arco del transitorio, saranno necessarie tutte le quantità almeno per alcuni stati; se infine si ipotizza un legame tra le variabili definenti lo stato, questo significa che alcuni stati e cioè quelli individuati da una sequenza di valori delle variabili non fisicamente possibile, non conterranno alcun dato poiché nessun transitorio evolverà attraverso quegli stati.

Bisogna ricordare, che gli stati sono quelli prodotti dai transitori, quindi hanno un legame con il processo fisico pur essendo significativi solo dal punto di vista della determinazione della accuratezza dei risultati del codice.

Indipendenza dal tempo

Benché lo stato abbia significato in quanto derivante da una situazione fenomenologica verificatasi in un transitorio, risulta indipendente dai fenomeni, che in quel transitorio, hanno concorso al verificarsi di quelle condizioni. Questo significa che in qualunque istante si presentino le stesse condizioni, anche più volte nel transitorio ed in momenti diversi, ci si trova di fronte sempre allo stesso stato; ovvero ci si trova in condizioni tali che il codice produce risultati con valori confrontabili (vicini o simili) di accuratezza/incertezza.

In ultima analisi se si intende il transitorio come sequenza temporale di fenomeni, si può dire che lo stato è indipendente dal tempo. Questa affermazione è una ipotesi basilare della procedura proposta in questa sede. Ad essa deve essere associata una ulteriore ipotesi perché il concetto di stato del transitorio possa trovare un significato applicativo. Tale ipotesi è la seguente: l'accuratezza/incertezza è composta da due termini, una accuratezza/incertezza quantitativa ed una temporale.

La combinazione delle due componenti da luogo alla incertezza/accuratezza (globale) propriamente detta. Queste due componenti sono separabili, cioè possono essere valutate separatamente. Il concetto di stato del transitorio è utilizzato per ottenere la incertezza/accuratezza quantitativa, che non è una valutazione di una diversa specie di incertezza/accuratezza, ma di un componente della incertezza/accuratezza globale.

Indipendenza dal transitorio

L'ipotesi di indipendenza dal tempo ovvero dalla particolare sequenza di fenomeni che hanno portato ad un particolare stato, ha una conseguenza più ampia e cioè quella di rendere lo stato indipendente non solo dal tempo, ma anche dal transitorio in cui viene rilevato: infatti è indipendente dalla serie di fenomeni (in breve dalla storia) che hanno concorso a determinare quello stato.

Lo stato è legato ad una condizione verificatasi durante un transitorio, ma in questa sede rappresenta una condizione del codice inteso come strumento di simulazione (quindi come insieme di equazioni e algoritmi di risoluzione), ed ha rilevanza dal punto di vista dell'errore che il codice

commette e quindi slegato dalla significatività della sequenza causa/effetto fenomenologica ovvero l'aspetto più propriamente fisico del transitorio.

Una considerazione di ordine generale sull'indipendenza dello stato dal transitorio è la seguente:

il codice è costituito essenzialmente da un insieme di equazioni ed algoritmi di risoluzione ed i valori delle quantità termodinamiche ne costituiscono i parametri di input/output; è pensabile che l'insieme di equazioni e di algoritmi dia soluzioni più o meno buone, rispetto agli effettivi risultati fisici, quando i parametri in input assumano valori che si trovino entro determinati intervalli, indipendentemente dalla causa che ha portato un parametro ad assumere valori in tali intervalli.

L'ipotesi di indipendenza dal transitorio ha una importanza notevole, poiché permette di considerare contemporaneamente per la valutazione della accuratezza/incertezza dati derivanti da diverse tipologie di transitorio.

E' questo un aspetto che determina una situazione di conflitto tra la metodologia di incertezza utilizzata, UMAE e la procedura CIAU; tale conflitto però è solo procedurale e non sostanziale: la UMAE prevede l'applicabilità del processo di estrapolazione della accuratezza per ottenere l'incertezza solo per valori di accuratezza che derivano da test relativi ad uno specifico transitorio (i "counterpart test").

L'accuratezza ottenuta da un singolo test, senza l'ausilio del concetto di stato, è agevolmente confrontabile con quella calcolata per altri test solo se i dati derivano tutti dallo stesso tipo di transitorio e con condizioni iniziali ed al contorno simili; infatti in questo modo attraverso una analisi fenomenologica (ed i counterpart test presentano una fenomenologia comune) è possibile combinare valori diversi di accuratezza sulla base della appartenenza ad una stessa condizione fenomenologica. Nella procedura CIAU l'accuratezza è ottenuta con modalità differenti attraverso l'introduzione dello stato del transitorio e questo come visto porta alla possibilità di confrontare dati di accuratezza derivanti da transitori diversi.

Bisogna comunque sottolineare che quando si parla di transitori diversi, fatta salva la verifica di accettabilità dei dati sia calcolati che sperimentali, si intendono transitori che la particolare versione del codice selezionata è in grado di affrontare secondo quelle che sono le specifiche indicate nel manuale d'uso del codice stesso.

Intervalli temporali

Per la componente temporale della accuratezza/incertezza, l'asse del tempo sia del calcolo che del test sperimentale è suddiviso in intervalli; tali intervalli sono rappresentativi di una fase specifica del transitorio e in generale gli intervalli relativi ai risultati del calcolo hanno ampiezze e estremi diversi da quelli corrispondenti, individuati per i risultati del test sperimentale; l'errore di tempo si calcola come l'errore esistente tra gli estremi corrispondenti degli intervalli calcolati e sperimentali riferiti ad una stessa fase. La variazione di errore esistente all'inizio ed alla fine dell'intervallo di confronto, viene associato agli istanti temporali interni in modo lineare.

Questa costituisce una semplificazione ritenuta sufficientemente rappresentativa dell'errore di tempo da associare ai vari istanti temporali interni agli intervalli.

Non si considerano errori di tempo che decrescano col procedere del transitorio. Se ciò dovesse verificarsi si assume che l'errore di tempo resti uguale al valore del massimo precedentemente calcolato.

3.2 – Idee base realizzative

Quanto esposto precedentemente si traduce operativamente in due elementi che verranno nel seguito spesso richiamati e che costituiscono i due oggetti nei quali sono raccolti i dati di accuratezza necessari per l'estrapolazione ed infine i risultati ottenuti di incertezza. Questi elementi

sono presenti e sono utilizzati in forme specifiche da tutte le procedure della CIAU e quindi conviene introdurli a questo punto per avere una idea di cosa sono e del loro impiego in via generale. Nei paragrafi successivi verranno spiegate la struttura di questi due elementi, per chiarirne la funzione, mentre i dettagli verranno illustrati nel capitolo 3.2 relativo alle procedure CIAU.

Matrice accuratezza/incertezza quantitativa (ipercubi)

Gli stati attraverso cui il transitorio evolve, come detto, sono identificati nello spazio definito dalle sei variabili selezionate a questo scopo, (pressione circuito primario, massa del refrigerante del circuito primario, pressione del circuito secondario, temperatura superficiale della barretta di combustibile a 2/3 della altezza del core, potenza emessa dal core e livello del refrigerante nel downcomer del generatore di vapore). Le sei variabili in questione variano all'interno di stabiliti limiti di validità. Tali limiti sono stati selezionati considerando i valori che esse assumono durante i transitori e le limitazioni descritte nel manuale d'uso del codice.

All'interno dei limiti di variazione delle sei variabili si è provveduto ad una ulteriore suddivisione del campo di validità, in intervalli; in ogni istante è possibile individuare una sestupla di intervalli, uno per variabile, che individua lo stato in cui un transitorio sta evolvendo; in sostanza una qualunque combinazione di sei intervalli (ognuno appartenente ad una diversa variabile) definisce un stato di un generico transitorio. Poiché lo stato è rappresentabile in uno spazio esadimensionale nel proseguo verrà indicato con il termine di **ipercubo**. L'ipercubo attraverso cui un transitorio sta evolvendo viene identificato utilizzando i valori delle variabili del calcolo.

L'ottenimento degli intervalli per ciascuna variabile, deriva dalle seguenti considerazioni elencate in ordine di priorità:

1. gli ipercubi che si ottengono devono rispondere alla definizione di stato e cioè di una condizione per la quale il codice produce valori di accuratezza confrontabili tra loro;
2. sul piano pratico si è cercato di ridurre al minimo il numero di intervalli per ogni variabile, in modo da poter operare con il minore numero possibile di ipercubi;
3. il numero e l'ampiezza degli intervalli per le diverse variabili, non è costante, in quanto ogni variabile richiede un dettaglio diverso ai fini della valutazione della accuratezza;
4. si è cercato di identificare gli estremi degli intervalli con valori che abbiano un riferimento fenomenologico, ovvero l'ampiezza di un intervallo, per quanto possibile, coincide con le condizioni per cui generalmente si verifica un evento o fenomeno rilevante per l'impianto.

Il punto 1 risponde alla necessità di ottenere ipercubi che abbiano significato per il presente studio.

Il punto 2 ha carattere eminentemente pratico: operare con un alto numero di ipercubi significa, come si vedrà più avanti, operare con matrici di dati di grosse dimensioni, che possono appesantire il calcolo e richiedere risorse in termini di potenza di calcolo, notevoli. Inoltre un numero di ipercubi più elevato del necessario può portare ad avere all'interno dei singoli ipercubi un numero di dati troppo esiguo perché la estrapolazione possa dare risultati significativi.

Circa il punto 3, i valori per i quali gli ipercubi sono definiti non saranno equispaziati per le diverse variabili, perché le diverse variabili non avranno bisogno dello stesso dettaglio per la definizione degli ipercubi.

Il punto 4 esprime da un lato la necessità di individuare per quanto possibile dei limiti per gli intervalli significativi e facilmente identificabili, mentre dall'altro esprime la convinzione che in generale l'accuratezza/incertezza del codice possa variare al variare dei fenomeni che il codice deve rappresentare.

La suddivisione in intervalli utilizzata, delle variabili è quella mostrata nella Tab. 2.

(1) UPPER PLENUM PRESSURE [MPa]	(2) PRIMARY CIRCUIT MASS INVENTORY [%](°)	(3) STEAM GENERATOR PRESSURE [MPa]	(4) CLADDING TEMPERATURE AT 2/3 CORE HEIGHT [K]	(5) CORE POWER [%](°)	(6) STEAM GENERATOR LEVEL [%](°)
18.0	120.	9.0	1473.	130.	150.
15.0	100.	7.0	973.	100.	100.
10.0	80.	3.0	643.	50.	50.
9.0	40.	0.1	573.	6.0	0.
7.0	5.		473.	1.0	
5.0			298.	0.1	
4.0					
2.0					
0.1					

(°) of the initial (nominal) value

Tabella 2 - Intervali delle variabili identificative degli ipercubi

Il numero di ipercubi con tale suddivisione risulta di 8100. Non tutti gli ipercubi sono però significativi in quanto alcuni sono identificati da una combinazione di variabili che non hanno rilevanza se riferiti ai transitori di impianti nucleari di potenza, o perché corrispondono a condizioni che, per la presenza dei sistemi di emergenza, non sono mai verificati, o perché effettivamente privi di significato fisico. Questo riduce a circa 5400 gli ipercubi significativi. La presenza di ipercubi privi di dati non costituisce comunque un problema, in quanto significa che nessun transitorio evolverà attraverso quegli ipercubi.

L'insieme degli ipercubi è organizzato operativamente in una matrice a sei dimensioni: ogni elemento della matrice rappresenta un ipercubo. Gli ipercubi sono identificati da un codice di sei cifre in cui la posizione e il valore di ogni cifra corrispondono alla variabile e all'intervallo in cui il valore della variabile si trova, rispettivamente.

Esistono diverse matrici di ipercubi che contengono dati diversi nelle diverse fasi del processo della procedura CIAU; in ogni elemento della matrice sono raccolte più informazioni:

- in fase di determinazione della accuratezza per il singolo test viene creata una matrice di accuratezza quantitativa contenente oltre al valore della accuratezza, i dati relativi al simulatore ed al test da cui tali dati di accuratezza derivano; in questa fase viene creata una matrice per ogni test utilizzato per l'ottenimento di dati di accuratezza; successivamente tutte le matrici relative ai singoli test vengono raggruppate insieme, ma i dati dei singoli test sono ancora separati ed identificabili; la matrice così ottenuta è detta Matrice di Accuratezza Quantitativa (QAM da Quantitative Accuracy Matrix);
- in fase di determinazione della incertezza si ottiene una matrice di incertezza quantitativa in cui ogni elemento della matrice, rappresentante un singolo ipercubo, contiene il relativo valore di incertezza da associare ai risultati del calcolo quando il transitorio evolve attraverso quell'ipercubo; la matrice ottenuta è detta Matrice di Incertezza Quantitativa (QUM da Quantitative Uncertainty Matrix).

Vettore accuratezza/incertezza temporale

Gli ipercubi costituiscono una struttura QAM/QUM che è utilizzata per immagazzinare la accuratezza/incertezza quantitativa, che non contiene quindi alcuna informazione circa la accuratezza/incertezza temporale. La accuratezza/incertezza temporale è determinata in modo autonomo da quella quantitativa, attraverso l'uso di intervalli di confronto; come si vedrà nel seguito gli intervalli di confronto identificano le fasi del transitorio in modo che sia possibile operare un confronto tra fasi calcolate e sperimentali, corrispondenti. Tralasciamo qui di spiegare in dettaglio come si ottengano gli intervalli di confronto che è oggetto del paragrafo 3.3.

Quello che è rilevante sapere è che all'interno degli intervalli di confronto relativi ai risultati del calcolo sono individuati degli istanti temporali secondo un passo temporale che è illustrato nella Tab. 3.

No.	Transient duration (physical time) (s)	Period (s)	Time step (s)	Time Interval (sequential number)
1	0-100	0-100	1.	from 1 to 100
2	0-1000	0-100	1.	from 1 to 100
		100-1000	2.	from 101 to 550
3	0-10000	0-100	1.	from 1 to 100
		100-1000	2.	from 101 to 550
		1000-10000	5.	from 551 to 2350
4	> 10000	0-100	1.	from 1 to 100
		100-1000	2.	from 101 to 550
		1000-10000	5.	from 551 to 2350
		> 10000	10.	from 2350 to ∞

Tabella 3 - Suddivisione degli intervalli di confronto

Gli istanti temporali così determinati costituiscono gli estremi di una sequenza di intervalli temporali che coprono l'asse temporale del calcolo; l'accuratezza/incertezza temporale è calcolata e riferita agli intervalli temporali relativi al calcolo.

L'asse temporale del test sperimentale viene ugualmente suddiviso nello stesso numero di intervalli temporali, ma poiché gli intervalli di confronto del test sperimentale hanno una ampiezza diversa dai corrispondenti calcolati, gli intervalli temporali sperimentali hanno una ampiezza che è solo proporzionale a quella dei corrispondenti calcolati (come è più in dettaglio mostrato nel paragrafo 3.3). In ogni caso la suddivisione dell'asse temporale del test sperimentale in intervalli temporali è effettuata solo allo scopo di confrontare i dati calcolati con quelli sperimentali ed ad essi non è quindi ricondotta l'accuratezza/incertezza temporale.

L'ampiezza del passo per la identificazione degli intervalli temporali è stata determinata sulla base delle seguenti considerazioni:

- nei primi istanti di un transitorio i fenomeni che il codice deve riprodurre generalmente avvengono con rapidità e comportano variazioni di grandezze fisiche rilevanti; è esperienza comune (almeno per l'autore) dover gestire il codice nei primi secondi di un calcolo di un transitorio imponendo che questo operi con passi temporali generalmente piccoli rispetto a quelli che mediamente possono essere adottati per il resto della durata del transitorio; questa fase è piuttosto delicata e quindi un confronto più 'fitto' cioè ricavando valori di accuratezza/incertezza con frequenza elevata è sembrata necessaria; si può anche aggiungere che nella fase iniziale di un transitorio si verificano le condizioni che portano alla evoluzione della rimanente parte di transitorio e quindi la determinazione dell'errore commesso dal codice in questa fase risulta particolarmente importante;
- per i transitori molto lunghi può essere tollerato un errore maggiore di quello calcolato per transitori a durata breve; quando un transitorio risulta molto lungo l'errore assoluto tollerabile commesso dal codice può senz'altro essere superiore rispetto a quello che il codice commette per transitori brevi.

La serie di intervalli temporali che coprono tutta la durata dei transitori è rappresentato dal punto di vista operativo con un vettore. Ogni elemento del vettore costituisce un intervallo temporale. Analogamente a quanto avviene per la matrice degli ipercubi esistono diversi vettori

rappresentanti l'insieme di intervalli temporali, nelle diverse fasi del processo della procedura CIAU; nei singoli elementi del vettore sono registrate più informazioni:

- in fase di determinazione della accuratezza per il singolo test viene costruito un vettore di accuratezza temporale che contiene oltre al valore della accuratezza, i dati relativi al simulatore ed al test da cui tali dati di accuratezza derivano; in questa fase viene creato un vettore per ogni test utilizzato per l'ottenimento di dati di accuratezza; successivamente tutti i vettori relativi ai singoli test vengono raggruppati insieme, ma i dati dei singoli test sono ancora separati ed identificabili; il vettore così ottenuto è detto Vettore di Accuratezza Temporale (TAV da Time Accuracy Vector);
- in fase di determinazione della incertezza si ottiene un vettore di incertezza temporale in cui ogni elemento del vettore, rappresentante un singolo intervallo temporale, contiene il relativo valore di incertezza da associare ai risultati del calcolo quando il transitorio evolve attraverso quell'intervallo temporale; il vettore ottenuto è detto Vettore di Incertezza Temporale (TUV da Time Uncertainty Vector).

3.3 Procedure

Introduzione

La CIAU è una procedura che realizza l'integrazione tra il codice di calcolo termoidraulico e la metodologia di incertezza. Benché questa sia la definizione di base dalla CIAU, essa non è però solo la somma di queste due componenti, ma è anche costituita da una serie di ipotesi, interfacce e soluzioni specifiche al problema di integrare la metodologia ed il codice. Nei capitoli precedenti sono state illustrate le idee fondamentali della procedura CIAU; in questo capitolo verrà mostrato in dettaglio il funzionamento della procedura.

La CIAU si compone di due parti fondamentali, una di sviluppo ed una applicativa, la seconda attuabile solo dopo che la prima è stata completamente espletata. Sia da un punto di vista logico che realizzativo la CIAU è composta da una serie di sub-procedure (nel seguito indicate semplicemente procedure). Poiché le singole procedure svolgono funzioni autonome ma inquadrare in una struttura logica sequenziale, si presenterà la CIAU attraverso il funzionamento e il concatenamento delle procedure che la compongono.

Le procedure messe a punto per la CIAU sono le seguenti:

- AFE (da Accuracy Finalized to Extrapolation): calcola l'accuratezza ottenibile dalla analisi dei singoli test;
- DAST (da DATA for Statistical Treatment): estrapola i dati di accuratezza per ottenere l'incertezza;
- UBEP (Uncertainty Band from Extrapolation Process): determina le bande di incertezza per il calcolo di impianto.

Uno schema semplificato delle relazioni che legano le procedure che compongono la CIAU è mostrato nella Fig. 2

Insieme a queste procedure ne esistono di accessorie che svolgono compiti di secondaria importanza e non direttamente connesse con i concetti fondamentali della CIAU:

- Collect : crea una matrice di accuratezza quantitativa ed un vettore di accuratezza temporale in cui sono raccolti tutti i dati derivanti dalla analisi di tutti i test considerati;
- Interpol: programma di interpolazione che trasforma dati derivanti da fonti diverse in modo che possiedano tutti lo stesso passo temporale di campionamento.

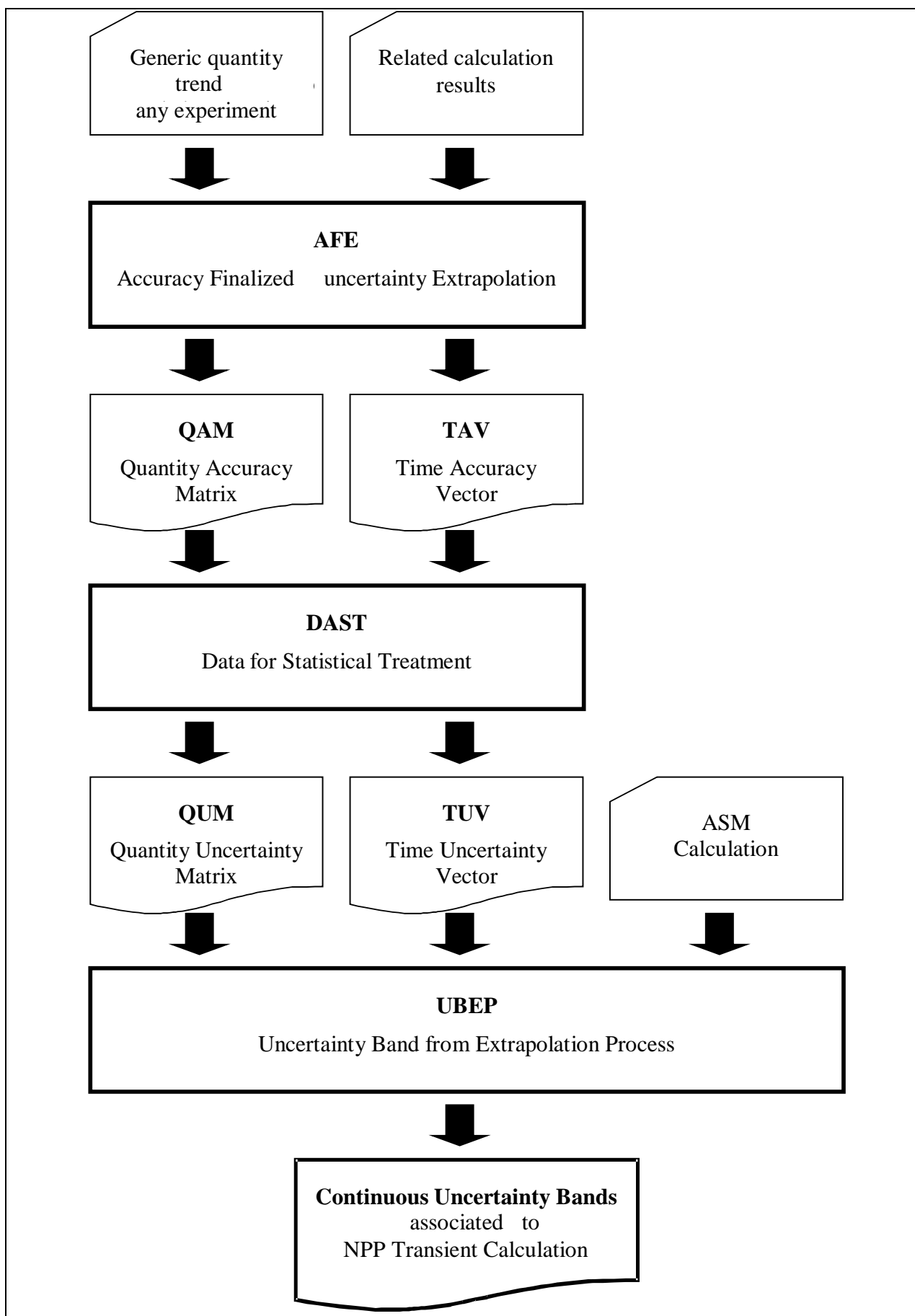


Figura 2 - Schema semplificato di interrelazione delle procedure che compongono la CIAU

3.3.1 AFE

La procedura AFE calcola i dati di accuratezza quantitativa e temporale dal confronto tra i risultati ottenuti dai test sperimentali e dai relativi calcoli condotti con il codice.

La Fig. 3 riporta il diagramma di flusso della procedura AFE.

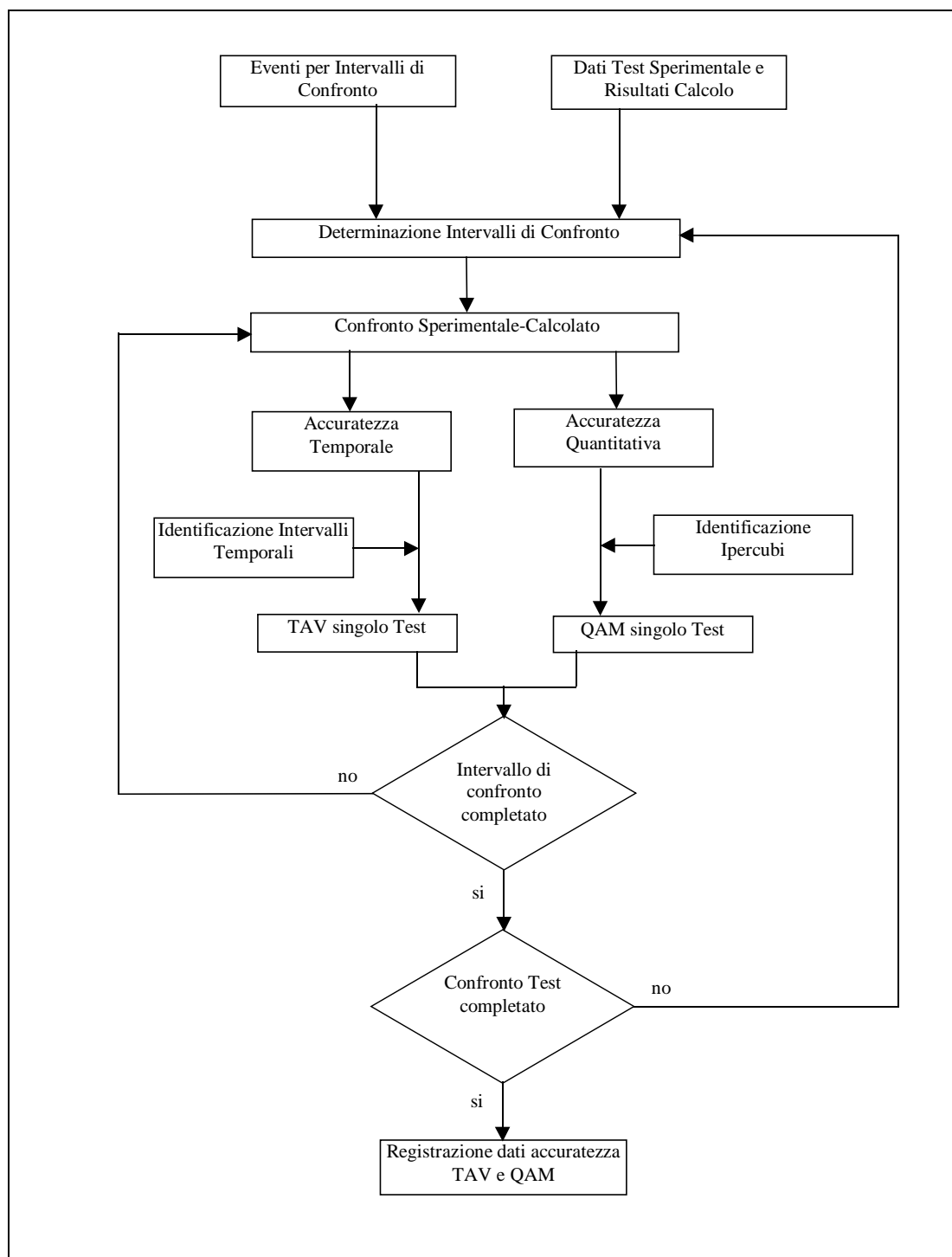


Figura 3 - Diagramma di flusso della procedura AFE

Test utilizzabili

Qualunque categoria di test nell'ambito degli impianti PWR è utilizzabile, fatte salve le indicazioni presenti nel manuale del codice relativamente ai test ed alle condizioni termodinamiche che il codice è in grado di riprodurre.

Tra le tipologie di test considerate, assume particolare rilievo quella dei transitori operazionali condotti su impianti di potenza. I dati derivanti da impianti di potenza hanno una importanza notevole poiché i valori di accuratezza che sono ricavabili in questo caso non sono affetti dagli errori tipici dei test condotti su simulatori in scala (come l'assenza di distorsioni di scala); essi hanno un alto "peso specifico" in seno al processo di estrapolazione.

Un'altra categoria di dati utilizzati sono quelli derivanti dei test condotti su SETF (Separate Effects Test Facility). Nella procedura CIAU è stata introdotta la possibilità di utilizzarli, rendendo così disponibile alla estrapolazione una quantità rilevante di dati.

I dati derivanti da SETF essendo generalmente relativi allo studio di un fenomeno o di un gruppo di fenomeni tra loro connessi, e non ad un transitorio completo (le SETF riproducono generalmente solo una parte dell'impianto che simulano), può accadere che non tutte le informazioni necessarie per l'impiego nella procedura AFE siano note: quando non sono disponibili i dati completi per la individuazione dell'ipercubo in cui il test sta evolvendo nel generico istante di tempo, deve comunque essere possibile stimare il valore delle variabili mancanti; oppure una variabile non nota può non essere rilevante per quel particolare test, e quindi il valore di accuratezza calcolato è applicato a tutto l'intervallo di variazione di quella variabile. Questa tipologia di test generalmente forniscono solo alcune delle variabili selezionate nel presente studio per l'estrapolazione (che ricordo essere pressione circuito primario, massa di refrigerante del circuito primario e la temperatura di camicia a 2/3 di altezza del core); quindi la procedura AFE presenta l'opzione di escludere alcune variabili (compreso eventualmente il tempo) dal processo di estrapolazione.

Più in generale l'esclusione di alcune variabili dal processo di estrapolazione può essere applicata in quelle situazioni in cui i dati ottenuti non consentano di disporre delle informazioni necessarie per ottenere l'accuratezza per alcune delle variabili selezionate.

Determinazione degli intervalli di confronto

Alla base della corretta determinazione della accuratezza dei risultati di un calcolo vi è la modalità di confronto tra i dati sperimentali e calcolati. Non è accettabile un confronto tra grandezze corrispondenti, sulla base di un riferimento temporale assoluto rispetto al quale confrontare i valori delle due variabili, per le seguenti ragioni:

- può accadere di operare un confronto tra grandezze che stanno evolvendo in una fase sperimentale e calcolata, diverse;
- non si tiene conto della accuratezza temporale.

Un calcolo che ben riproduca fenomenologicamente un test sperimentale, ma che presenti un ritardo temporale costante, in un confronto basato sulla premessa sopra scritta, porterebbe a rilevare erroneamente, errori quantitativi anche notevoli, mentre l'errore temporale verrebbe di fatto trascurato, o comunque non sarebbe con questa modalità misurabile. Come si vede in Fig. 4 all'istante t_1 si misurerebbe un errore quantitativo pari a A_0 , mentre l'errore quantitativo significativo è A_{q1} , ma con un errore temporale di At_1 .

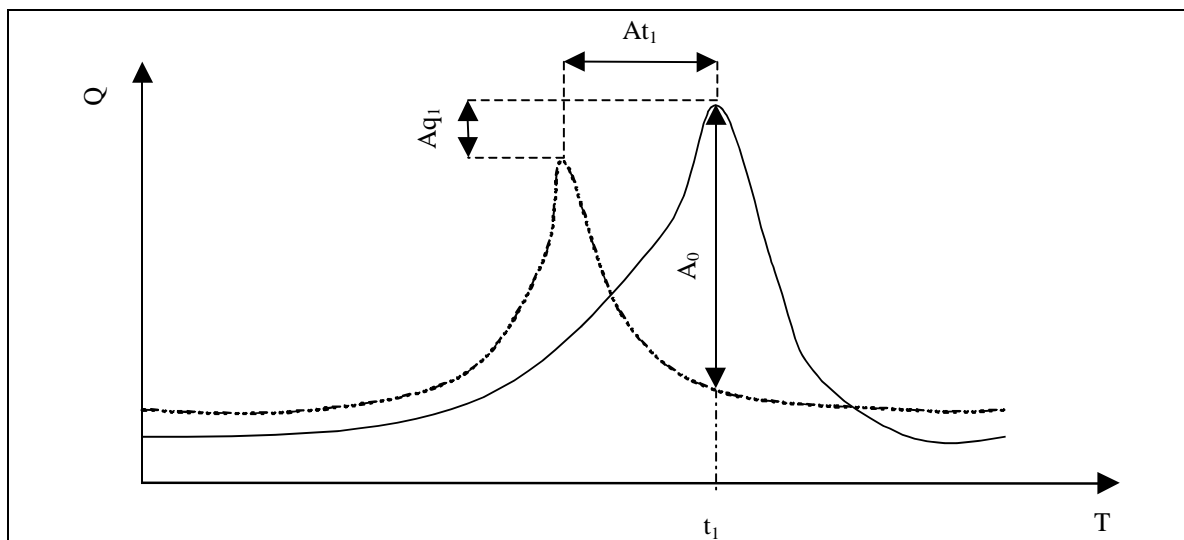


Figura 4 - Confronto tra dati calcolati e sperimentali

La modalità di valutazione della accuratezza che è stata implementata nella procedura AFE si basa sui seguenti punti:

- devono essere confrontate quantità corrispondenti, che siano relative ad una stessa fase del transitorio;
- poiché le fasi del transitorio, corrispondenti del calcolo e del test sperimentale, evolvono con tempistica diversa, è possibile misurare una differenza temporale da cui derivare la accuratezza temporale.

La determinazione delle fasi del transitorio (sia nel test sperimentale che calcolato) è quindi il problema centrale per la determinazione della accuratezza, poiché in dipendenza di come si definiscono le fasi, si possono avere valori di accuratezza più o meno significativi. Un ulteriore requisito della fase del transitorio è quello di richiede per la propria individuazione, il minimo intervento possibile da parte dell'operatore. Benché la determinazione della accuratezza del singolo test intervenga solo nella fase di sviluppo della CIAU, e non competa quindi all'utilizzatore finale della CIAU stessa, è stato ritenuto comunque necessario introdurre a tutti i livelli un modo di operare quanto più possibile standardizzato (sia nello sviluppo che nell'impiego della procedura CIAU) limitando il ricorso al giudizio soggettivo dell'operatore quanto più possibile.

Il sistema che è stato utilizzato per la determinazione delle fasi di un transitorio è quello di definire una lista di eventi possibili (Tab. 4); tali eventi costituiscono gli estremi che delimitano le varie fasi.

Durante l'analisi del singolo transitorio verranno identificati gli istanti temporali in cui si verificano, sia nel test sperimentale che nel calcolo, gli eventi che sono riportati in tabella (ovviamente solo quelli osservati nel transitorio considerato); tali istanti definiscono gli estremi temporali delle fasi.

Si devono fare alcune precisazioni:

- non esiste la possibilità che un certo evento sia presente solo nel test sperimentale o solo nel calcolo; le procedure della metodologia UMAE sanciscono l'accettabilità di un calcolo quando questo riproduce tutti i fenomeni rilevanti evidenziati nel test sperimentale senza peraltro introdurne di nuovi; in alcuni particolari casi, anche in mancanza di una perfetta corrispondenza fenomenologica tra risultati calcolati e sperimentali, si può procedere alla determinazione delle fasi, una volta comprese le cause di tale discrepanza, e si sia ugualmente in grado di identificare l'istante in cui il fenomeno mancante avrebbe dovuto verificarsi; comunque si deve sottolineare che in

generale l'UMAE considera inaccettabile un calcolo che non sia in grado di riprodurre i fenomeni fluidotermodinamici tipici del transitorio studiato ed osservati nel test sperimentale;

- si può ragionevolmente ritenere che l'accadere di uno degli eventi elencati comporti una variazione fenomenologica, ovvero introduca fenomeni fluidotermodinamici diversi durante il transitorio, e che quindi definisca per il test sperimentale una fase per la quale sia significativo ricercare una accuratezza solo nel confronto con la fase corrispondente del calcolo.

Test start
SCRAM
MSL valves operation (closure, opening)
MFW operation (closure, opening)
Pumps trip and coast down limits
Blow down in saturation condition
Pressurizer PORV actuation (start and end of cycling)
Steam generators SRV operation (as above)
ECCS (Accumulators, LPIS, HPIS) start and end of liquid delivery
Dry out occurrence (at 2/3 of the active fuel height)
PCT event (at 2/3 of the active fuel height)
Rewetting occurrence (at 2/3 of the active fuel height)
Actuation of relevant ESF (PRZ heaters, CVCS, RHR, etc.)
Test end
(ATWS events may require additional events)

Tabella 4 - Eventi per la definizione degli intervalli di confronto

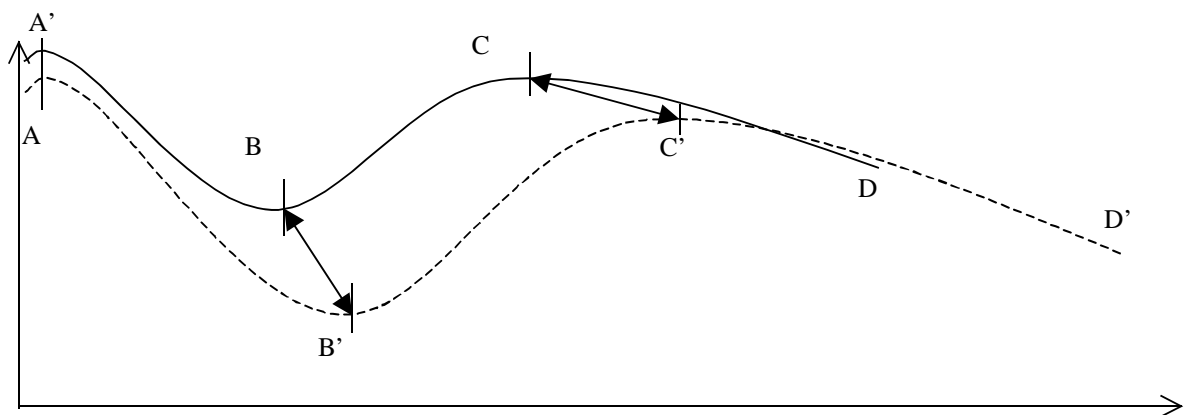


Figura 5 - Intervalli di confronto

Poiché le fasi individuate con le modalità sopra indicate costituiscono gli intervalli attraverso cui si opera il confronto tra i risultati del test sperimentale e del calcolo nel seguito saranno indicate nel seguito con il termine di **intervalli di confronto**.

In Fig. 5 è illustrato un esempio di confronto tra due ipotetiche variabili: il confronto è possibile solo tra fasi corrispondenti e cioè l'intervallo (B,C) deve essere confrontato con l'intervallo (B',C').

Confronto quantitativo e temporale : ottenimento accuratezza

L'input della procedura AFE è costituito dai dati relativi alle sei grandezze utilizzate per l'identificazione degli ipercubi (pressione circuito primario, massa refrigerante del circuito primario, pressione del circuito secondario, temperatura di camicia a 2/3 della altezza del core, potenza sviluppata dal core, livello del refrigerante nel down-comer del generatore di vapore); dai

dati relativi alle grandezza per le quali si vuole calcolare l'accuratezza (in questo studio la pressione del circuito primario, la massa di refrigerante del circuito primario e la temperatura di camicia a 2/3 di altezza del core); gli istanti temporali relativi agli eventi selezionati per determinare gli intervalli di confronto. Queste informazioni devono essere fornite sia per i risultati del calcolo che per il test sperimentale. In altre sono fornite informazioni accessorie che non sono direttamente impiegate in questa specifica procedura, ma che servono nelle successive elaborazioni: il fattore di scala del simulatore su cui è stato condotto il test sperimentale; una sigla alfanumerica di 4 lettere che identifica il test; il peso relativo alla affidabilità del dato sperimentale per ogni grandezza sperimentale per la quale si intende calcolare l'accuratezza.

La procedura AFE sulla base dei valori forniti per l'identificazione degli intervalli di confronto provvede ad un confronto tra dati sperimentali e calcolati in modo da ottenere l'accuratezza temporale e quantitativa.

Per l'ottenimento della accuratezza quantitativa, si individuano negli intervalli di confronto calcolato e sperimentale corrispondenti una serie di istanti temporali che hanno le seguenti caratteristiche:

- il passo degli istanti individuati in un intervallo di confronto relativo al calcolo è funzione del tempo secondo la Tab. 1;
- il numero di istanti individuati nei due intervalli di confronto sperimentale e calcolato è lo stesso.

L'accuratezza quantitativa viene calcolata attraverso un confronto tra i valori che la variabile calcolata e quella sperimentale assumono negli istanti temporali corrispondenti; (Fig. 6).

Gli intervalli di confronto relativi al calcolo sono suddivisi come detto con passo determinato; gli intervalli di confronto sperimentali sono suddivisi in un numero di istanti temporali uguale a quello degli intervalli di confronto calcolati, in modo da poterli confrontare con i corrispondenti calcolati, ma poiché gli intervalli temporali calcolati e sperimentali hanno una ampiezza diversa, il passo tra gli istanti temporali degli intervalli sperimentali risulta solo proporzionale a quello dei corrispondenti calcolati.

L'uso degli istanti temporali all'interno dell'intervallo di confronto ha solo valore operativo ed è stato introdotto per poter confrontare intervalli di confronto di diversa ampiezza. Viceversa un confronto attraverso gli istanti temporali determinati nel modo sopra citato ha significato solo se condotto all'interno di intervalli di confronto sperimentali e calcolati corrispondenti.

Si ottiene in sostanza una sequenza di valori di errori quantitativi associati gli istanti temporali del calcolo una per ogni intervallo di confronto attraverso la formula

$$A = \left| \frac{Y_e - Y_c}{Y_c} \right| \cdot 100$$

che esprime la accuratezza come percentuale della grandezza calcolata, ed in cui Y_e , Y_c e $Y_e - Y_c$ sono rispettivamente, il valore della grandezza sperimentale, il valore della grandezza calcolata e l'errore misurato.

Ad ogni valore di accuratezza così determinato si associa la sestupla costituita dai valori assunti dalle sei variabili identificatrici degli ipercubi, per cui è possibili inserire i valori di accuratezza quantitativa nelle locazioni di una matrice rappresentante la globalità degli ipercubi.

Gli ipercubi che raccolgono i valori di accuratezza sono quelli identificati facendo uso delle variabili calcolate e non di quelle sperimentali, poiché l'uso previsto per l'utilizzatore finale della procedura CIAU è quello di applicare le bande di incertezza ai risultati di un calcolo (presumibilmente un calcolo di impianto).

Tale matrice non è la matrice QAM, ovvero il prodotto in uscita della procedura AFE, poiché i dati grezzi di accuratezza registrati all'interno di ogni ipercubo, devono essere processati per estrarne i parametri che ne descrivono la distribuzione.

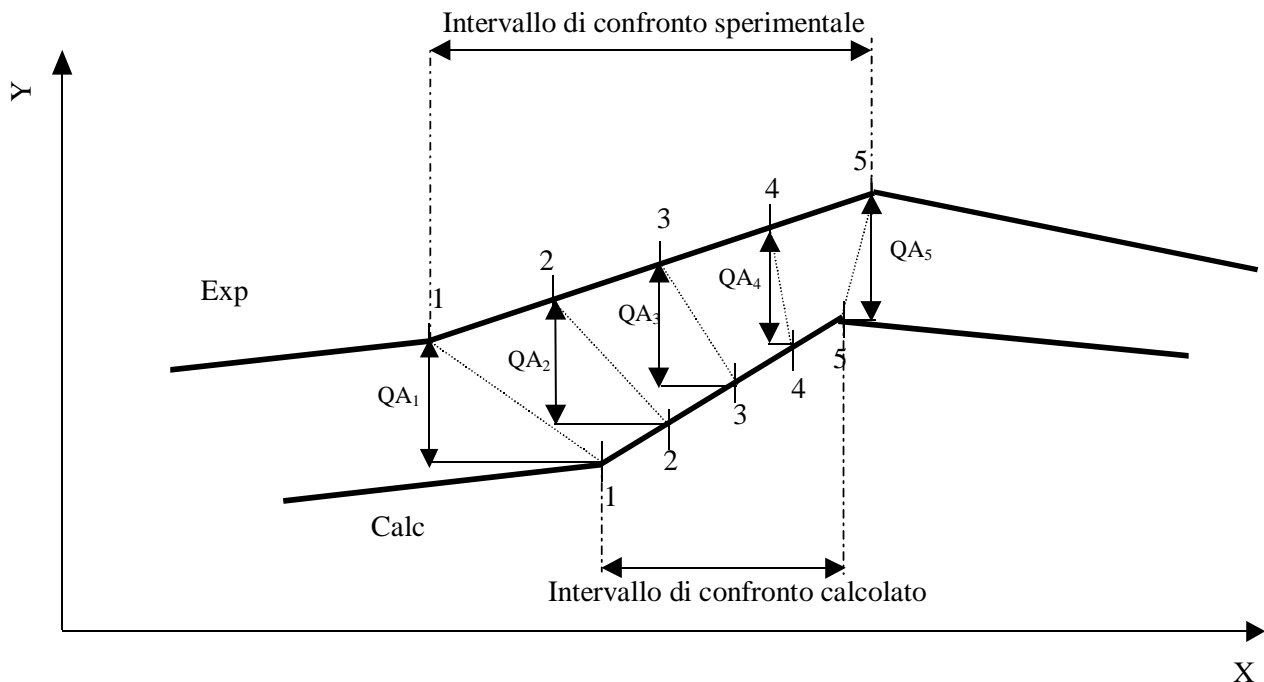


Figura 6 - Ottenimento dell'errore quantitativo Q_A

L'accuratezza temporale è ottenuta attraverso un confronto degli estremi corrispondenti degli intervalli di confronto sperimentali e calcolati (Fig. 7) e mediante le seguenti ipotesi:

- l'errore temporale non può mai diminuire; se questo dovesse risultare si assume che l'errore temporale resti costante ed uguale al valore precedente;
- l'accuratezza temporale si assume vari linearmente tra gli estremi di un intervallo di confronto.

La prima ipotesi è stata formulata per evitare che risultati apparentemente buoni, siano solo la conseguenza di compensazioni di errori; nell'esempio di Fig. 7, nell'intervallo di confronto evidenziato, l'errore di tempo per tutti gli istanti temporali è uguale a TA_1 , poiché TA_5 risulta minore di TA_1 .

La seconda ipotesi è essenzialmente una ipotesi semplificativa, avendo ritenuto sufficiente una stima della accuratezza di tempo per tutto l'intervallo dagli estremi dell'intervallo di confronto.

Dall'errore di tempo si passa al valore della accuratezza temporale attraverso la formula

$$A = \left| \frac{T_e - T_c}{T_c} \right| \cdot 100$$

che esprime la accuratezza come percentuale del valore calcolato, ed in cui T_e , T_c e $T_e - T_c$ sono rispettivamente il valore temporale relativo al test sperimentale, il valore temporale relativo al calcolo e l'errore rilevato.

Come detto non si valuta l'errore di tempo negli istanti temporali interni dell'intervallo di confronto, ai quali viene associato un errore derivante distribuendo linearmente la variazione dell'errore tra gli estremi dell'intervallo di confronto.

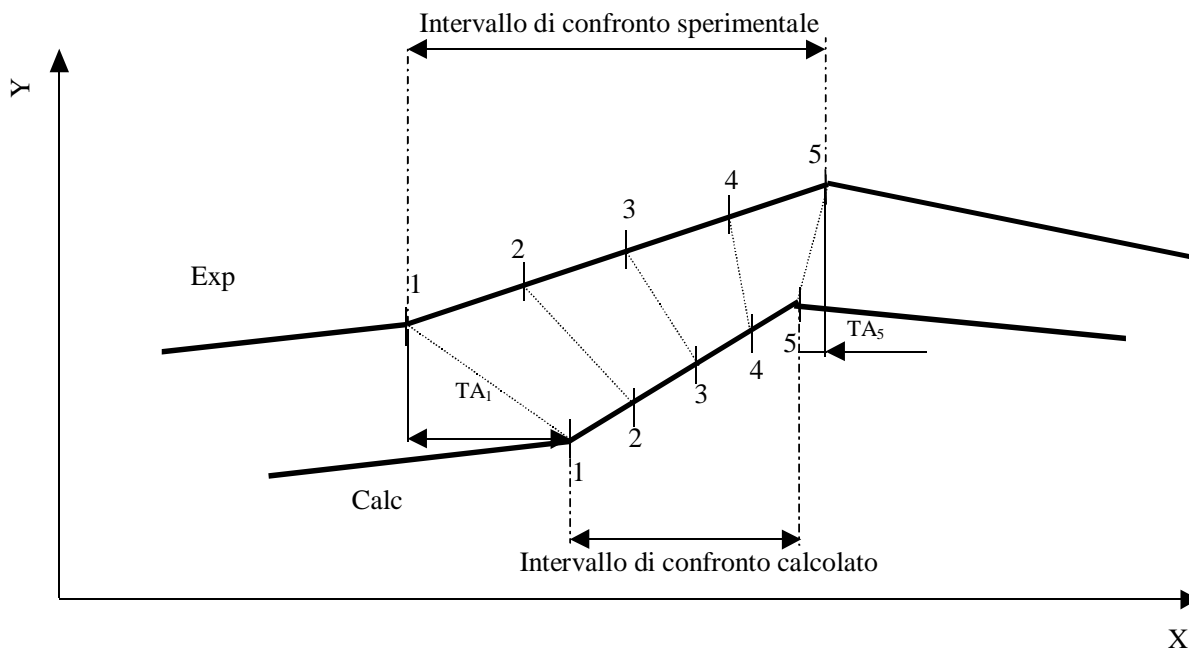


Figura 7 - Ottenimento dell'errore temporale T_A

Si ottiene alla fine del processo una accuratezza temporale in funzione del tempo. L'asse temporale è suddiviso in una successione sequenziale di intervalli che sono rappresentati dalle locazioni di un vettore. In corrispondenza del valore di riferimento di ogni intervallo temporale (che è stato scelto essere l'estremo inferiore), ricavato il valore della accuratezza, lo si registra nella corrispondente locazione del vettore; si ottiene così il TAV (Time Accuracy Vector) relativo al test analizzato.

Si fa riferimento ai valori temporali del calcolo per definire gli intervalli che accolgono i valori di accuratezza per la stessa ragione detta a proposito degli ipercubi.

Nel vettore TAV e nella matrice QAM compaiono come detto anche la sigla identificatrice del test da cui i dati derivano ed il fattore di scala della facility su cui il test sperimentale è stato condotto; inoltre compaiono i valori dei pesi relativi ai dati sperimentali. In realtà i pesi dei dati sperimentali svolgono una doppia funzione; normalmente i valori dei pesi in questione variano da un valore superiore a zero fino al valore uno; se lo sviluppatore introduce un valore negativo, inibisce la procedura AFE a calcolare la accuratezza per quel dato. Tale possibilità è stata introdotta per poter escludere dati non sufficientemente affidabili o non disponibili dalla procedura di calcolo della accuratezza. Per la temperatura di camicia a 2/3 della altezza del core invece poiché i valori dei pesi sono inseriti per ogni intervallo di confronto, è introdotto un indice ulteriore il cui valore può essere positivo nel qual caso i dati della temperatura di camicia vengono processati per ottenerne l'accuratezza, o negativo il che significa che non si vuole utilizzare i dati di temperatura del test analizzato per ottenerne dei valori di accuratezza.

Peso delle variabili sperimentali

Nella fase di preparazione dei dati relativi ai singoli test per ottenere i valori di accuratezza viene definito il peso delle variabili sperimentali. Tali pesi sono introdotti poiché la misura delle grandezze sperimentali è generalmente affetta da un grado di incertezza che viene tenuto in considerazione nel processo di estrapolazione. Tale incertezza deriva da:

- incertezza intrinseca dello strumento di misura;

- incertezza derivante dalle modalità di misura;
- rappresentatività del dato sperimentale misurato;
- affidabilità del data-base sperimentale.

L'incertezza derivante dalle fonti sopra indicate determina un peso del dato sperimentale che assume un valore compreso tra zero ed uno: tanto più il dato è affidabile tanto più il peso relativo è elevato.

Il peso viene calcolato sulla base delle seguenti considerazioni

- pressione dell'Upper Plenum: generalmente i valori di pressione sono determinati con buona accuratezza per cui al fine di valutare il peso da associare alla misura della pressione si tiene in conto solo l'aspetto relativo alla rappresentatività del dato misurato; in particolare si ritiene qualificato un dato di pressione per il quale sia possibile un riscontro attraverso rilevazioni in zone vicine a quella della misura effettuata.
- massa del refrigerante primario: il peso considerato per il valore della massa del circuito primario risulta inversamente proporzionale alla accuratezza della misura sperimentale se fornita; se tale valore non è disponibile e/o la misura della massa residua è calcolata indirettamente mediante un bilancio tra massa entrante ed uscente si assume un valore del peso di 0.7.
- temperatura di camicia: si distinguono varie situazioni che contemplano la possibilità di trovarsi a bassi od elevati livelli di potenza, se sia presente o meno e con quale estensione una condizione di DNB e si considera il valore delle temperature misurate che possono essere distorte da una non perfetta linearità circa la risposta delle termocoppie.

I valori dei pesi utilizzati per le tre variabili alle quali è applicato il processo di estrapolazione sono riassunti nella Tab. 5

Pressione circuito primario	Dato qualificato		Dato non qualificato	
	1.0		0.7	
Massa Refrigerante circuito primario	Dato accuratezza nota		Massa derivata o accuratezza non nota	
	Valore fornito		0.7	
Temperatura superficiale barretta core		DNB si		DNB no
		Locale	Esteso	
	$T_{\max} < 1000 \text{ K}$	0.2	1.0	1.0
	$T_{\max} > 1000 \text{ K}$	0.4	1.0	-

Tabella 5 - Pesi dati sperimentali

Mentre i pesi dei dati sperimentali relativi alla pressione del circuito primario e alla massa del refrigerante del circuito primario hanno carattere globale e quindi il valore del peso è relativo a tutta la durata del transitorio, il peso relativo alla temperatura è diverso nelle diverse condizioni termodinamiche cui la barretta di combustibile è sottoposta; per questa ragione per la temperatura è richiesto di inserire un valore del peso dei dati sperimentali distinto per ogni intervallo di confronto.

Raggruppamento dei dati di accuratezza

Una volta che i dati di accuratezza sono stati ottenuti la procedura AFE provvede a raggruppare i dati presenti all'interno del singolo ipercubo.

Essenzialmente i dati presenti in ogni ipercubo vengono trattati statisticamente ricavandone il valore medio ed il valore della deviazione standard nell'ipotesi che la distribuzione della variabile accuratezza sia approssimabile con una distribuzione normale; entrambe sono espresse come

percentuali. I valori così calcolati sostituiscono i dati di accuratezza presenti in un ipercubo. All'interno di un ipercubo si trovano quindi il codice identificativo dell'ipercubo, il numero di valori di accuratezza quantitativa che erano contenuti in quel ipercubo, il valore medio e la deviazione standard dell'insieme dei valori di accuratezza quantitativa per le variabili selezionate (pressione del circuito primario, la massa di refrigerante del circuito primario e la temperatura di camicia a 2/3 di altezza del core), i pesi relativi ai dati sperimentali, il codice identificativo del test ed il fattore di scala del simulatore su cui è stato condotto il test sperimentale. Il prodotto di tale processo è una matrice di accuratezza quantitativa, relativa ad un test. Eventuali valori negativi della media e della deviazione standard per la accuratezza contraddistinguono ipercubi per i quali non si hanno valori di accuratezza, mentre se il peso relativo ai valori di una variabile risulta negativo significa che la corrispondente variabile non verrà, per il test considerato, utilizzata nel processo di estrapolazione.

L'accuratezza temporale presente all'interno delle locazioni del vettore di accuratezza temporale non subisce un processo di raggruppamento, in quanto per ogni locazione del vettore un singolo test produce un solo valore di accuratezza temporale. In ogni locazione si trova il valore di accuratezza temporale, un codice alfanumerico che identifica il test ed il fattore di scala relativo al simulatore su cui è stato condotto il test. Non esiste un identificativo per gli intervalli temporali rappresentati dalle locazioni del vettore poiché essi costituiscono una sequenza lineare e quindi sono univocamente identificati dalla posizione che occupano nella sequenza delle locazioni del vettore TAV. Infine in ogni locazione è riportato un valore peso, che vale generalmente 1, ma che può avere valori negativi qualora non si vogliano utilizzare i dati di accuratezza temporale ottenuti da un particolare test. Valori negativi di accuratezza temporale si trovano all'interno di quelle locazioni che non contengono dati di accuratezza.

L'applicazione della procedura AFE produce per ogni test considerato una matrice di accuratezza quantitativa, ed un vettore di accuratezza temporale.

Tutte le matrici ed i vettori sono successivamente raccolti rispettivamente in una unica matrice di accuratezza quantitativa ed in un unico vettore di accuratezza temporale; una generica locazione della matrice ottenuta, contiene il valore di accuratezza quantitativa (media e deviazione standard) e gli altri dati relativi al test la cui evoluzione è avvenuta per quel particolare ipercubo; analogamente una generica locazione del vettore ottenuto contiene il valore della accuratezza temporale e tutti gli altri dati relativi al test la cui durata sia maggiore o uguale a quella dell'istante temporale rappresentato dalla locazione del vettore. In ogni caso i dati dei singoli test risultano ancora separati tra loro e quindi identificabili.

La matrice ed il vettore ottenuti sono ancora denominate QAM e TAV, ma sono ora relative all'insieme dei test utilizzati per lo sviluppo della procedura CIAU, e costituiscono l'input della procedura DAST che fornisce i valori di incertezza.

3.3.2 DAST

La procedura DAST estrapola il valore della incertezza dai valori della accuratezza. Questa procedura opera all'interno di ogni ipercubo di QAM e di ogni intervallo temporale di TAV contenente valori di accuratezza..

Una panoramica delle operazioni svolte dalla procedura DAST è data nella Tab. 6.

La procedura DAST opera senza alcun ausilio dello sviluppatore: legge in input la matrice QAM ed il vettore TAV, fornendo in uscita la matrice QUM ed il vettore TUV. DAST costituisce

l'unità principale ed è la fase conclusiva del processo di sviluppo della CIAU. Le modalità di estrapolazione della metodologia di incertezza UMAE sono applicate operativamente in questa fase.

Nel seguito saranno illustrati gli aspetti peculiari della procedura e la logica con cui opera il processo di estrapolazione.

Distorsioni di scala

I dati di accuratezza sono generalmente ottenuti da test condotti su simulatori in scala di un impianto di potenza. Tali dati sono affetti da distorsioni di scala.

Si è ritenuto che i dati derivanti da simulatori che hanno un fattore di scala ($1/K_v$) maggiore ovvero che siano più vicini alla dimensioni dell'impianto di riferimento forniscano dati che meno risentano delle distorsioni di scala. Per tenere conto di quanto detto è stato associato ai dati di accuratezza derivanti dai singoli test un peso, correlato con il fattore di scala del simulatore su cui il test è stato condotto.

Tra le principali cause di distorsioni di scala sono stati considerati i seguenti fattori:

1. $\frac{\text{Superficie di scambio termico delle strutture non attive}}{\text{Potenza core}}$
2. $\frac{\text{Superficie di scambio termico delle strutture attive del core}}{\text{Potenza core}}$
3. $\frac{\text{Superficie di scambio termico delle strutture attive dei tubi ad U}}{\text{Potenza core}}$

Dalla somma dei tre rapporti sopra indicati si ottiene un valore indice Q (Tab.7). In modo analogo è stato calcolato un valore di riferimento Q_r calcolato come la media dell'indice Q ottenuto dal impianto di potenza di Krsko e dai dati di progetto EPR.

Il rapporto tra Q_r e l'indice Q calcolato per il simulatore, fornisce il peso da associare ad un dato di accuratezza in relazione al fattore di scala del simulatore su cui un test sia stato condotto (Tab. 8).

I pesi calcolati indicano una relazione lineare tra i valori dei pesi ed il fattore di scala $1/K_v$. Infatti come si vede in Fig. 8, il diagramma che si ottiene graficando i pesi ottenuti in relazione ai fattori di scala è ben approssimabile con un andamento lineare. In questo modo è possibile valutare il peso relativo alle distorsioni di scala per simulatori il cui fattore di scala sia compreso tra $1/48$ e $1/800$ circa.

Il peso dovuto alle distorsioni di scala in funzione del fattore di scala si ottiene mediante la seguente relazione:

$$P_i = -5 \cdot 10^{-4} K_v + 0.7123$$

Per test condotti su simulatori in scala reale o per transitori condotti su impianti di potenza, ovvero quando il termine $1/K_v$ è 1 il valore del peso relativo alle distorsioni di scala è posto uguale ad 1.

Peso complessivo del dato di accuratezza

Il dato di accuratezza calcolato nella procedura AFE non è direttamente utilizzato nel processo di estrapolazione della procedura DAST, ma per esso sono calcolati dei pesi che determinano l'importanza relativa, del generico dato di accuratezza rispetto agli altri dati che si trovano nello stesso ipercubo. Vale la pena di sottolineare che l'utilizzo dei pesi costituisce un metodo per dare diverso rilievo ai dati di accuratezza più significativi relativamente al processo di estrapolazione.

	Quantitative Accuracy	Time Accuracy
Average accuracy	$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i A_i }{N}$	where: A _i : Individual accuracy (from AFE) N: number of data in the hypercube
Standard deviation of A _i	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [P_i A_i N - \bar{A}]^2}{N-1}}$	
Weight derived from intrinsic dispersion	$P_{D\ i} = \frac{1}{D_i}$	where: D _i : Intrinsic dispersion band
Weight derived from geometrical distortion	$P_{K\ i} = -5 \cdot 10^{-4} K_{V\ i} + 0.7123$ or $P_{K\ i} = 1$	where: K _{V_i} : Facility volumetric scale factor
Weight derived from accuracy dispersion	$P_{S\ i} = -0.9 \cdot \frac{S_i}{100} + 1$ for $0 \leq S_i/A_i \leq 1$ $P_{S\ i} = 0.1 \text{ for } S_i/A_i \geq 1$ where: S _i : Accuracy standard deviation (from AFE)	Not for Time Accuracy Extrapolation
Final weight of each datum (A _i)	$P_i = N \frac{P_{D\ i} \cdot P_{K\ i} \cdot P_{S\ i}}{\sum_{i=1}^N P_{D\ i} \cdot P_{K\ i} \cdot P_{S\ i}}$	$P_i = N \frac{P_{D\ i} \cdot P_{K\ i}}{\sum_{i=1}^N P_{D\ i} \cdot P_{K\ i}}$
Systematic error associated with facility scaling	$E = \left 0.3 - \frac{0.3}{\sqrt{K_v}} \right $	
Average K _v	$\bar{K}_v = \frac{\sum_{i=1}^N P_{K\ i} \cdot K_{V\ i}}{\sum_{i=1}^N P_{K\ i}}$	
Additional systematic error associated with S _i	$E_s = \sum_{i=1}^N P_i \cdot 2S_i$ where: S _i : Accuracy standard deviation (from AFE)	Not for Time Accuracy Extrapolation
E _σ	$E_\sigma = 2\sigma$	
Not Dimensional Uncertainty U _{ND}	$U_{ND} = A(1+E_v) + E_s + E_\sigma$	$U_{ND} = A(1+E_v) + E_\sigma$
Dimensional Uncertainty U _D	$U_D = (A(1+E_v) + E_s + E_\sigma)R$ R : calculated reference value	$U_D = (A(1+E_v) + E_\sigma)R$ R : calculated reference value

Tabella 6 - Formule del processo di estrapolazione

	P0	P1	P2	P3	(P1+P2+P3)/P0
Facility or Plant	Nominal Power (Mw)	Non Active Structures Area (m ²)	Core Active Heat Transfer Surface (m ²)	U-tubes Heat Transfer Surface (m ²)	Index Q
NPP	3000	3500	5500	17250	8.75*
LSTF	71.3	272.7	110.107	447.03	11.62
BETHSY	27.74	211.76	46.7	138.48	14.3
SPES	6.49	71.41	10.595	35.42	18.17
LOBI	5.47	86.06	8.43	31.3	22.9

*Valore di riferimento Q_r

Tabella 7 - Determinazione dell'indice Q

Facility	$P_i = \frac{(Q_{EPR} + Q_{KRSKO})/2}{Q_{Facility}}$
LSTF	0.75
BETHSY	0.61
SPES	0.47
LOBI	0.38

Tabella 8 - Calcolo dei pesi correlati al fattore di scala

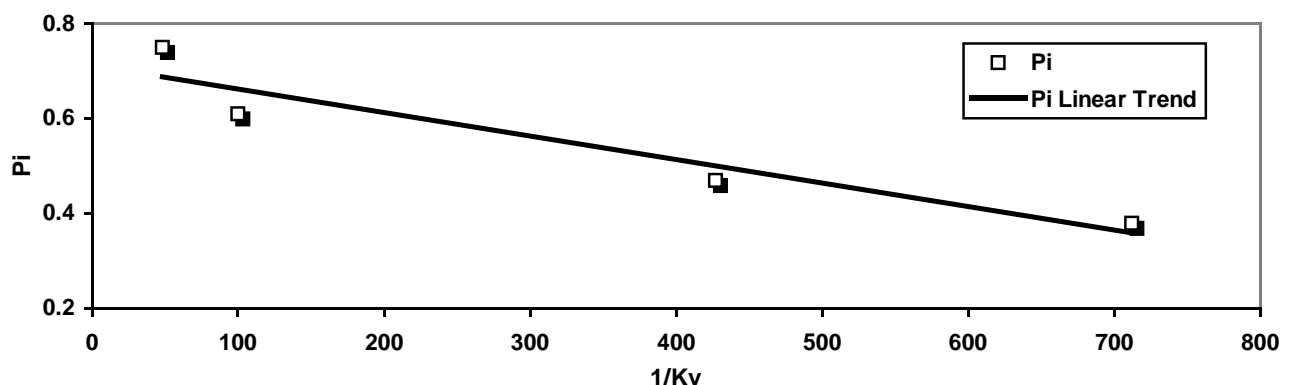


Figura 8 - Pesi in funzione del fattore di scala

I pesi considerati fanno riferimento a:

- dispersione statistica del singolo test, P_{Si}: i dati che hanno concorso a determinare il valore di accuratezza media per il singolo test in un generico ipercubo, che risultano meno dispersi intorno al valore medio, forniscono un valore di accuratezza migliore e ritenuto più significativo rispetto a dati con una dispersione intorno al valore medio più grande;
- dispersione dati sperimentali, P_{Di}: i dati sperimentali che presentano un grado di incertezza minore forniscono dati più affidabili di accuratezza rispetto a quelli derivanti da dati sperimentali con una incertezza maggiore;
- distorsione di scala P_{Ki}: tanto maggiore è il fattore di scala della simulatore su cui il test è stato condotto e da cui derivano i dati per la determinazione della accuratezza, tanto più significativi sono i dati di accuratezza ottenuti.

Per le modalità di determinazione della accuratezza temporale per il singolo test (vedi Par. 3.3.1), non sono definiti i valori P_{Si} per i dati di accuratezza temporale.

Dai valori dei singolo pesi si perviene al peso complessivo P_i del dato di accuratezza secondo la relazione:

$$P_i = \frac{P_{Di} + P_{Ki} + P_{Si}}{\sum_{i=1}^N P_{Di} + P_{Ki} + P_{Si}} \quad \text{per l'accuratezza quantitativa;}$$

$$P_i = \frac{P_{Di} + P_{Ki}}{\sum_{i=1}^N P_{Di} + P_{Ki}} \quad \text{per l'accuratezza temporale;}$$

dove N è il numero di valori di accuratezza che si trovano all'interno del generico ipercubo (che coincide con il numero di test che hanno fornito dati per quel ipercubo).

Ottenimento della incertezza adimensionale

Un diagramma a blocchi della procedura DAST è illustrata nella Fig. 9, alla quale si farà riferimento nel proseguo di questo paragrafo.

I blocchi (1), (2) e (3) descrivono operazioni che sono svolte dalla procedura AFE; in particolare i valori ricavati dal blocco (2) e (3) costituiscono l'input per DAST.

Bisogna ricordare che per l'accuratezza quantitativa, gli A_i sono i valori medi dei dati di accuratezza presenti in un ipercubo derivanti da un singolo test, e sono corredati dalla deviazione standard S_i della distribuzione di tali dati. Per l'accuratezza temporale, A_i è il valore di accuratezza contenuto in un intervallo temporale per il singolo test; in quest'ultimo caso quindi non si ha un valore della deviazione standard. Per l'accuratezza temporale il blocco (2) è più precisamente il seguente:

$$A_i = A_j$$

Inoltre non sono definiti i blocchi (3), (5) e (11).

Il blocco (7) calcola il peso da associare ai valori di accuratezza A_i calcolati da AFE; si avvale dei valori forniti in input di P_{Di} (da AFE) e dei valori ricavati di P_{Si} e P_{Ki} . Nel precedente paragrafo è descritto come si ottiene P_{Ki} . P_{Si} dipende invece dal valore di S_i mediante le relazioni:

$$P_{Si} = -0.9S_i/100 + 1 \quad \text{se } 0 \leq S_i/A_i \leq 1$$

$$P_{Si} = 0.1 \quad \text{se } S_i/A_i > 1$$

Utilizzando il peso P_i è calcolato il valore base della incertezza, blocco (8). Al valore calcolato di incertezza devono essere sommati altri contributi relativi ai valori di scala che mediamente sono contenuti in un ipercubo, alla dispersione nella distribuzione degli A_i e degli S_i ; tali contributi di maggiorazione derivano dalle seguenti considerazioni:

1. il valore calcolato di incertezza è sostanzialmente un valore medio; tale valore viene maggiorato sommando ad esso il doppio della deviazione standard; in questo modo si ha un risultato con una confidenza del 95% relativamente alla larghezza della banda di incertezza;

2. i singoli valori di accuratezza derivano da una distribuzione di valori; i dati di incertezza derivanti da ipercubi in cui questi presentano una distribuzione ampia intorno alla media sono considerati rendere più ampio il valore della incertezza;
3. quando i dati di accuratezza presenti in un ipercubo provengono da facility il cui fattore di scala è mediamente elevato sono considerati meno affidabili.

Ogni dato di accuratezza è corredato dal valore di scala $1/K_v$ della facility su cui è stato condotto il test da cui il valore di accuratezza è stato ottenuto; si considera un errore connesso al K_v mediante le seguenti considerazioni:

- la principale componente dell'errore connesso con il fattore di scala è quella derivante dalla dispersione termica dalle strutture e quindi tale errore può essere espresso dalla seguente relazione:

$$e = \left| \frac{\frac{S_p}{V_p} - \frac{S_F}{V_F}}{\frac{S_p}{V_p}} \right| \quad \text{che può essere scritto come:} \quad e = \left| 1 - \frac{1}{\sqrt{K_v}} \right|$$

dove S_p , S_v , V_p e V_F sono rispettivamente la superficie di scambio termico ed il volume dell'impianto reale e del simulatore.

- l'errore deve divenire nullo se K_v è uguale a 1
- un fattore di scala di $1/10000$ corrispondente grosso modo ad una struttura del core di 2×2 fornisce il limite per l'accettabilità del simulatore (diametro del down-comer e del loop troppo piccoli); per esso si considera un errore derivante da distorsioni di scala del 30%.

Alla luce di quanto detto si è ottenuto:

$$E_K = \left| 0.3 - \frac{0.3}{\sqrt{K_v}} \right|$$

Tale relazione è stata modificata in modo da considerare tutti i simulatori su cui sono stati condotti i test che forniscono dati che concorrono all'ottenimento di valori di accuratezza presenti in un generico ipercubo: si è considerato un valore medio pesato di K_v ; in ogni ipercubo e in ogni intervallo temporale si deriva dai singoli K_v un valore medio essenzialmente operando una media pesata in cui i pesi sono quelli inerenti al solo fattore di scala, blocchi (6), (12), (13).

Insieme al valore medio dei valori di accuratezza A , è calcolato il valore della deviazione standard nell'ipotesi che la distribuzione dei valori di accuratezza sia normale, blocco (9) e da questa la maggiorazione E_σ , blocco (10).

Una ulteriore maggiorazione, E_s , deriva dai valori delle deviazioni standard relative alle distribuzioni dei valori di accuratezza di ogni singolo test, contenuti in un ipercubo, blocco (11).

Bisogna notare che E_K deve essere intesa come frazione della incertezza ricavata nel blocco (8), mentre E_σ e E_s costituiscono delle vere e proprie maggiorazioni per l'incertezza.

Si ottiene infine il valore della incertezza adimensionale, blocco (14). Il valore di incertezza calcolato rappresenta la semiampiezza della banda di incertezza, espressa come frazione del dato di riferimento ottenuto dal calcolo. Il calcolo della ampiezza fisica della banda viene espletato dalla procedura UBEP, blocco (15).

In uscita dal programma DAST si ottengono:

- la matrice di incertezza quantitativa, QUM, contenente in ogni locazione, che rappresenta un ipercubo, i valori di incertezza da associare alle tre variabili selezionate il cui valore verrà espresso dal calcolo;
- il vettore di incertezza temporale, TUV, contenente in ogni locazione, che rappresenta un intervallo temporale, il valore di incertezza temporale da associare alle tre variabili selezionate il cui valore verrà espresso dal calcolo.

L'ottenimento di QUM e TUV termina la fase di sviluppo della procedura, che è a questo punto pronta per la fase di utilizzazione da parte dell'utente finale della CIAU.

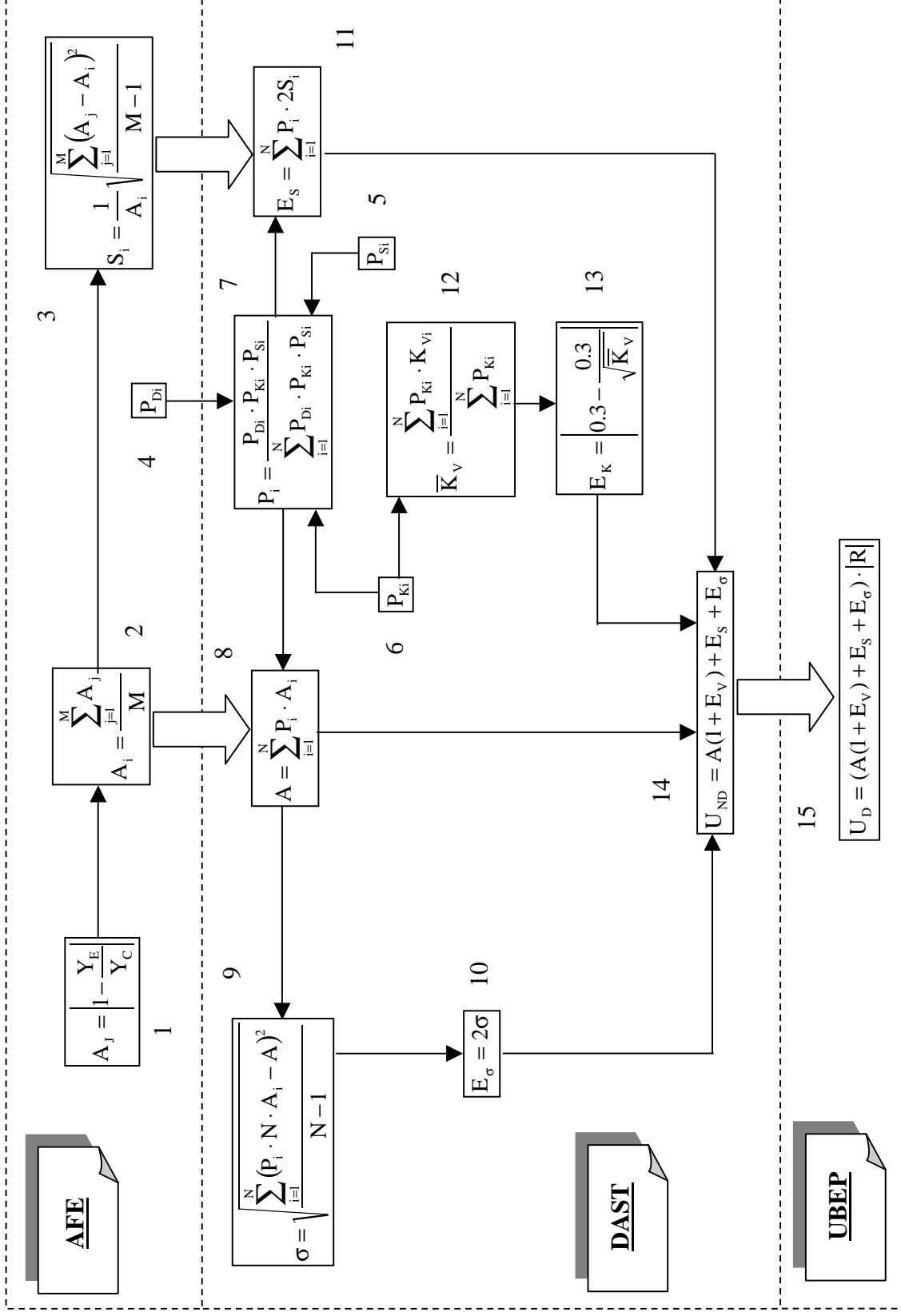


Figura 9 – Schema a blocchi della procedura AFE

3.3.3 UBEP

La procedura UBEP, l'unità della CIAU che determina l'incertezza da applicare ai risultati di un calcolo, insieme alla matrice QUM ed al vettore TUV, una volta inserite nella struttura del codice di sistema, realizzano uno strumento integrato in grado di ricavare l'incertezza insieme ai risultati del calcolo.

Struttura

La procedura UBEP legge in input i dati generati dal codice relativamente alle sei variabili che sono utilizzate per la determinazione degli ipercubi e le variabili delle quali si vuole conoscere l'incertezza. Bisogna ricordare che UBEP legge le variabili in modo automatico direttamente dalla uscita del codice e che l'operatore non può selezionare qualunque variabile per valutarne l'incertezza, ma queste saranno le stesse per le quali nella fase di sviluppo della CIAU si sono raccolti i dati di accuratezza e che nel presente studio si ricorda essere la pressione del circuito primario, la massa di refrigerante del circuito primario e la temperatura superficiale della barretta di combustibile a 2/3 di altezza del core.

Uno delle caratteristiche di UBEP è quello di poter valutare l'incertezza relativa ad una variabile senza dover aspettare il completamento del calcolo: mano a mano che i dati sono prodotti dal calcolo è subito possibile associare subito ai dati il valore di incertezza. Questo aspetto costituisce un'importante caratteristica della CIAU che permette di poter valutare la possibilità di biforcazioni durante l'evoluzione del transitorio.

Altri dati di input di UBEP sono i dati di QUM e TUV.

Si vuole fare notare che l'utilizzatore finale della CIAU, non deve in alcun modo intervenire nel processo di determinazione della incertezza, questo a tutto vantaggio della ripetibilità dei risultati di incertezza e delle risorse necessarie per l'applicazione della metodologia di incertezza.

Delle variabili prescelte espresse dal calcolo, viene valutato il valore con un passo temporale che è espresso ancora dalla Tab. 3.

Quando la procedura acquisisce dal calcolo le sei variabili per la determinazione degli ipercubi e l'istante di tempo cui il calcolo si trova, è in grado di determinare l'ipercubo e l'intervallo di tempo in cui il transitorio sta evolvendo. L'ipercubo e l'istante di tempo fanno riferimento alle corrispondenti locazioni di QUM e TUV, in cui UBEP legge i valori di incertezza.

I valori di incertezza sono espressi come percentuale del rapporto tra la ampiezza della semi banda di incertezza quantitativa e temporale ed il valore di riferimento della variabile calcolata e dell'istante attuale di evoluzione del transitorio, rispettivamente.

Detto R il valore di riferimento ovvero l'istante di tempo in cui il transitorio si trova, si ha (Fig. 9 blocco (15)):

$$\begin{aligned} U &= (A(1+E_V) + E_S + E_\sigma)R && \text{per l'incertezza quantitativa e} \\ U &= (A(1+E_V) + E_\sigma)R && \text{per l'incertezza temporale.} \end{aligned}$$

I due valori di incertezza temporale e di incertezza quantitativa individuano una 'area' di incertezza che rappresenta l'incertezza globale. In fig. 10 è illustrato come la incertezza quantitativa e temporale sono composte: l'area racchiusa nel rettangolo indicato in figura rappresenta l'incertezza totale relativa al punto indicato.

Una prima uscita prodotta del programma UBEP è costituita dalla sequenza di valori che descrivono l'evoluzione della variabile, con associati i valori di incertezza temporale e quantitativa.

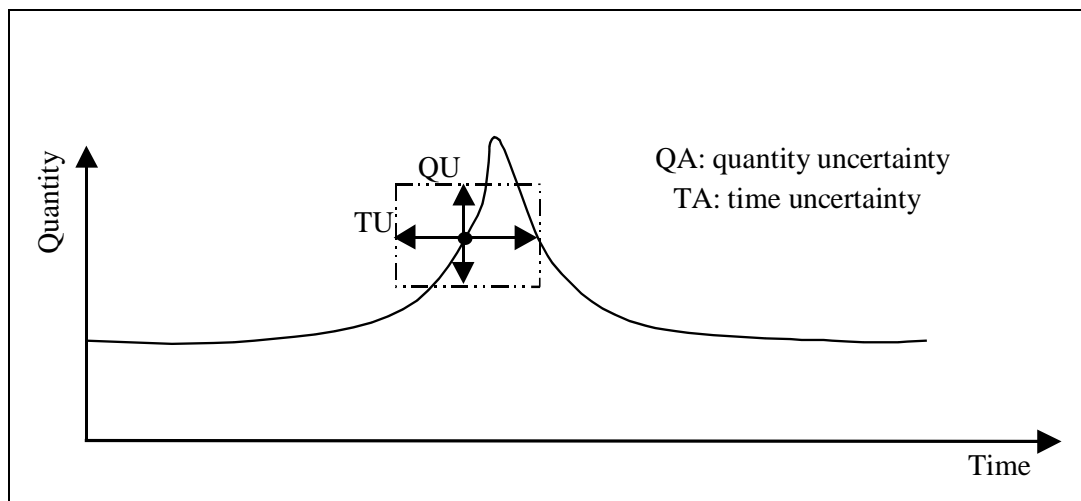


Figura 10 – Composizione della incertezza quantitativa e temporale

Per rendere visivamente la banda di incertezza che compete ad una variabile, UBEP provvede al tracciamento della variabile in funzione del tempo insieme alla banda di incertezza. In questo caso la curva limite inferiore e superiore della banda di incertezza sono ricavate come l'involuppo inferiore e superiore rispettivamente di tutte le aree di incertezza ricavate per tutti i valori della variabile (Fig. 11).

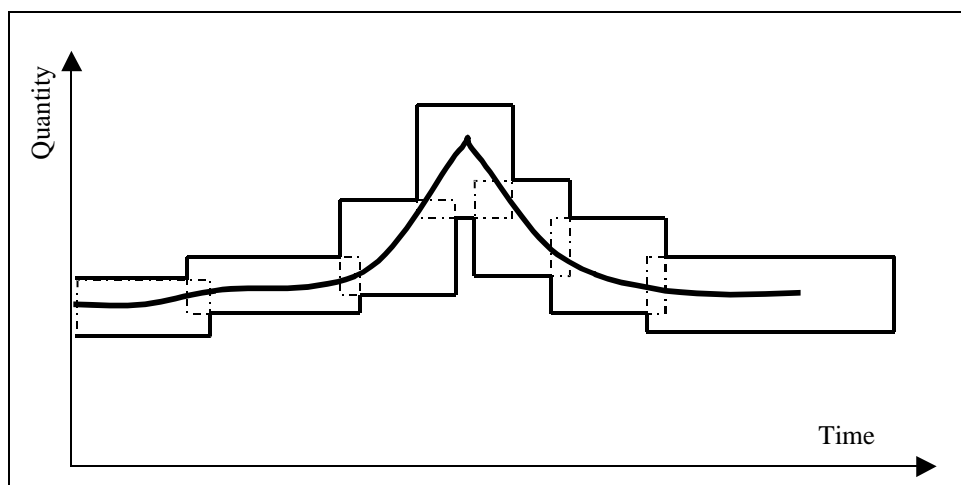


Figura 11 – Rappresentazione grafica della banda di incertezza

In generale le curve limite di incertezza di diverse variabili non sono tra loro congruenti da un punto di vista fisico, essendo il risultato di considerazioni e processi di che tengono in considerazione solo l'accuratezza/incertezza di un dato. Ciò nonostante UBEP, quando non si stia verificando un dry-out, provvede a limitare le curve limite inferiore e superiore di incertezza della temperatura superficiale della barretta di combustibile con i valori di temperatura di saturazione derivanti dai valori di pressione relativi alla curva limite inferiore e superiore di incertezza.

Si considera in corso un fenomeno di dry-out quando l'andamento della temperatura della superficie della barretta si discosta di più di 5 K del valore di saturazione relativo al valore di pressione calcolato.

4. Matrici QUM e vettori TUV realizzati

Nell'ambito della realizzazione della procedura CIAU sono stati realizzate 4 diverse tipologie di matrici QUM e vettori TUV; esse sono descritte nella Tab. 9.

o.	SET OF QUM AND TUV	OBJECTIVE	REFERENCE DATA BASE
1	CIAU goal	CIAU	UMAE qualified
2	CIAU extended	Code user effect & Widening the data base	UMAE qualified and available from the literature
3	CIAU test	Proving capabilities and flexibility of the method	Arbitrary data
4	CIAU R5/M2	Exploit the available data base & constitute a reference	Relap5/mod2 SBLOCA related

Tabella 9 - Diverse tipologie di QUM e TUV realizzate

TUV e QUM appartenenti al set n.1

Il vettore TUV e la matrice QUM costituiscono il risultato principale della procedura CIAU.

Per la loro realizzazione sono stati utilizzati test i cui dati calcolati e sperimentali soddisfano i requisiti di accettabilità per il processo di estrapolazione previsti dalla metodologia UMAE. Si ricorda che la UMAE oltre alla qualifica dei database sperimentali e calcolato, dello user e della nodalizzazione, prevede la determinazione di una soglia di accuratezza sia quantitativa, che qualitativa (vedi Tab. 1, punti I, II, III e IV) derivante dal confronto tra test sperimentale e risultati del calcolo, al disotto della quale non si possono utilizzare i dati esaminati per il processo di estrapolazione.

Per la realizzazione del set n.1 di TUV e QUM sono stati condotti una serie di calcoli con il codice RELAP5/mod3.2 e le relative analisi con i corrispondenti test sperimentali; sono stati utilizzati 19 test di cui:

- 6 SBLOCA
- 4 Loss Of Feed Water
- 3 Transitori Operazionali
- 4 LBLOCA
- 2 Blow Down
- 1 PORV Stuck Open
- 1 Refill

condotti su:

- 4 simulatori integrali (ITF)
- 1 simulatore ad effetti separati (SETF)
- 1 impianto di potenza (NPP)

La Tab. 10 mostra i transitori considerati.

La messa a punto del calcolo e la sua esecuzione, la raccolta dei dati sperimentali e l'analisi del transitorio, ha richiesto una rilevante quantità di risorse (in termini temporali e di calcolo). Ciò nonostante il numero di test considerati (19 fino ad ora) non è ancora adeguato per una applicazione definitiva della CIAU. Questo perché il numero di ipercubi in cui sono presenti dati di incertezza è ancora troppo esiguo rispetto a quello di ipercubi possibili; inoltre i dati di accuratezza utilizzati per il processo di estrapolazione presenti dentro gli ipercubi, sono in alcuni casi in numero insufficiente per una adeguata e significativa applicazione della statistica.

No	Facility/Plant	Test	Type	Secondary side significant conditions	Emergency system in primary side	End of test (s)
1	SPES	SP-SB-04 (+)	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 100% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	1637
2	SPES	SP-SB-03 (+)	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	2034
3	LOBI/MOD2	BL-44 (+)	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 100% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	2350
4	LOBI/MOD2	BL-34 (+)	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	2400
5	LOFT	L2-5 (+)	LBLOCA $A_r=200\%$ of A_{max} in CL	Trip of FW and MSL	Accumulators HPIS and LPIS in CL	107
6	LSTF	SB-CL-21 (+)	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators in CL	2113
7	WWER	KZ1 (*) (°)	OPERATIONAL TRANSIENT Loss of a primary loop flow 72% power	FW flow controlled by core power	-	240
8	WWER	KZ2 (*) (°)	OPERATIONAL TRANSIENT Loss of a primary loop flow 52% power	FW flow controlled by core power	-	310
9	WWER	KZ3 (*) (°)	OPERATIONAL TRANSIENT Partial Loss of feedwater 72% power	SG control valve stuck open	-	120
10	LSTF	SB-CL-18 (*)	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators in CL	900
11	LOBI/MOD2	BT-15/16 (*) (°)	LOFW 100% power BT-15 Pumps running BT-16 Pumps tripped	AFW activated	-	12600
12	LOBI/MOD1	A1-04 (*)	LBLOCA $A_r=200\%$ of A_{max} in CL	Early core power trip Accumulator in CL	-	2600
13	LOBI/MOD2	BT-17 (*)	LOFW	Delayed activation of AFW	Fast Upper Plenum depressurization	6124
14	SPES	SP-SW-02 (*)	LOFW	Delayed activation of AFW	No ECCS intervention	6532
15	LSTF	LSLW (*)	LOFW	Delayed activation of AFW	No ECCS intervention	11004
16	UPTF	5A	Blow Down	Constant Conditions	ECCS injection	100
17	UPTF	7-200	Refill	Constant Conditions	ECCS Injection	374
18	UPTF	6-131	Refill	Constant Conditions	ECCS injection N2 injection	112
19	WWER		PORV stuck open		HPIS injections	800

(+) full report exists

(*) summary report exists

(°) data do not fully comply with FFTBM thresholds

(°°) FFTBM thresholds could not be checked

Tabella 10 - Transitori considerati per la creazione di TUV e QUM set n. 1

Fino ad oggi la QUM e TUV del set n. 1 è stata utilizzata per applicazioni parziali.

Un esempio dei valori contenuti in un ipercubo ed in un intervallo temporale rispettivamente di QAM/QUM e TAV/TUV e mostrato nella Tab. 11.

Hypercube	Test ID No. in Tab. 10	Test ID in the computer tool	UP Pressure Accuracy (%)	Mass Inventory Accuracy (%)	Cladding Temperature Accuracy (%)	
832342	1	257SB04	4.3 0.03 1.0	6.7 0.12 1.0	4.51 0.22 1.0	AFE RESULT
	3	712BL44	11.9 1.9 1.0	13.8 3.1 1.0	1.3 0.34 1.0	
	4	712BL34	9.13 1.98 1.0	4.5 1.00 1.0	0.43 0.06 1.0	
	2	257SB03	7.1 0.57 1.0	3.8 0.43 1.0	0.95 0.11 1.0	
			UP Pressure Uncertainty (%)	Mass Inventory Uncertainty (%)	Cladding Temperature Uncertainty (%)	DAST RESULT
			10.9	13.3	7.3	
Time Interval	Test ID No. in Tab. 10	Test ID in the computer tool	Time Accuracy (%)	AFE RESULT		
670	1	257SB04	8.7 1.0			
	3	712BL44	3.9 1.0			
	4	712BL34	2.4 1.0			
	2	257SB03	9.2 1.0			
	14	257SP02	12.4 1.0			
	6	48CL21	13.1 1.0			
	10	48LSTF	1.7 1.0			
	11	7121516	8.5 1.0			
		Time Uncertainty (%)	DAST RESULT			
		20.8				

Tabella 11 - Esempio di risultati QAM/QUM e TAV/TUV

Infine nella Tab. 12 sono riportati gli ipercubi e gli intervalli temporali relativi al test SB-CL-18 in funzione del tempo.

Time (s)	Hypercube (No.)	Time Intervals (*) (No.)
From 0 to 1	843453	1
From 2 to 3	733453	from 2 to 3
From 4 to 8	733353	from 4 to 8
From 9 to 18	733352	from 9 to 18
From 19 to 41	733353	from 19 to 41
From 42 to 46	723343	from 42 to 46
From 47 to 73	623343	from 47 to 73
From 74 to 120	523343	from 74 to 109
From 120 to 128	523333	from 110 to 114
From 129 to 138	523332	from 115 to 119
From 139 to 144	513332	from 116 to 122
From 145 to 156	513433	from 117 to 128
From 157 to 160	513333	from 129 to 130
From 161 to 196	513332	from 131 to 148
From 197 to 258	513233	from 149 to 179
From 259 to 414	413233	from 179 to 257
From 415 to 496	313233	from 258 to 298
From 497 to 800	213233	from 299 to 450

Tabella 12 - Ipercubi e intervalli temporali relativi al test SB-CL-18

In App. 6 sono alcuni risultati ottenuti dalla applicazione della procedura CIAU utilizzando la matrice QUM ed il vettore TUM, set n. 1.

TUV e QUM appartenenti al set n.2

Per ottenere un ampliamento dei dati di accuratezza per l'extrapolazione si è ricorso ad una matrice QUM e un vettore TUV che sono stati realizzati con l'impiego di dati disponibili in letteratura, ma la cui qualifica non è effettuata secondo i requisiti UMAE.

I dati così ottenuti implicano che:

- la nodalizzazione può non essere qualificata;
- l'utilizzatore del codice effettua scelte che influenzano i risultati del calcolo contribuendo a peggiorare l'accuratezza del calcolo;
- i dati sperimentali possono non essere qualificati;
- nessuna condizione sancisce la accettabilità del calcolo rispetto al test sperimentale.

A fronte di questi svantaggi (che prevedibilmente porteranno a bande di incertezza più ampie rispetto a quelle derivanti dall'impiego di QUM e TUV set n.1), si dispone di un database più ampio.

TUV e QUM appartenenti al set n.3

Il set n. 3 è stato realizzato per provare la parte numerica, la flessibilità e le capacità della procedura CIAU. A tale scopo negli ipercubi di QUM e negli intervalli temporali di TUV sono stati inseriti dei valori arbitrari di incertezza ed una serie di calcoli sono stati condotti relativamente ad un impianto di potenza PWR a due loop, Westinghouse.

I risultati ottenuti non hanno alcun significato dal punto di vista della determinazione delle bande di incertezza.

La Tab. 13 mostra i test utilizzati per testare la procedura CIAU.

In App. 7 alcuni risultati ottenuti con l'uso di QUM e TUV set n. 3.

Test Number	Type	Secondary side significant conditions	Emergency system in primary side	Transient duration (s)
1	LB-LOCA $A_r=200\%$ of A_{max} in CL	SG isolation No AFW	No HPIS	300
2	IB-LOCA $A_r=50\%$ of A_{max} in CL	SG isolation AFW active	No HPIS	500
3	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL	SG isolation No AFW	No HPIS Delayed LPIS	2000
4	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL	SG isolation AFW active	Accumulators, LPIS and HPIS active	2000
5	LOFW MCP Trip	Steam relief valves active	PORV and HPIS active	2000
6	LOFW MCP running	Steam relief valves active	PORV and HPIS active	2000
7	LOFW With Accident Management Procedure	Delayed activation of AFW	No ECCS intervention	7000
8	MSLB	AFW active	PORV and HPIS active	2000
9	MCP Trip Only one pump running	AFW active Steam relief valves active	PORV and HPIS active	1000
10	PORV Stuck Open TMI type	AFW delayed Steam relief valves active	HPIS inhibited	1000
11	SGTR 3 tubes rupture	Steam relief valves active	No HPIS	2000

Tabella 13 - Calcoli effettuati per testare la procedura CIAU

TUV e QUM appartenenti al set n.4

La matrice QUM ed il vettore TUV set n. 4 sono stati realizzati considerando l'ampia esperienza ottenuta dalla applicazione del RELAP5/mod2 relativamente a transitori SBLOCA. In questo caso i dati di incertezza già calcolati dalla metodologia UMAE e disponibili sono stati inseriti in QUM e TUV. Benché i valori di incertezza derivino da un processo di estrapolazione, solo la parte applicativa (cioè la procedura UBEP) è stata impiegata. I dati di incertezza benché derivanti dal RELAP5/mod2 sono stati applicati ai risultati di calcoli condotti con la versione mod3.2 del codice. Inoltre il campo di applicabilità è stato ristretto ai soli casi di SBLOCA in PWR.

In questo caso l'uso dei dati di incertezza ottenuti è prevalentemente quello del confronto con i dati ottenuti dal set n. 1.

Nella Tab. 14 i test utilizzati per la realizzazione di QUM e TUV set. 4.

No.	Facility/Plant	Test	Type	Secondary side significant conditions	Emergency system in primary side	End of test (s)
1	SPES	SP-SB-04 CTHP	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 100% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	1637
2	SPES	SP-SB-03 CTLP	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	2034
3	LOBI/MOD2	BL-44 CTHP	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 100% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	2350
4	LOBI/MOD2	BL-34 CTLP	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	2400
5	LOBI/MOD2	BL-06	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL	Trip of FW and MSL	No HPIS, delayed LPIS	7000
6	LSTF	SB-CL-21 CTLP	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators in CL	2250
7	LSTF	SB-CL-18 ISP 26	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators in CL	900
8	LOBI/MOD2	A2-81 ISP 18	SBLOCA $A_r=1\%$ of A_{max} in CL	AFW activated	Full ECCS	4840
9	LOBI/MOD2	A1-82	SBLOCA $A_r=1\%$ of A_{max} in CL	AFW activated	HPIS in HL	4950
10	BETHSY	6.2 TC CTLP	SBLOCA $A_r=6\%$ of A_{max} in CL 10% power	No AFW Steam relief valves active	Accumulators and LPIS in CL	2180
11	BETHSY	9.1.b ISP 27	SBLOCA $A_r=1\%$ of A_{max} in CL	SG depressurization	No HPIS	8000

Tabella 14 - Test utilizzati per la realizzazione di QUM e TUV set n. 4

5. Conclusioni

Il lavoro svolto fino ad ora mostra la fattibilità della integrazione tra codice di calcolo e metodologia di incertezza; è stata realizzata una procedura, CIAU, nei suoi elementi essenziali. Si è mostrato come, una volta conclusa la fase di sviluppo e di raccolta dei dati, si ottenga uno strumento di uso semplice e che non richiede notevoli risorse (temporali, umane e di calcolo) per il suo impiego.

Tuttavia restano da indagare alcuni aspetti:

- verificare che i dati di accuratezza presenti in ogni ipercubo siano statisticamente omogenei; se questo non si verificasse si dovrà provvedere a separare le matrici QUM e TUV sulla base delle diverse tipologie di transitori da cui i dati derivano; una conferma di ciò può essere data solo disponendo di una ampia base di dati di accuratezza;
- la qualifica della procedura dovrà essere effettuata indipendentemente dai dati già utilizzati per l'ottenimento della incertezza;
- introduzione di controlli circa la consistenza tra le bande di incertezza delle diverse variabili;

Resta quindi la necessità di allargare la base di dati sperimentali e calcolati, fino qui creata, obiettivo che non rientra negli scopi della presente tesi di dottorato. Ciò nonostante sono stati prodotti alcuni risultati, che mostrano quali potranno essere gli sviluppi futuri della procedura, come la capacità di tenere conto delle eventuali biforcazioni in modo da poter eseguire calcoli multipli, ognuno caratterizzato da proprie bande di incertezza, contemporaneamente al calcolo principale.

Bibliografia

/1/ US NRC and OECD/CSNI, "Proceedings of the OECD/CSNI Workshop on Transient Thermalhydraulic and Neutronic Codes Requirements" – held in Annapolis (Md, USA) on Nov- 5-8, 1996, US NRC NUREG/CP-0159 and OECD/CSNI Report NEA/CSNI R (97) 4, Washington (DC, USA), July 1997

/2/ OECD/CSNI, "Conference Proceedings", OECD/CSNI Seminar on Best Estimate Methods in Thermal Hydraulic Safety Analyses, Ankara (Tr) June 29- July 1, 1998 – to be issued

/3/ F. D'Auria, E. Chojnacki, H. Glaeser, C. Lage, T. Wickett, "Overview of Uncertainty issues and Methodologies", Invited paper at OECD/CSNI Seminar on Best Estimate Methods in Thermal Hydraulic Safety Analyses, Ankara (Tr) June 29- July 1, 1998

/4/ T. Wickett (Editor), F. D'Auria, H. Glaeser, E. Chojnacki, C. Lage (Lead Authors), D. Sweet, A.Neil, G.M. Galassi, S. Belsito, M. Ingegneri, P. Gatta, T. Skorek, E. Hofer, M. Kloos, M. Ounsy, J.I. Sanchez, "Report of the Uncertainty Method Study for advanced best estimate thermalhydraulic code applications" – Vols. I and II, OECD/CSNI Report NEA/CSNI R (97) 35, Paris (F), June 1998

/5/ K.E. Carlson, R.A. Riemke, S.Z. Rouhani, R.W. Shumway, W.L. Weaver, and Editors: C. M. Allison, C.S. Miller, N.L. Wade, "Relap5/mod3 Code Manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods", US NRC NUREG/CR-5535, Washington (DC, USA) June 1990 (see also Vols. II to V)

/6/ F. D'Auria, N. Debrecin, G.M. Galassi, "Outline of the Uncertainty Methodology based on Accuracy Extrapolation", J. Nuclear Technology, Vol. 109 No. 1, 1995, pages 21-38

/7/ R. Bovalini, F. D'Auria, G.M. Galassi, "Scaling of Complex Phenomena in System Thermalhydraulics", J. Nuclear Science and Engineering, Vol 115, Oct. 1993, pages 89-111

/8/ Ransom V.H. et alii, "Relap5/Mod3 Code Manual : User Guide and Input Requirements", NUREG/CR-4312 EGG 2396, Idaho (US), Mar. 1987

APPENDICE 1

Metodologia UMAE

Un diagramma semplificato della metodologia UMAE è riportato Fig. 1.

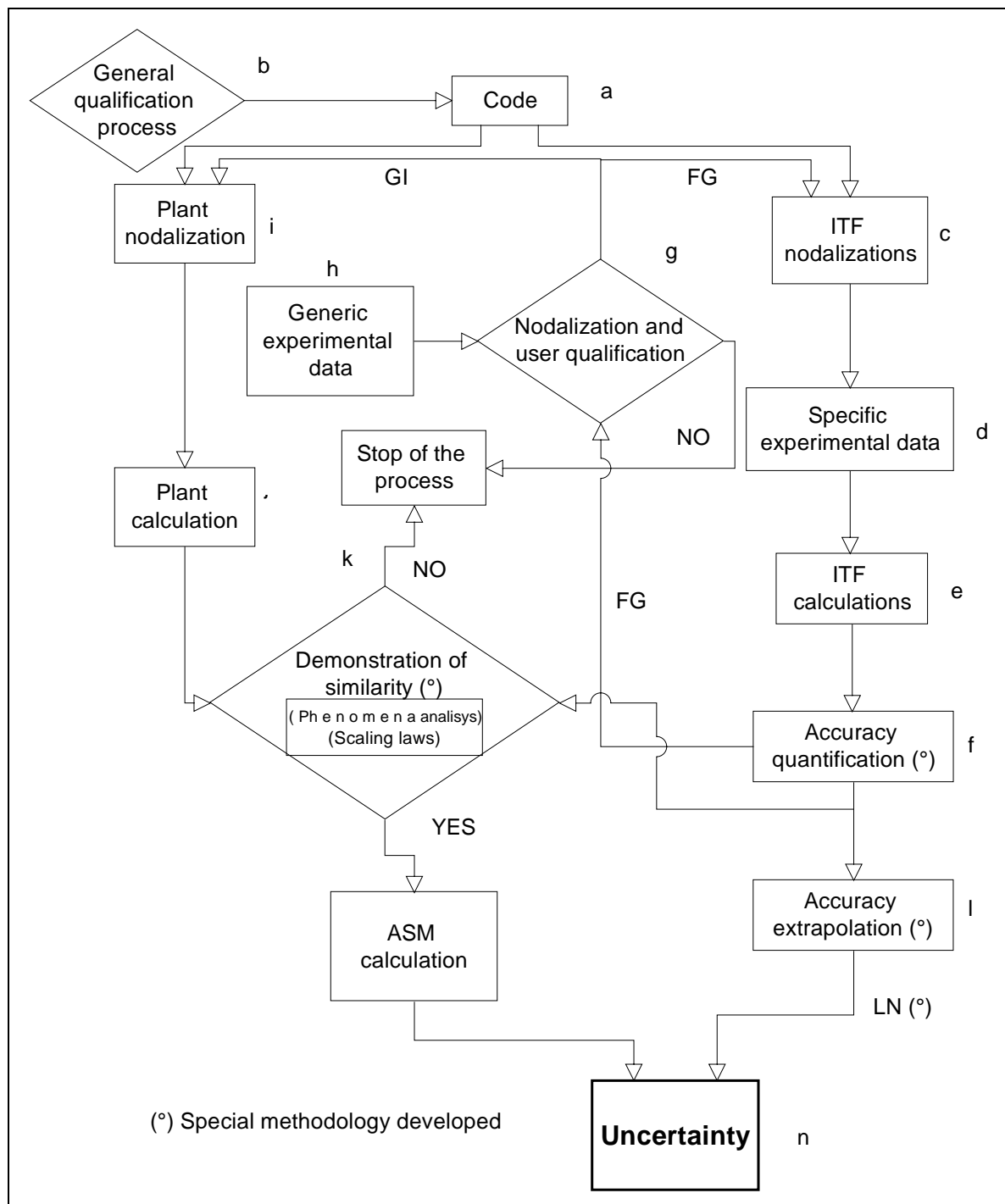


Figura 12 / App. 1 - Diagramma semplificato della metodologia di incertezza UMAE

Nel diagramma le lettere minuscole rappresentano i blocchi mentre le maiuscole le connessioni.

I passi logici e le condizioni che si devono ottenere possono essere riassunti come segue^{1/}:

1. disponibilità di una versione del codice qualificata e definitiva (blocco "a");

2. selezione di un transitorio o di uno scenario e di una tipologia di reattori nucleari (in particolare sono da considerare quelli per i quali è stata svolta una esaustiva attività di qualifica);
3. ottenimento di dati sperimentali significativi che includono informazioni sul progetto del simulatore, condizioni al contorno, condizioni iniziali oltre all'andamento di tutte le variabili rilevanti per i test selezionati;
4. il codice deve essere in grado di riprodurre i fenomeni osservati nei test considerati, ed in oltre gli utilizzatori devono essere qualificati per l'uso del codice (blocco "b");
5. i simulatori devono quanto più possibile essere realizzati in modo accurato tenendo conto delle inevitabili distorsioni di scala (per esempio le perdite termiche);
6. le condizioni dei test devono essere attentamente vagliate per fissare correttamente condizioni ai limiti ed iniziali per i diversi test (il riferimento deve essere sempre le condizioni dell'impianto);
7. la strumentazione ed il sistema di acquisizione dei dati devono essere testati e valutati specialmente nel caso si debbano ottenere misure di quantità complesse derivate da altri parametri (come per esempio la massa totale);
8. le nodalizzazioni utilizzate sia per i simulatori che per l'impianto devono essere realizzate da utilizzatori qualificati (blocchi "c" e "i");
9. dati generali e specifici del transitorio in oggetto devono essere ottenuti dai singoli simulatori; i primi non sono necessari per la estrapolazione dell'accuratezza, ma possono essere utilizzati utilmente per la indipendente qualificazione della nodalizzazione; i secondi sono relativi a tutti i fenomeni rilevanti che ci si aspetta nel transitorio in esame (blocchi "d" e "h");
10. la qualifica della nodalizzazione realizzata avviene a fronte dei dati circa il progetto del simulatore, delle condizioni al contorno ed iniziali e dell'andamento dei parametri del transitorio in esame (blocco "g");
11. qualifica della nodalizzazione per l'impianto usando gli stessi criteri usati per la nodalizzazione dei simulatori; a questo fine si possono impiegare dati derivati dallo start-up e dai transitori operazionali dell'impianto (blocco "i");
12. l'organizzazione del data base (ottenuto sia da dati sperimentali dai simulatori sia dai calcoli) viene fatta ricorrendo all'uso di Finestre Fenomenologiche tipiche di una tipologia di transitorio (PhW), Fenomeni Chiave (KPh), Aspetti Termoidraulici Rilevanti tipici del transitorio selezionato (RTA), valutazione di parametri a valore singolo (SVP), Sequenze Temporali di Eventi (TSE), Parametri Adimensionali (NDP), Parametri a Valore Integrato (IPA);
13. si esegue un confronto servendosi degli strumenti del punto 12 per dimostrare che i dati raccolti dai simulatori per i test selezionati derivano da transitori simili e che questi sono simili al transitorio ovvero rappresentanti tutti lo stesso scenario selezionato per il NPP; se ciò non avviene il percorso "FG" può essere percorso più volte ottenendo una nodalizzazione ed un utilizzatore più qualificato giungendo alla dimostrazione di similarità (blocco "k"); se in ogni caso non sono superate le condizioni di accuratezza minima per la accettabilità dei dati la metodologia non può essere applicata;
14. gli stessi risultati ottenuti dal punto 12 sono utilizzati per verificare la sostanziale accuratezza del calcolo; se questo non accade non si può procedere con la applicazione della metodologia (blocco "e");
15. la quantificazione della accuratezza del calcolo viene eseguita quando i due punti precedenti sono superati; a tale fine si può utilizzare un metodo basato sull'uso della trasformata di Fourier sviluppato presso il DCMN^{2/} (FFT based methodology) (blocco "f");
16. l'eventuale insoddisfacente risultato del calcolo produce un feedback sulla messa a punto della nodalizzazione che può condurre ad una maggiore messa a punto della nodalizzazione per l'impianto (percorso "GI");

17. si devono effettuare due calcoli relativi all'impianto: uno in cui le condizioni iniziali e quelle al contorno sono derivate da quelle del simulatore debitamente scalate; uno in cui si utilizzano le condizioni effettive dell'impianto (blocco "j");
18. si opera un confronto tra i risultati ottenuti dal calcolo dell'impianto in condizioni "scalate" con i risultati sperimentali e calcolati relativamente ai simulatori; in entrambi i casi PhW e KPh devono essere gli stessi altrimenti la procedura non si può applicare (blocco "k");
19. si ottiene a questo punto una nodalizzazione qualificata dell'impianto (ASM) atta a predire il comportamento dell'impianto per quel transitorio con quelle PhW e KPh, relativa ad un codice qualificato ed impiegata da un utilizzatore qualificato (blocco m);
20. si può ora operare l'estrapolazione della accuratezza (blocco l) alla quale si perviene superando i passi sopra esposti e qui riassunti:
 1. conoscenza e disponibilità dei dati di scala del simulatore;
 2. conoscenza e disponibilità dei dati di scala relativi al test che si desidera studiare;
 3. ottenimento di un database qualificato;
 4. realizzazione e disponibilità di una nodalizzazione e di un utilizzatore qualificato;
 5. verifica della presenza degli stessi RTA nei test relativi al transitorio in esame;
 6. gli stessi RTA riscontrati nei test sperimentali devono essere riprodotti quantitativamente e qualitativamente dal codice;
 7. gli RTA osservati nel calcolo di impianto scalato rispetto al simulatore devono essere gli stessi del test sperimentale condotto su quel simulatore;
 8. nel calcolo di impianto effettivo i PhW e KPh devono essere gli stessi dei test sperimentali (gli SVP, NDP, TSE, IPA possono avere valori diversi dal test sperimentale, ma la causa di tale differenza deve essere spiegabile).

L'estrapolazione della accuratezza avviene mediante l'utilizzo di relazioni statistiche^{/3/}; si assume che il rapporto tra valore sperimentale e calcolato per i diversi SVP, NDP, TSE e IPA sia distribuito in modo casuale intorno al valore della unità. Questa ipotesi è giustificata dal fatto che il numero delle variabili che influenzano il valore del rapporto sopra detto è abbastanza grande. Si può così calcolare la accuratezza media ed una accuratezza al 95° percentile che sono applicate ai risultati del calcolo di impianto.
21. Il valore della estrapolazione sulla accuratezza viene direttamente considerato sul valore calcolato dall'ASM. Una elaborazione successiva è necessaria per trasformare i valori puntuali in bande di errore continue che inviluppano i valori di riferimento ottenuti dall'ASM; in particolare si possono considerare incertezze relativamente al tempo, allo spazio, e alle medie integrali, in riferimento ai diversi tipi di parametri (TSE, SVP, NDP, IPA).

Bibliografia

- /1/ D'Auria F., Debrecin N., Galassi G., "Outline of the Uncertainty Methodology Based on Accuracy Extrapolation (UMAE)". Nuclear Technology, (Jan. 1995)
- /2/ Leonardi M., D'Auria F., Pochard R., "The FFT Based Method Utilisation in the Frame of the UMAE" Special Workshop on Uncertainty analysis Methods, AEA Technology, London, Mar. 1994
- /3/ Belsito S., D'Auria F., Galassi G., "Application of Statistical Model to Evaluation of Counterpart Tests Data Base", ANS Winter Meeting 1993, San Francisco California (US), Nov 1993

APPENDICE 2

IL CODICE RELAP5

Il RELAP5 è un codice termoidraulico per l'analisi di transitori di sistema che sono di interesse per la sicurezza dei reattori ad acqua leggera, sviluppato per simulare al meglio i transitori di reattori ad acqua in pressione e dei sistemi associati. Il codice è in grado di simulare transitori incidentali dovuti a situazioni di LB e SB-LOCA così come di AT, perdita di acqua di alimentazione, trip di potenza e perdita della portata.

Cenni sulle versioni del codice di calcolo RELAP

La serie delle diverse versioni del codice di calcolo RELAP è iniziata col codice RELAPSA (REactor Leak and Power Safety Excursion, 1966). Hanno fatto seguito la versioni RELAP2, RELAP3, RELAP4 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program). Tutti queste versione sono basate su un modello omogeneo di equilibrio del processo di flusso bifase. Nel 1976 lo sviluppo di un modello non-omogeneo di non-equilibrio venne realizzato per il RELAP4. Apparve subito evidente che si rendeva necessario riscrivere totalmente il codice per poter ottenere risultati significativi. Ciò portò allo sviluppo della versione RELAP5.

Il RELAP5 è un codice termoidraulico per l'analisi dei transitori di sistema che sono di interesse per la sicurezza dei reattori ad acqua leggera, sviluppato per simulare al meglio i transitori dei reattori ad acqua in pressione e dei sistemi associati^{1/}.

La principale caratteristica del RELAP5, rispetto ai codici precedenti, consiste nell'uso di un modello idrodinamico non-omogeneo di non-equilibrio per la simulazione dei transitori dei sistemi bifase. L'uso del modello a due fluidi elimina la necessità, presente nel codice RELAP4, di ricorrere a sottomodelli come quelli di salita delle bolle e del trasporto di entalpia, necessari per superare le limitazioni del modello ad un fluido, ma condizionati dal fatto di ricorrere quasi esclusivamente a relazioni di tipo empirico.

Termofluidodinamica

Il modello idrodinamico del RELAP5 è un modello monodimensionale, per il flusso di una miscela acqua-vapore che può contenere un componente incondensabile (in fase vapore), o un componente non volatile (per esempio boro in fase liquida).

Le equazioni del moto, usate come base del modello idrodinamico, sono formulate in termini di parametri del flusso mediati sull'intervallo di tempo.

I fenomeni che dipendono da gradienti in direzione trasversale, rispetto a quella di efflusso, utilizzano per l'attrito e lo scambio termico modelli costitutivi basati su correlazioni semiempiriche. Il modello del sistema idrodinamico è risolto numericamente, facendo uso di una tecnica alle differenze finite di tipo semi-implicito. È prevista inoltre l'opzione per un calcolo di tipo quasi-implicito, nel caso di condizioni termodinamiche lentamente variabili nel tempo.

Le equazioni differenziali di base possiedono radici caratteristiche complesse, che danno al sistema un carattere parzialmente ellittico e così costituiscono un problema ai valori mal posto. Nel RELAP5 il problema numerico è stato reso ben posto grazie all'introduzione di termini di viscosità artificiale che smorzano le componenti spaziali ad alta frequenza della soluzione.

Equazioni di campo

Le equazioni di base sono costituite da equazioni di continuità: di bilancio di massa, quantità di moto ed energia, una per ciascuna fase.

Le variabili indipendenti principali sono 6 (7 se è presente un gas incondensabile):, la pressione (p), l'energia interna delle due fasi (u_f , u_g), il grado di vuoto (α_v), la velocità delle due fasi (j_f , j_g) ed il titolo del gas incondensabile (x_n).

Le equazioni alle differenze finite si basano sul concetto di volume di controllo, in cui si conservano massa ed energia (l'accumulo di queste grandezze in tale volume deve uguagliare, in senso algebrico, le quantità che attraversano i confini della cella). Il modello definisce le proprietà scalari medie del fluido (pressione, energia, densità e frazione di vuoto) al centro del volume di controllo, mentre richiede la conoscenza delle quantità vettoriali (velocità) ai confini del volume stesso. Tali velocità sono associate a flussi di massa e di energia tra due volumi di controllo contigui.

I volumi di controllo sono collegati in serie, usando delle giunzioni per rappresentare i percorsi del fluido: un volume è caratterizzato da una direzione orientata, che ne definisce l'ingresso e l'uscita, e dall'area della sezione trasversale; una giunzione è definita da un'area e da un'orientazione rispetto ai volumi che collega. Tutti i percorsi interni, alternativi, del fluido devono essere esplicitamente modellati, dal momento che alle giunzioni vengono rappresentate separatamente soltanto le velocità delle fasi liquido e vapore.

Per l'approssimazione numerica vengono seguite le seguenti linee:

- i contenuti totali di massa ed energia sono molto importanti nell'analisi di sicurezza delle centrali, per cui sono definiti con schemi numerici conservativi rispetto a tali quantità; un grado di approssimazione inferiore è invece accettato per la quantità di moto;
- per aumentare la velocità di esecuzione dei calcoli viene usata una valutazione implicita per quei termini che definiscono il limite del passo temporale, per la propagazione dell'onda sonora nel mezzo (limite di Courant materiale) e per quei fenomeni che hanno piccole costanti di tempo. Perciò la valutazione implicita è usata per la velocità nei termini di trasporto di massa e di energia, per il gradiente di pressione nelle equazioni della quantità di moto e per i termini di scambio di massa e di quantità di moto tra le fasi;
- sempre per aumentare le velocità di calcolo, sono effettuate valutazioni delle variabili a diversi passi temporali; i termini impliciti risultanti sono lineari nelle nuove variabili temporali. La linearizzazione, in particolare, determina un notevole aumento della velocità di calcolo, eliminando la necessità di dovere risolvere iterativamente sistemi di equazioni non lineari.

Modelli Costitutivi

I modelli costitutivi descrivono il comportamento dei materiali costituenti il sistema termoidraulico, per quel che riguarda la loro reciproca interazione.

Nel caso di fluido bifase, i modelli costitutivi permettono la determinazione di termini presenti nell'equazione di bilancio che non possono essere determinati sulla base delle equazioni stesse, cioè:

- lo scambio termico all'interfaccia;
- l'attrito all'interfaccia;
- l'attrito alla parete;
- lo scambio termico alla parete;
- la pressione e la velocità all'interfaccia;
- il coefficiente di massa virtuale.

La procedura consiste nel determinare il regime di flusso e quindi nell'identificare le leggi costitutive più adatte, all'interno di un insieme di correlazioni che dipendono dal regime di flusso stesso.

- Scambio termico e di massa all'interfaccia

Lo scambio termico, tra ciascuna delle due fasi e l'interfaccia, è suddiviso in due componenti: una relativa al trasporto di calore nella massa, causato dalla differenza tra la temperatura media della fase e la temperatura all'interfaccia, ed una relativa allo scambio termico alla parete, legato ad effetti di surriscaldamento o sottoraffreddamento locale, in prossimità della superficie scambiante calore.

- Attrito all'interfaccia e alla parete

Il termine di attrito all'interfaccia, da porre nell'equazione di campo, è derivato dalla differenza tra le velocità delle due fasi e da un fattore di attrito $f_{v,e}$, determinato da correlazioni diverse a seconda del regime di flusso.

Il modello di attrito alla parete si basa sull'approccio proposto da Chisolm, facente uso di un moltiplicatore bifase, calcolato sulla base della correlazione di "Heat Transfer and Fluid Flow Service".

- Scambio termico alla parete

Anche i percorsi del flusso termico sono modellati monodimensionalmente con una serie di punti consecutivi, per calcolare le temperature e i vettori di flusso termico.

Le strutture calde sono termicamente connesse ai volumi di controllo idrodinamici e, per la simulazione dello scambio termico con le pareti, il codice fa uso di una curva di ebollizione. Vengono così considerati regimi di scambio termico in pre-CHF, in post-CHF e in condensazione. Tra i regimi in pre-CHF sono previsti: il regime liquido monofase, il regime di ebollizione nucleata sottoraffreddata e quello di ebollizione satura. I regimi di post-CHF comprendono la regione del "Transition Boiling", del "Film Boiling" e della convezione con solo vapore.

Modelli speciali di processo

- Modello di efflusso critico

Il modello di efflusso critico si basa su una definizione derivante dell'analisi caratteristica delle equazioni differenziali dipendenti dal tempo.

Il modello è usato per predire se il flusso in corrispondenza di una rottura è critico e, se lo è, per calcolare la condizioni al contorno ed il deflusso di massa dal sistema.

Tale modello può infine essere usato per stabilire se esiste l'efflusso critico in punti interni al sistema e, in caso affermativo, per calcolarlo.

Alcuni miglioramenti sono stati apportati nella versione MOD3 del codice rispetto alle versioni precedenti al fine di correggere le deficienze del modello identificate per mezzo di "independent assesment". I miglioramenti consistono nel raccordo tra il modello di flusso sottoraffreddato ed il modello di efflusso bifase, e l'eliminazione di una discontinuità nel modello bifase causata da un errore nella messa a punto del codice.

- Brusco cambiamento di area

Il modello idrodinamico di base è formulato per aree di flusso variabili con continuità; sono perciò necessari modelli analitici, nel caso che si abbiano bruschi cambiamenti di area o orifizi nelle tubazioni.

Il modello adottato in questi casi è basato sulla relazione di Bourda-Carnot per brusco allargamento e include l'effetto di vena contratta per una brusca restrizione ed orifizio.

- Modelli di stratificazione orizzontale e verticale

Il flusso a bassa velocità di un canale orizzontale può essere stratificato per la presenza delle forze di galleggiamento, causate da differenze di densità tra liquido e vapore. Le pressioni medie nella sezione dipendono quindi, dalla distribuzione trasversale non uniforme delle fasi. Sono state adottate appropriate modifiche alle equazioni di base, tenendo conto delle diverse pressioni nella sezione, per le fasi liquido e vapore, e della pressione alla loro interfaccia.

Il modello per la stratificazione verticale deve poter simulare transitori di pressurizzazione, in cui il liquido sottoraffreddato e il vapore surriscaldato possono coesistere nel pressurizzatore o in altre parti del sistema di refrigerazione primaria.

- Modello di CCFL

Nella versione MOD3 è stato implementato anche il modello di CCFL. Esistono diverse strutture interne al sistema di refrigerazione del reattore (RCS) dove il drenaggio del liquido per gravità può essere impedito da un flusso ascendente di vapore; queste includono la piastra superiore del core, il downcomer anulare, la piastra di supporto dei tubi ed il raccordo dei tubi nel plenum di ingresso dei generatori di vapore. E' stato usato un modello generale di CCFL che permette all'utilizzatore di selezionare la formulazione di Wallis o di Kutateladze o una forma mista delle due. Con riguardo al metodo risolutivo, se il modello di CCFL è richiesto dall'utilizzatore, il codice controlla se esiste flusso in controcorrente e se il flusso discendente di liquido eccede il limite imposto dalla equazione. Se ciò risulta vero è applicata oltre all'equazione di momento anche l'equazione di limitazione del flooding. L'utilizzatore può imporre le costanti che caratterizzano la forma dell'equazione di CCFL, oppure scegliere l'opzione di default.

Scambio di calore

Le strutture termiche permettono il calcolo del calore trasmesso attraverso i confini materiali dei volumi idrodinamici; le possibilità di simulazione sono ampie e comprendono barrette di combustibile nucleare o piastre con riscaldamento elettrico, trasmissione del calore attraverso i tubi del generatore di vapore e dalle pareti del vessel.

Tali strutture sono rappresentate da un modello di conduzione del calore monodimensionale in geometria cartesiana, cilindrica o sferica. Le conducibilità termiche e le capacità termiche volumetriche, dipendenti dalla temperatura, sono fornite da tabelle e funzioni.

Per la soluzione della conduzione di calore si usa una tecnica alle differenze finite in cui ciascun intervallo di mesh può avere una spaziatura diversa ed un materiale diverso. La dipendenza dal tempo della sorgente di calore interna, può essere ottenuta dal modello di cinetica del reattore, da tabelle che danno la potenza in funzione del tempo o da una variabile di controllo. Sono permesse condizioni iniziali di simmetria o di parete isolata e tabelle di temperatura superficiale, flusso di calore, coefficiente di trasmissione termica, in funzione del tempo.

Sistema di controllo

Il modello del sistema di controllo offre la possibilità di valutare contemporaneamente equazioni algebriche e differenziali ordinarie che descrivono fenomeni interconnessi. È possibile simulare sistemi di controllo tipicamente usati nei sistemi idrodinamici, ma possono anche essere simulati altri fenomeni descritti da equazioni differenziali ordinarie o algebriche.

L'avanzamento del sistema di controllo è successivo a quello idrodinamico, con lo stesso time step, così nell'avanzamento del modello di controllo sono utilizzate nuove informazioni termiche e idrodinamiche.

Un altro uso è la definizione di quantità ausiliarie di "output", come le pressioni differenziali, in modo che possano essere stampate e graficate. Il sistema di controllo consiste di parecchi tipi di componenti, ciascuno dei quali definisce una variabile di controllo come specifica funzione di quantità variabili nel tempo.

Tali quantità comprendono: volume idrodinamico, giunzione, pompa, valvola, struttura termica, cinetica neutronica, "trips" e le variabili di controllo stesse. Questo permette lo sviluppo di variabili di controllo di componenti che effettuano semplici operazioni di base.

Sistema di trip

Il sistema di trip è composto da dichiarazioni logiche: ciascun trip è una dichiarazione logica che ha un risultato vero o falso e una variabile associata detta TIMEOFF che assume il valore 1 quando il trip è falso e contiene il tempo a cui il trip diventa vero. Questa variabile permette ritardi

di tempi e variazioni a gradino riproducenti eventi che si pensa possano verificarsi durante il transitorio.

Nella struttura del RELAP5, il sistema di trip è utilizzato solo come valutazione delle dichiarazioni logiche; in particolare sulla base dello stato dei trip si possono aprire e chiudere valvole, azionare o fermare le pompe, avviare variazioni di potenza o sistemi di emergenza.

I trip si dividono in variabili e logici. Questi ultimi consistono sia di trip variabili che di altri trip logici, il che permette di realizzare espressioni complesse, partendo da semplici espressioni logiche.

Entrambi i tipi di trip possono avere l'opzione "latched" o "unlatched": i primi, una volta posti veri, restano sempre veri nel corso del transitorio, mentre i secondi diventano falsi se vengono meno le condizioni che li hanno resi veri, cioè vengono valutati ad ogni passo temporale.

Cinetica del reattore

L'opzione di cinetica neutronica può essere usata per calcolare il comportamento in potenza del reattore. La potenza è calcolata utilizzando l'approssimazione di cinetica zero-dimensionale, cioè indipendente dalla coordinata spaziale, assumendo la separabilità in funzione dello spazio e del tempo. Questa approssimazione è adeguata nei casi in cui la forma della distribuzione spaziale rimane invariata nel corso del transitorio.

Il modello di cinetica del RELAP5 calcola sia la potenza di fissione che la potenza del decadimento dei prodotti di fissione.

Bibliografia

/1/ Ransom V. H. et alii "RELAP5/mod3 Code Manual : User Guide and Input Requirements", NUREG/CR-4312 EGG 2396, Idaho (USA), Mar. 1987

APPENDICE 3

Di seguito un esempio di input per la procedura AFE

'A104EXP.TXT'	<i>Campo a_1</i>
'A104CALC.TXT'	<i>Campo a_2</i>
73	<i>Campo b_1</i>
77	<i>Campo b_2</i>
3	<i>Campo c</i>
0.0 4.6 0.0 11. 1.	<i>Campo $d_{1.1}/d_{1.2}/d_{1.3}/d_{1.4}/d_{1.5}$</i>
4.6 23. 11. 26. 1.
23. 72. 26. 72. 1.	<i>Campo $d_{n.1}/d_{n.2}/d_{n.3}/d_{n.4}/d_{n.5}$</i>
712	<i>Campo e</i>
'A104'	<i>Campo f</i>
1. 1. 1. 1.	<i>Campo $g_1/g_2/g_3/g_4$</i>

Campo a_1

Nome del file (eventualmente anche il percorso) che contiene le sei variabili, più il tempo, che costituiscono i dati calcolati di ingresso per AFE.

Campo a_2

Nome del file (eventualmente anche il percorso) che contiene le sei variabili, più il tempo, che costituiscono i dati sperimentali di ingresso per AFE.

Campo b_1

Numero di rilevamenti per le grandezze calcolate (ovvero il numero di righe che compongono il file dei dati calcolati).

Campo b_2

Numero di rilevamenti per le grandezze sperimentali (ovvero il numero di righe che compongono il file dei dati sperimentali).

Campo c

Numero di intervalli di confronto

Campo d

Per ogni intervallo di confronto (Campo c) devono essere specificati:

$d_{i.1}$ istante temporale sperimentale di inizio
 $d_{i.2}$ istante temporale sperimentale finale
 $d_{i.3}$ istante temporale calcolato di inizio
 $d_{i.4}$ istante temporale calcolato finale
 $d_{i.5}$ fattore peso per la temperatura superficiale di barretta a 2/3 altezza core

Campo e

Il fattore di scala della facility scritto come $1/K_v$

Campo f

Identificativo del test considerato (4 caratteri)

Campo g

g_1 fattore peso/esclusione per la pressione del circuito primario
 g_2 fattore peso/esclusione per la massa del fluido refrigerante del circuito primario
 g_3 fattore di esclusione per la temperatura superficiale delle barrette a 2/3 altezza core
 g_4 fattore peso/esclusione per il tempo

Nelle pagine seguenti un esempio di matrice QAM e del vettore TAV

QAM

111111
UPT5 75.4 14.04 -1.00 -1.00 -1.00 -1.00
UPT7 22.0 8.03 -1.00 -1.00 -1.00 -1.00

111131

111151

111112
UPT5 75.4 14.04 -1.00 -1.00 -1.00 -1.00
UPT7 22.0 8.03 -1.00 -1.00 -1.00 -1.00

111132

111152

111113
UPT5 75.4 14.04 -1.00 -1.00 -1.00 -1.00
UPT7 22.0 8.03 -1.00 -1.00 -1.00 -1.00

111133

111153

111121

111141

111211

111122

111142

111212

111123

111143

111213

TAV

1	4		7	10		13		16		19		22		
	1516	.033		1516	.067	1516	.134	1516	.168	1516	.202		1516	.235
	A104	15.867		A104	31.735	A104	55.944	A104	49.230	A104	42.517		A104	35.804
	BL34	10.416		BL34	20.833	BL34	41.666	BL34	41.391	BL34	41.115		BL34	40.840
	BL44	2.479		BL44	4.958	BL44	9.129	BL44	9.245	BL44	9.362		BL44	9.478
	CL18	8.333		CL18	16.666	CL18	33.333	CL18	33.193	CL18	32.913		CL18	32.703
	CL21	.000		CL21	.000	CL21	.000	CL21	7.070	CL21	17.676		CL21	31.818
	L2-5	18.281		L2-5	36.562	L2-5	43.522	L2-5	39.601	L2-5	35.680		L2-5	31.759
	LSLF	.003		LSLF	.006	LSLF	.013	LSLF	.016	LSLF	.019		LSLF	.023
	SB03	6.250		SB03	12.500	SB03	25.000	SB03	24.796	SB03	24.592		SB03	24.388
	SB04	.000		SB04	.000	SB04	.000	SB04	.000	SB04	.003		SB04	.009
	SP02	1.038		SP02	2.076	SP02	4.114	SP02	4.152	SP02	6.228		SP02	7.266
	UPT5	.000		UPT5	.000	UPT5	.000	UPT5	.000	UPT5	.000		UPT5	.000
2	5		8	11		14		17		20		23		
	1516	.044		1516	.078	1516	.145	1516	.179	1516	.213		1516	.246
	A104	21.157		A104	37.024	A104	53.706	A104	46.993	A104	40.279		A104	33.566
	BL34	13.888		BL34	24.305	BL34	41.574	BL34	41.299	BL34	41.023		BL34	40.748
	BL44	3.305		BL44	5.785	BL44	9.090	BL44	9.284	BL44	9.400		BL44	9.517
	CL18	11.111		CL18	19.444	CL18	33.263	CL18	33.053	CL18	32.843		CL18	32.633
	CL21	.000		CL21	.000	CL21	.000	CL21	10.606	CL21	21.212		CL21	31.818
	L2-5	24.375		L2-5	48.750	L2-5	42.215	L2-5	38.294	L2-5	34.373		L2-5	30.452
	LSLF	.004		LSLF	.007	LSLF	.014	LSLF	.017	LSLF	.020		LSLF	.024
	SB03	8.333		SB03	14.583	SB03	20.833	SB03	24.932	SB03	24.728		SB03	24.320
	SB04	.000		SB04	.000	SB04	.000	SB04	.000	SB04	.005		SB04	.011
	SP02	1.384		SP02	2.422	SP02	3.460	SP02	4.498	SP02	5.536		SP02	7.612
	UPT5	.000		UPT5	.000	UPT5	.000	UPT5	.000	UPT5	.000		UPT5	.000
3	6		9	12		15		18		21		24		
	1516	.056		1516	.089	1516	.157	1516	.190	1516	.224		1516	.258
	A104	26.446		A104	42.314	A104	58.181	A104	44.755	A104	38.041		A104	31.328
	BL34	17.361		BL34	27.777	BL34	41.666	BL34	41.207	BL34	40.931		BL34	40.656
	BL44	4.132		BL44	6.611	BL44	9.090	BL44	9.207	BL44	9.323		BL44	9.439
	CL18	13.888		CL18	22.222	CL18	33.333	CL18	33.193	CL18	32.983		CL18	32.563
	CL21	.000		CL21	.000	CL21	.000	CL21	3.535	CL21	14.141		CL21	31.753
	L2-5	30.468		L2-5	48.750	L2-5	44.829	L2-5	40.908	L2-5	33.066		L2-5	29.145
	LSLF	.005		LSLF	.008	LSLF	.012	LSLF	.015	LSLF	.021		LSLF	.025
	SB03	10.416		SB03	16.666	SB03	25.000	SB03	24.864	SB03	24.660		SB03	24.253
	SB04	.000		SB04	.000	SB04	.000	SB04	.000	SB04	.007		SB04	.013
	SP02	1.730		SP02	2.768	SP02	3.806	SP02	4.844	SP02	5.882		SP02	7.958
	UPT5	.000		UPT5	.000	UPT5	.000	UPT5	.000	UPT5	.000		UPT5	.000
4	1		4	13		16		19		22		25		
	1516	.068		1516	.136	1516	.170	1516	.204	1516	.238		1516	.272
	A104	27.692		A104	55.384	A104	83.076	A104	70.368	A104	57.660		A104	44.952
	BL34	17.795		BL34	35.590	BL34	53.385	BL34	45.580	BL34	37.775		BL34	29.970
	BL44	4.444		BL44	8.889	BL44	13.333	BL44	11.111	BL44	9.259		BL44	7.407
	CL18	13.333		CL18	26.667	CL18	40.000	CL18	33.333	CL18	26.667		CL18	20.000
	CL21	.000		CL21	.000	CL21	.000	CL21	.000	CL21	.000		CL21	.000
	L2-5	33.333		L2-5	66.667	L2-5	100.000	L2-5	83.333	L2-5	66.667		L2-5	50.000
	LSLF	.006		LSLF	.012	LSLF	.018	LSLF	.024	LSLF	.030		LSLF	.036
	SB03	16.667		SB03	33.333	SB03	50.000	SB03	41.667	SB03	33.333		SB03	25.000
	SB04	.000		SB04	.000	SB04	.000	SB04	.000	SB04	.000		SB04	.000
	SP02	2.667		SP02	5.333	SP02	8.000	SP02	6.667	SP02	5.333		SP02	4.000
	UPT5	.000		UPT5	.000	UPT5	.000	UPT5	.000	UPT5	.000		UPT5	.000

APPENDICE 4

Nelle due pagine seguenti un esempio di QUM e TUV rispettivamente prodotti dalla procedura DAST

In entrambi i casi solo i valori sulla estrema destra sono quelli di incertezza, mentre gli altri sono utilizzati in fase di messa a punto della procedura DAST

QUM

...

	TUV		
2.380338E-03	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
2.380338E-03	1.589054	1.052155	4.232769
2.380338E-03	3.178110	2.104311	8.465540
2.380338E-03	4.767164	3.156466	12.698310
2.380338E-03	6.356219	4.208622	16.931080
2.380338E-03	7.945274	5.260775	21.163850
2.380338E-03	9.534328	6.312931	25.396610
2.380338E-03	12.308650	7.716188	32.351860
2.380338E-03	12.712440	8.417242	33.862150
2.380338E-03	12.943290	9.042990	34.951100
2.380338E-03	13.479000	9.851409	36.832860
2.380338E-03	14.058890	10.660440	38.803600
2.380338E-03	13.791350	10.671890	38.279980
2.380338E-03	13.532510	10.673230	37.763650
2.380338E-03	13.146770	10.878560	37.198000
2.380338E-03	12.832040	11.083900	36.774360
2.380338E-03	12.593630	11.289230	36.503370
2.380338E-03	12.435860	11.494660	36.393740
2.380338E-03	12.361890	11.700090	36.451710
2.380338E-03	12.373220	11.905520	36.680300
2.380338E-03	12.469630	12.110940	37.079040
2.380338E-03	12.938170	12.520370	38.426500
2.380338E-03	12.908370	12.521800	38.368360
2.380338E-03	12.899950	12.519490	38.349190
2.380338E-03	12.918700	12.517180	38.384380
2.380338E-03	12.961310	12.448030	38.400280
2.380338E-03	13.037110	12.512560	38.616560
2.380338E-03	13.132850	12.566880	38.862480
2.380338E-03	13.248200	12.621190	39.147640
2.380338E-03	13.527760	12.750020	39.835900
2.380338E-03	13.535680	12.729830	39.831490
2.380338E-03	13.544500	12.703700	39.822940
2.380338E-03	13.565970	12.677570	39.839690
2.380338E-03	13.596050	12.668380	39.890620
2.380338E-03	13.646600	12.625310	39.948550
2.380338E-03	13.810250	12.640490	40.291080
2.380338E-03	13.783130	12.539230	40.135340
2.380338E-03	13.734950	12.397770	39.897180
2.380338E-03	13.677910	12.344940	39.730150
2.380338E-03	13.621210	12.292110	39.563780
2.380338E-03	13.564840	12.239270	39.398080
2.380338E-03	13.508800	12.186440	39.233040
2.380338E-03	13.453100	12.133610	39.068690
2.380338E-03	13.397750	12.080770	38.905030
2.380338E-03	13.342740	12.027940	38.742060
2.380338E-03	13.288090	11.975110	38.579800
2.380338E-03	13.233800	11.922280	38.418250
2.380338E-03	13.179870	11.869440	38.257440
2.380338E-03	13.126310	11.816610	38.097350
2.380338E-03	13.073110	11.763780	37.938000
2.380338E-03	13.020290	11.710950	37.779410
2.380338E-03	12.967850	11.658110	37.621570
2.380338E-03	12.915800	11.605280	37.464510
2.380338E-03	12.864140	11.552450	37.308220
2.380338E-03	12.812870	11.499620	37.152720
2.380338E-03	12.762000	11.446780	36.998020
2.380338E-03	12.711530	11.393950	36.844130
2.380338E-03	12.661470	11.341120	36.691050
2.380338E-03	12.611820	11.288290	36.538800
2.380338E-03	12.562590	11.235450	36.387380

APPENDICE 5

Nel seguito alcuni esempi dei file prodotti dalla procedura UBEP

Esempio di file di testo che riporta le curve delle variabili (pressione primaria, massa refrigerante in percentuale e temperatura superficiale di barretta) insieme alla temperatura di saturazione relativa alla pressione primaria

Time	P	M	T	Tsat
.0	15.5	100.0	603.2	617.9
1.0	14.7	99.2	610.3	613.7
2.0	14.4	98.4	610.7	612.0
3.0	14.1	97.6	609.9	610.3
4.0	14.0	96.9	609.9	609.8
5.0	13.8	96.1	610.0	608.6
6.0	13.7	95.3	609.8	608.1
7.0	13.6	94.6	609.4	607.5
8.0	13.5	93.8	608.9	606.9
9.0	13.4	93.1	608.4	606.3
10.0	13.3	92.3	607.8	605.7
11.0	13.2	91.6	607.2	605.2
12.0	13.1	90.8	606.6	604.6
13.0	13.0	90.1	606.0	604.0
14.0	12.8	89.4	605.4	602.8
15.0	12.7	88.7	604.7	602.2
16.0	12.6	88.0	603.9	601.5
17.0	12.5	87.3	603.0	600.9
18.0	12.3	86.6	602.0	599.7
19.0	12.2	85.9	600.9	599.0
20.0	12.0	85.2	599.8	597.8
21.0	11.8	84.5	598.7	596.5
22.0	11.7	83.9	597.5	595.9
23.0	11.5	83.2	596.4	594.5
24.0	11.3	82.6	595.2	593.2
25.0	11.1	82.0	594.1	591.9
26.0	10.9	81.4	593.1	590.5
27.0	10.8	80.8	592.0	589.8
28.0	10.6	80.2	590.9	588.4
29.0	10.4	79.6	589.9	587.0
30.0	10.3	79.1	588.9	586.3
31.0	10.2	78.5	588.0	585.6
32.0	10.0	78.0	587.1	584.1
33.0	9.9	77.5	586.4	583.5
34.0	9.8	76.9	585.6	582.8
35.0	9.7	76.4	585.0	582.1
36.0	9.6	75.9	584.4	581.5
37.0	9.6	75.4	583.9	581.0
38.0	9.5	75.0	583.4	580.4
39.0	9.4	74.5	582.9	580.0
40.0	9.4	74.0	582.4	579.5
41.0	9.3	73.6	582.0	579.1
42.0	9.3	73.1	581.6	578.7
43.0	9.2	72.7	581.2	578.3
44.0	9.2	72.3	580.9	578.0
45.0	9.1	71.8	580.5	577.6
46.0	9.1	71.4	580.2	577.3

Esempio di file di testo che riporta le curve limite inferiore e superiore relative alla banda di incertezza della pressione primaria

Time	sup	inf
0.000000E+00	15.623110	15.376890
1.000000	15.280730	14.134270
2.000000	14.959270	13.836930
3.000000	14.702060	13.496540
4.000000	14.597050	13.400150
5.000000	14.389230	13.209370
6.000000	14.234690	13.166710
7.000000	14.129240	13.069160
8.000000	14.363270	12.437930
9.000000	14.363270	12.343730
10.000000	14.363270	12.250910
11.000000	14.254470	12.066580
12.000000	14.147290	11.881320
13.000000	14.041610	11.788040
14.000000	13.934420	11.695220
15.000000	13.934420	11.602400
16.000000	13.720490	11.141240
17.000000	13.612770	10.961300
18.000000	13.505580	10.778530
19.000000	13.398400	10.687010
20.000000	13.253760	10.321640
21.000000	13.253760	10.138870
22.000000	13.253760	9.956191
23.000000	13.039700	9.866131
24.000000	12.822270	9.684819
25.000000	12.713390	9.063232
26.000000	12.492920	8.974804
27.000000	12.278760	8.714569
28.000000	12.278760	8.016796
29.000000	12.061330	7.937192
30.000000	11.844010	7.864296
31.000000	11.822800	7.864296
32.000000	11.822800	7.864296
33.000000	11.822800	7.864296
34.000000	11.822800	7.864296
35.000000	11.822800	7.864296
36.000000	11.822800	7.500219
37.000000	11.822800	7.459731
38.000000	11.822800	7.427324
39.000000	11.705410	7.362590
40.000000	11.597900	7.329860
41.000000	11.060980	7.306342
42.000000	11.060980	7.306342
43.000000	11.060980	7.306342

Esempio di file di testo che riporta le curve limite inferiore e superiore relative alla banda di incertezza della massa del refrigerante

Time	sup	inf
0.000000E+00	100.000000	100.000000
1.000000	101.926000	96.469760
2.000000	101.115900	95.702950
3.000000	100.818000	94.467190
4.000000	100.025000	93.724170
5.000000	99.232060	92.981130
6.000000	97.970150	92.725650
7.000000	97.181340	91.979060
8.000000	100.874800	85.282190
9.000000	100.874800	84.591070
10.000000	100.874800	83.909480
11.000000	100.057300	82.569470
12.000000	99.251120	81.900890
13.000000	98.458240	81.244420
14.000000	97.666120	80.586830
15.000000	97.666120	79.942340
16.000000	96.875310	79.309960
17.000000	96.098790	78.704010
18.000000	95.320980	78.090870
19.000000	94.558660	77.489910
20.000000	93.810650	76.312310
21.000000	92.426370	75.747840
22.000000	92.426370	75.183470
23.000000	91.708790	74.638500
24.000000	90.994340	74.097210
25.000000	90.294080	73.227520
26.000000	89.597600	72.712920
27.000000	88.921900	71.708000
28.000000	88.921900	66.856580
29.000000	88.264150	66.404420
30.000000	88.071210	65.966840
31.000000	88.071210	65.966840
32.000000	88.071210	65.966840
33.000000	88.071210	65.966840
34.000000	88.071210	65.498670
35.000000	88.071210	65.097980
36.000000	88.071210	63.105950
37.000000	88.071210	62.727410
38.000000	88.071210	62.360170
39.000000	87.475590	61.648660
40.000000	86.899150	61.299030
41.000000	84.670610	60.965970
42.000000	84.120210	60.965970
43.000000	83.580730	60.965970
44.000000	83.130460	60.928620
45.000000	83.130460	60.622420
46.000000	83.130460	60.323620
47.000000	83.130460	60.034240
48.000000	83.130460	59.747950
49.000000	82.631800	59.467290

Esempio di file di testo che riporta le curve limite inferiore e superiore relative alla banda di incertezza della temperatura superficiale di barretta

Time	sup	inf
0.000000E+00	618.544700	617.264500
1.000000	616.760000	610.537300
2.000000	615.054400	608.857200
3.000000	613.668200	606.898200
4.000000	613.096600	606.336200
5.000000	611.955500	605.214500
6.000000	611.098300	604.962000
7.000000	610.509100	604.382000
8.000000	611.812000	600.543800
9.000000	611.812000	602.309400
10.000000	611.812000	601.762500
11.000000	611.812000	600.564000
12.000000	611.208500	599.921800
13.000000	610.610200	599.219300
14.000000	610.016800	598.428300
15.000000	610.016800	597.558200
16.000000	609.411300	592.152500
17.000000	609.411300	590.928600
18.000000	608.191500	589.669400
19.000000	607.571500	589.032500
20.000000	606.950700	586.447400
21.000000	606.326000	585.127600
22.000000	606.326000	583.789900
23.000000	605.476700	583.123400

APPENDICE 6

Nel seguito sono illustrati i risultati ottenuti dalla applicazione della CIAU con la matrice QUM ed il vettore TUV, set n. 1.

Le figure da 1 a 3 mostrano le bande di incertezza (insieme ai dati calcolati e sperimentali) ottenute considerando il calcolo del test SP-SB-04 relativamente alla pressione del circuito primario, alla massa del refrigerante del circuito primario e alla temperatura superficiale della barretta di combustibile ad una altezza di 2/3 del core.

Le figure da 4 a 6 mostrano l'errore misurato nei singoli ipercubi. In ascissa dei grafici è riportato il numero dell'ipercubo considerato come in una sequenza che parte dell'ipercubo 111111 e continua variando successivamente gli indici più a sinistra del codice identificativo dell'ipercubo.

La figura 7 mostra la stessa quantità ma relativamente agli intervalli temporali.

La figura 8 mostra la sequenza (come sopra determinata) temporale degli ipercubi.

Infine le figure 9, 10, 11 mostrano le bande di incertezza del calcolo CL-18 per le stesse variabili del caso SP-SB-04.

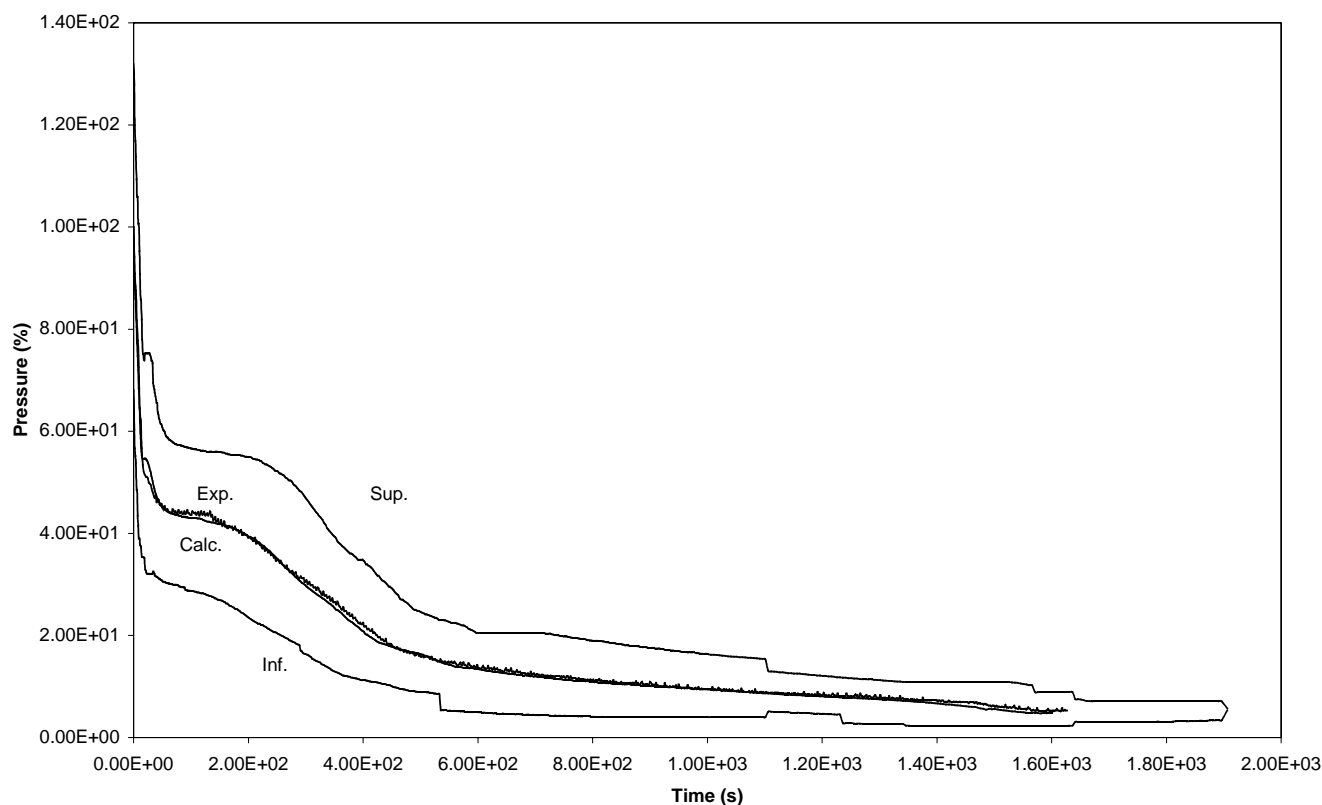


Fig. 1- SP-SB-04 Test : upper plenum pressure and uncertainty band

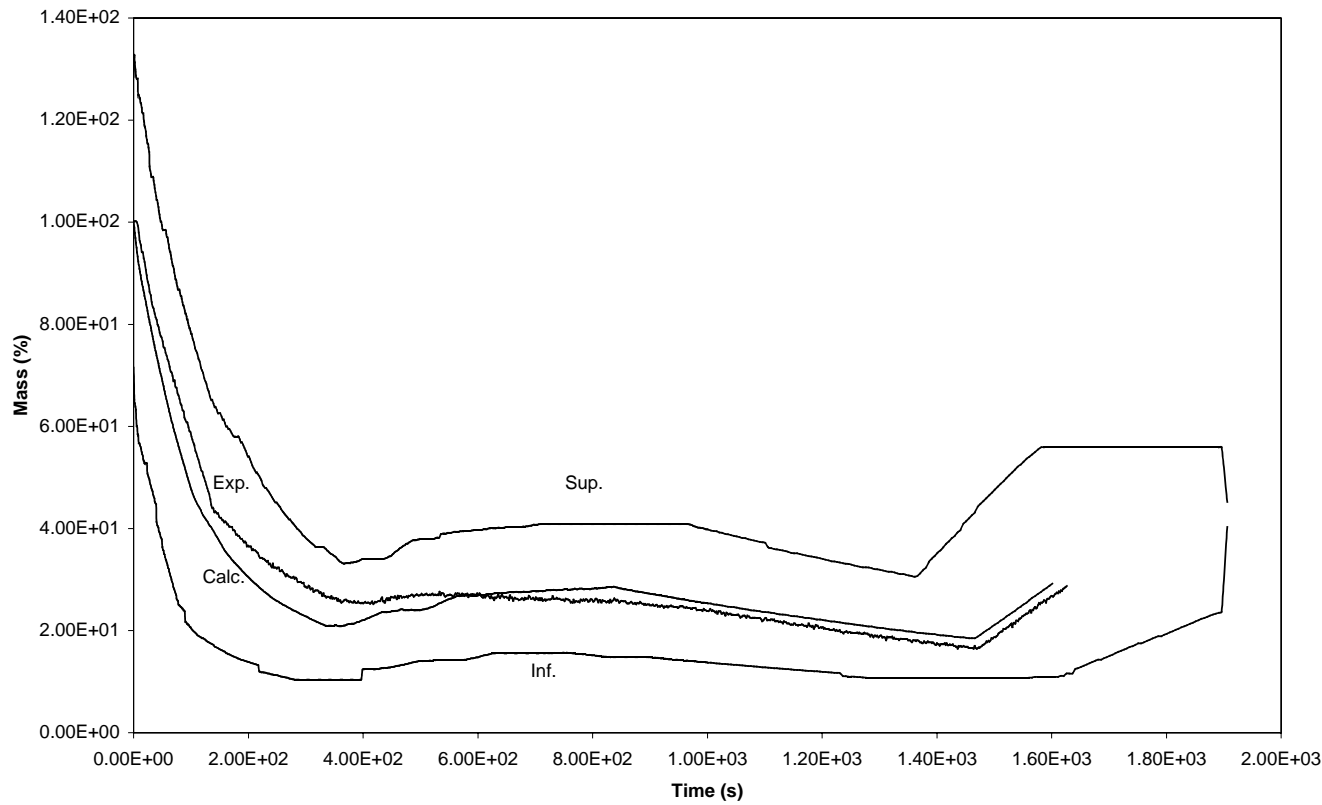


Fig. 2- SP-SB-04 Test: primary circuit mass inventory and uncertainty band

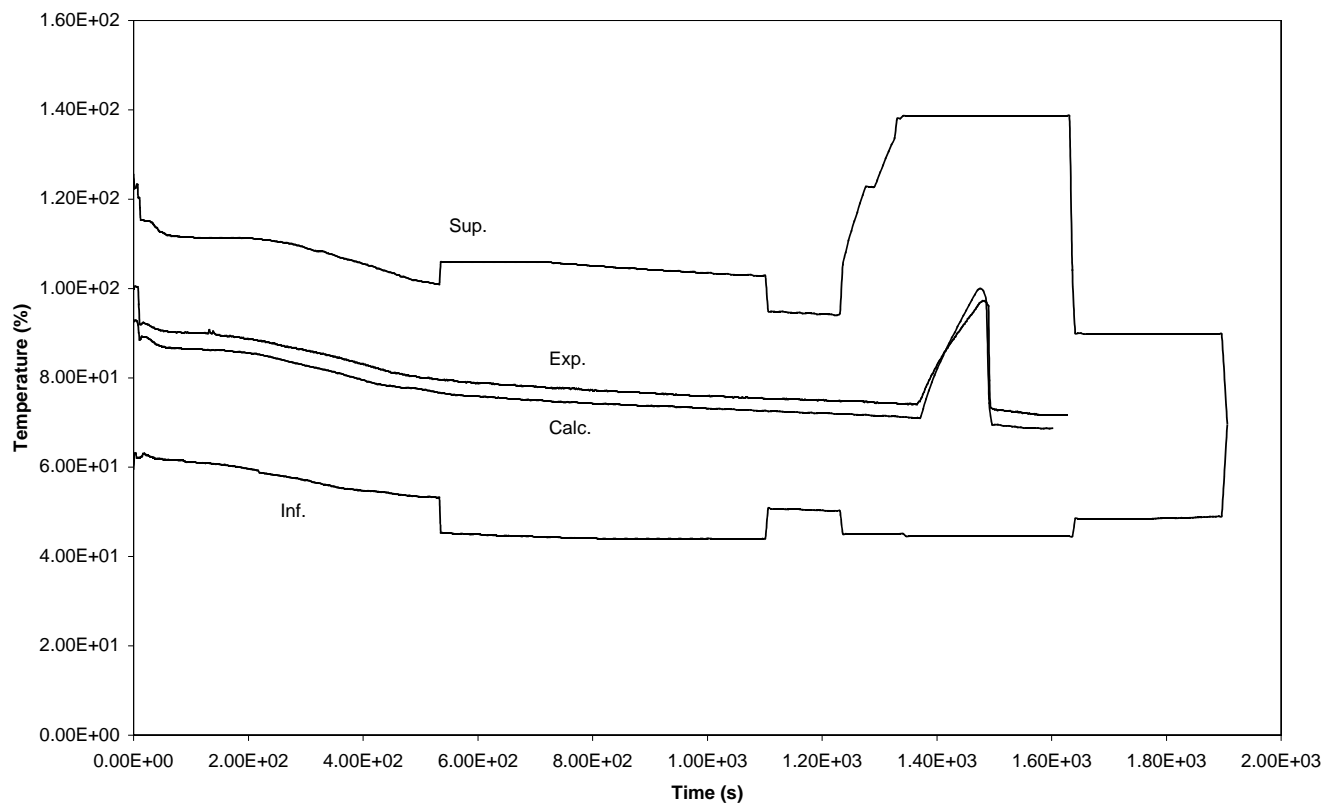


Fig. 3 – SP-SB-04 Test: core fuel clad temperature at 2/3 core height and uncertainty band

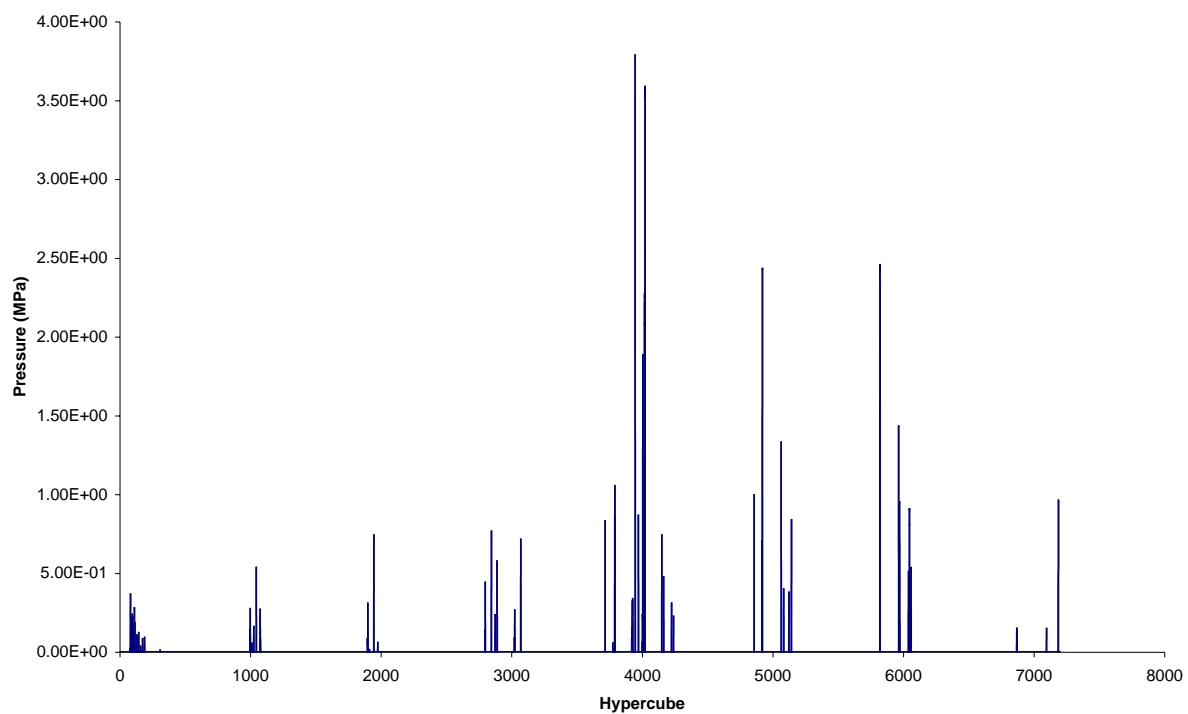


Fig. 4 – Error values implemented in hypercubes: primary system pressure

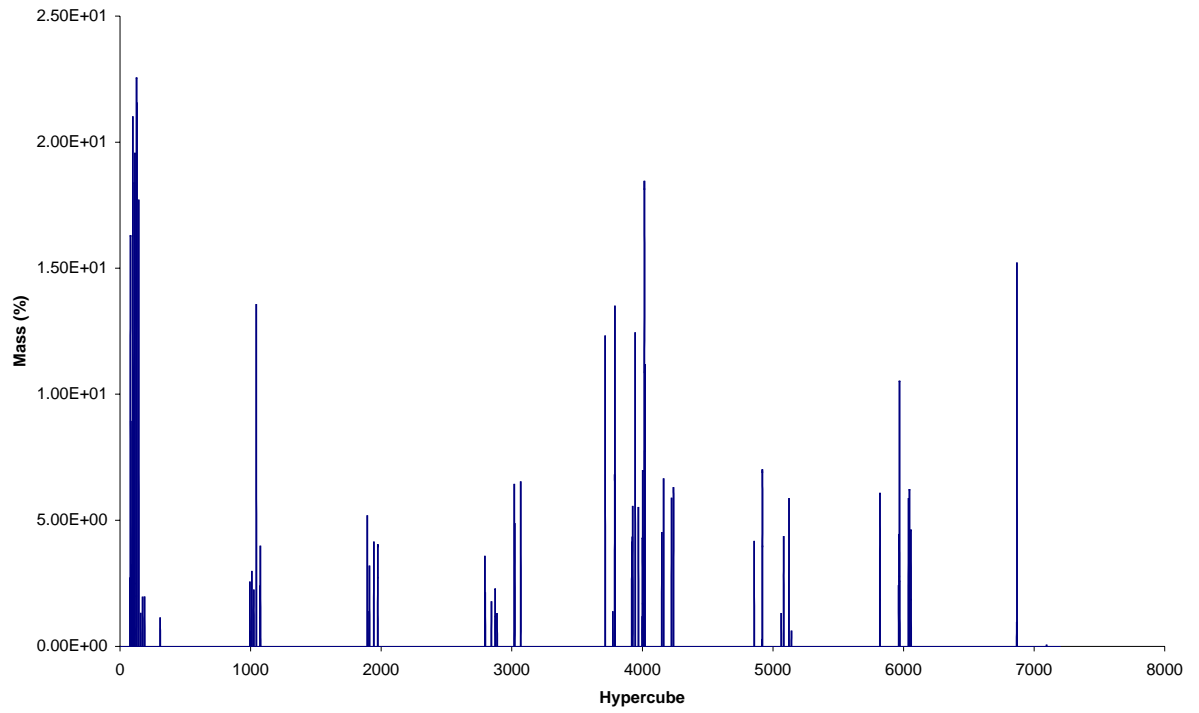


Fig. 5 – Error values implemented in hypercubes: primary mass inventory

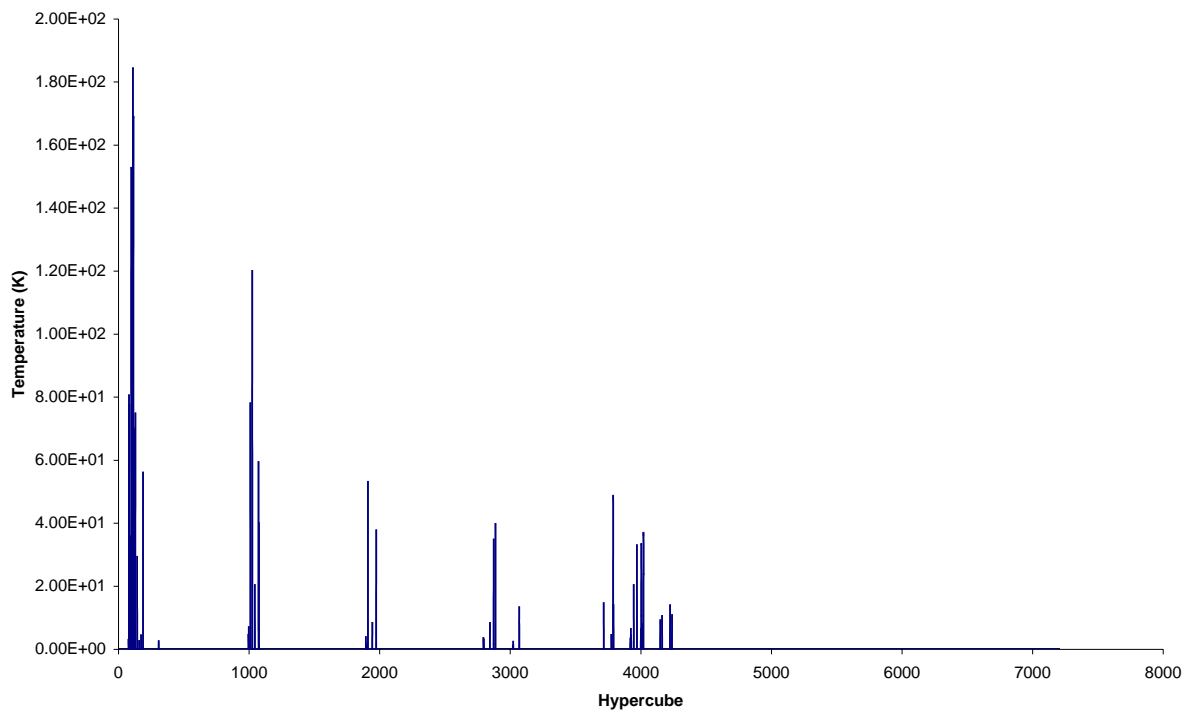


Fig. 6 – Error values implemented in hypercubes: fuel clad temperature at 2/3 core height

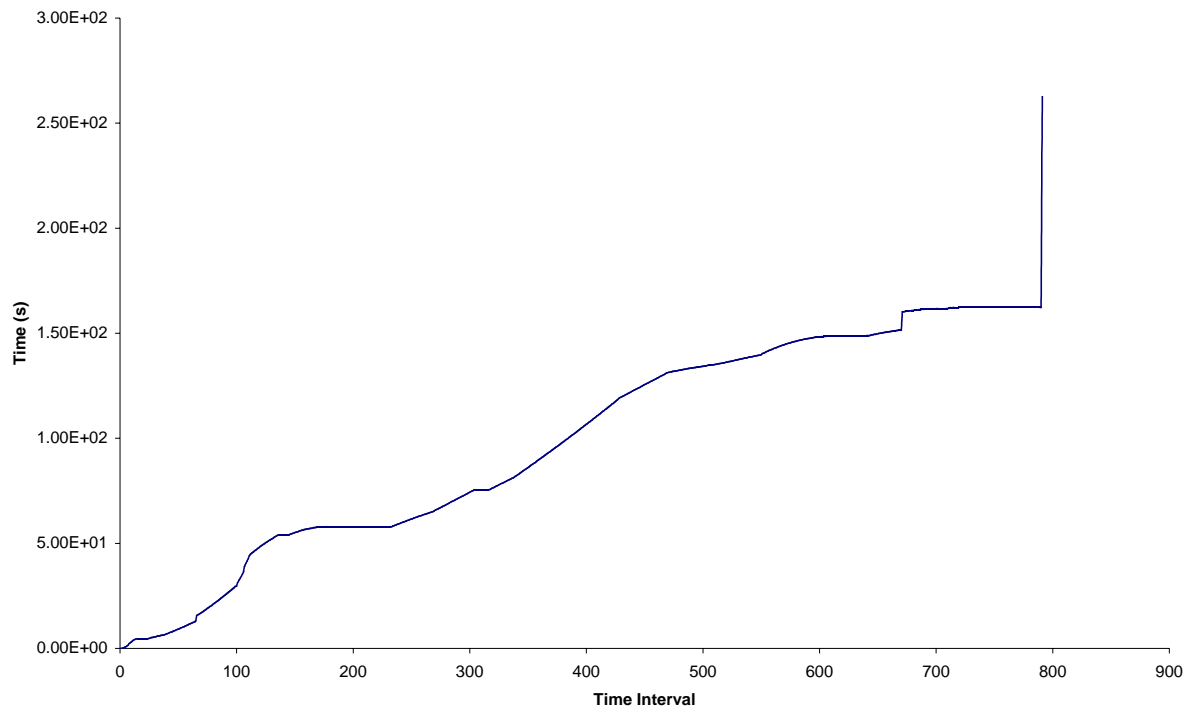


Fig. 7 – Error values implemented in time intervals

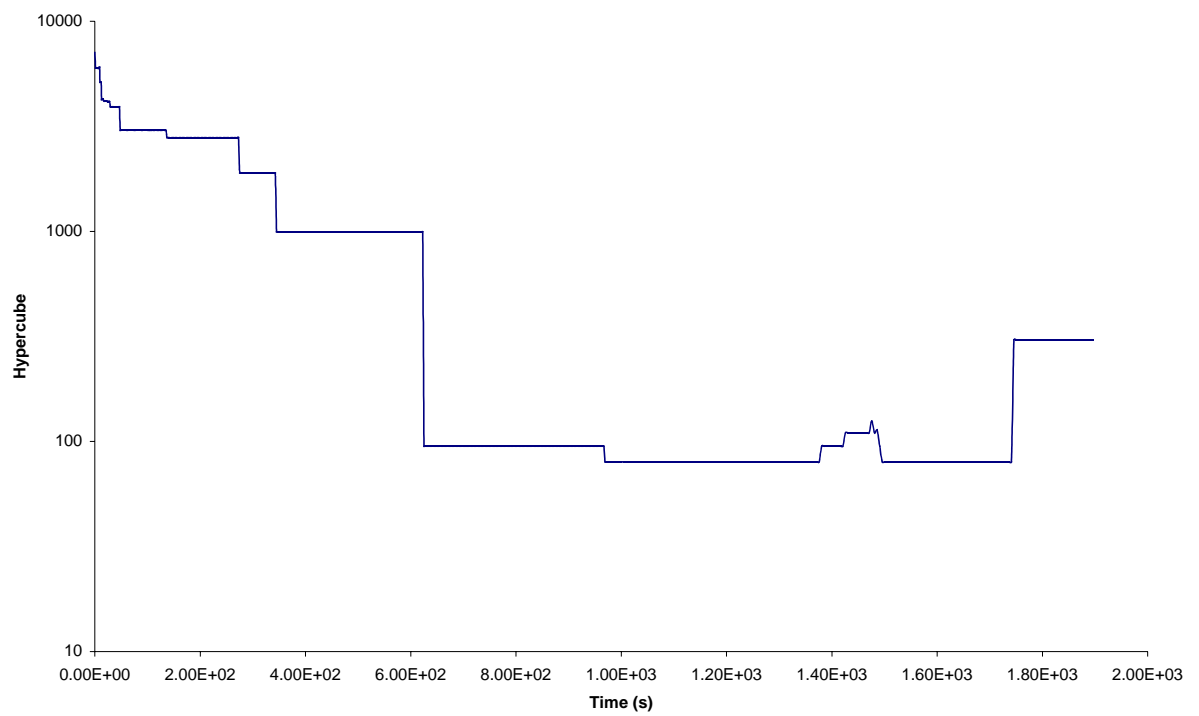


Fig. 8 – SP-SB-04 Test: hypercube time sequence

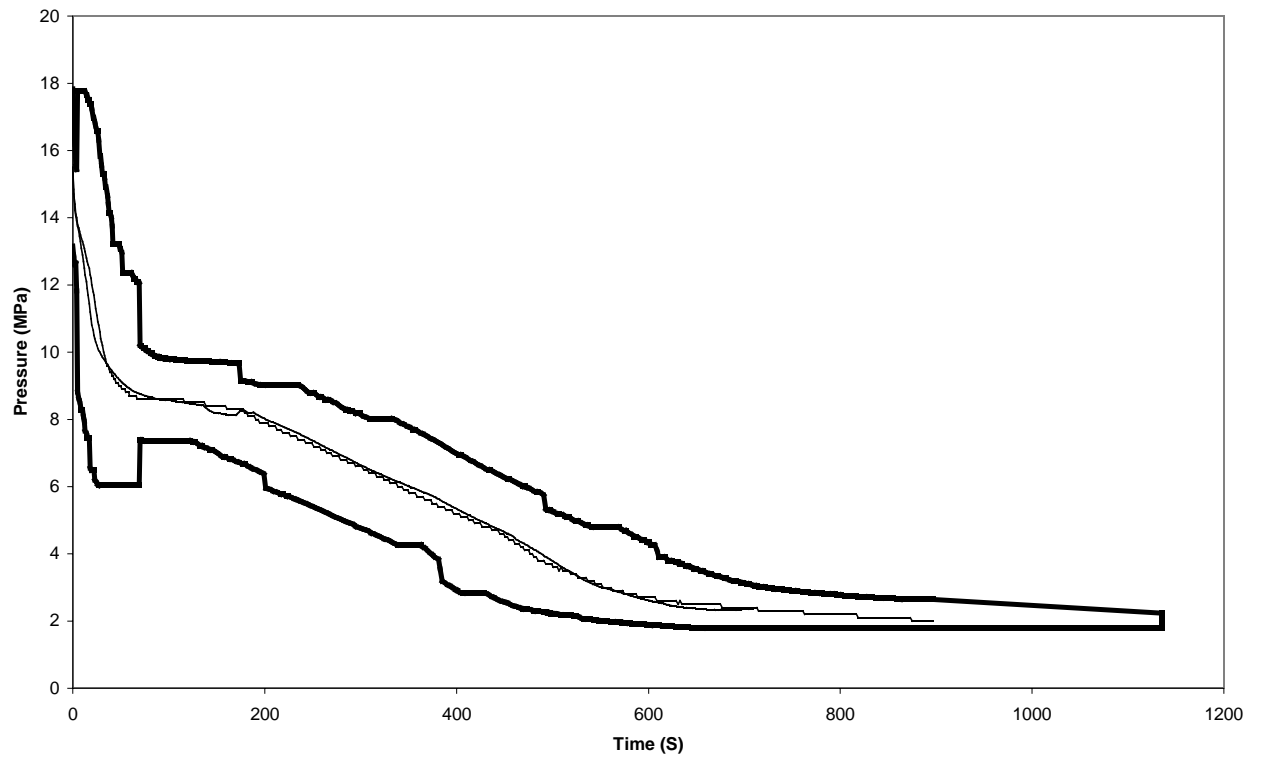


Fig. 9 – CL-18 Test: upper plenum pressure and uncertainty band

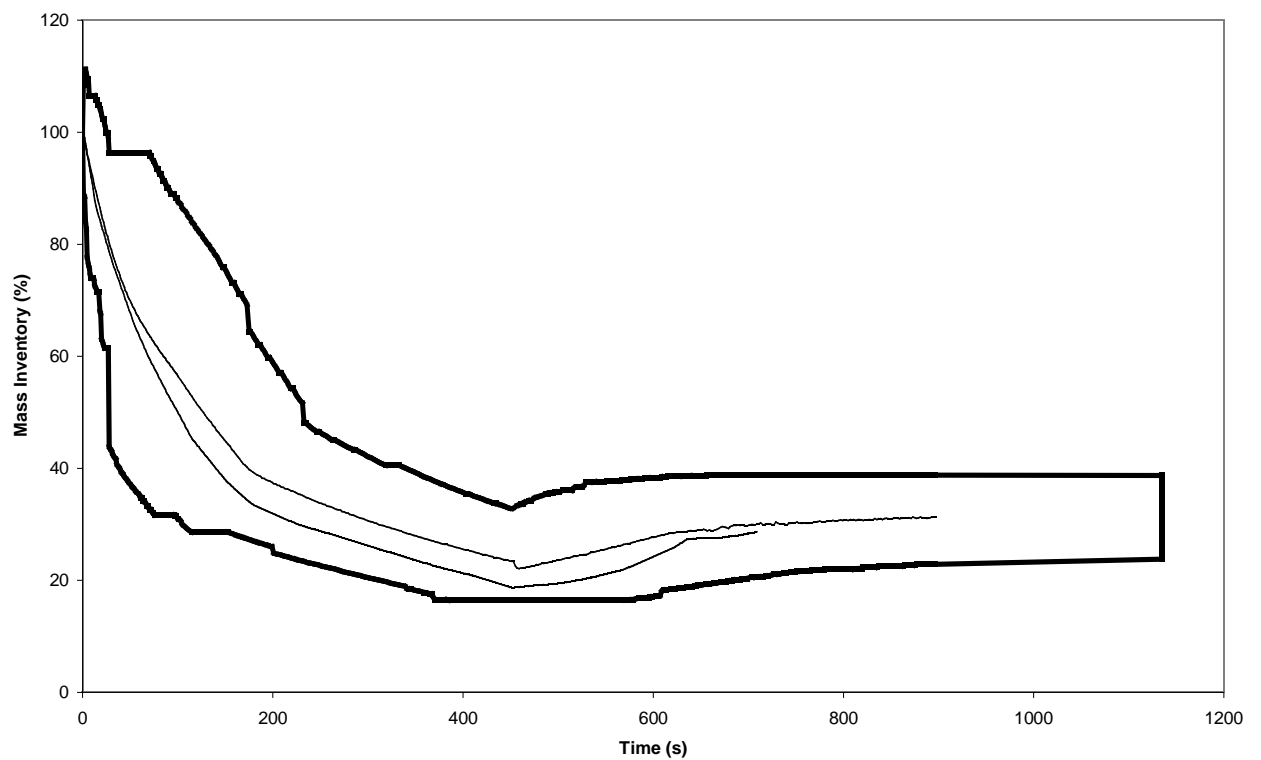


Fig. 10- CL-18 Test: primary circuit mass inventory and uncertainty band

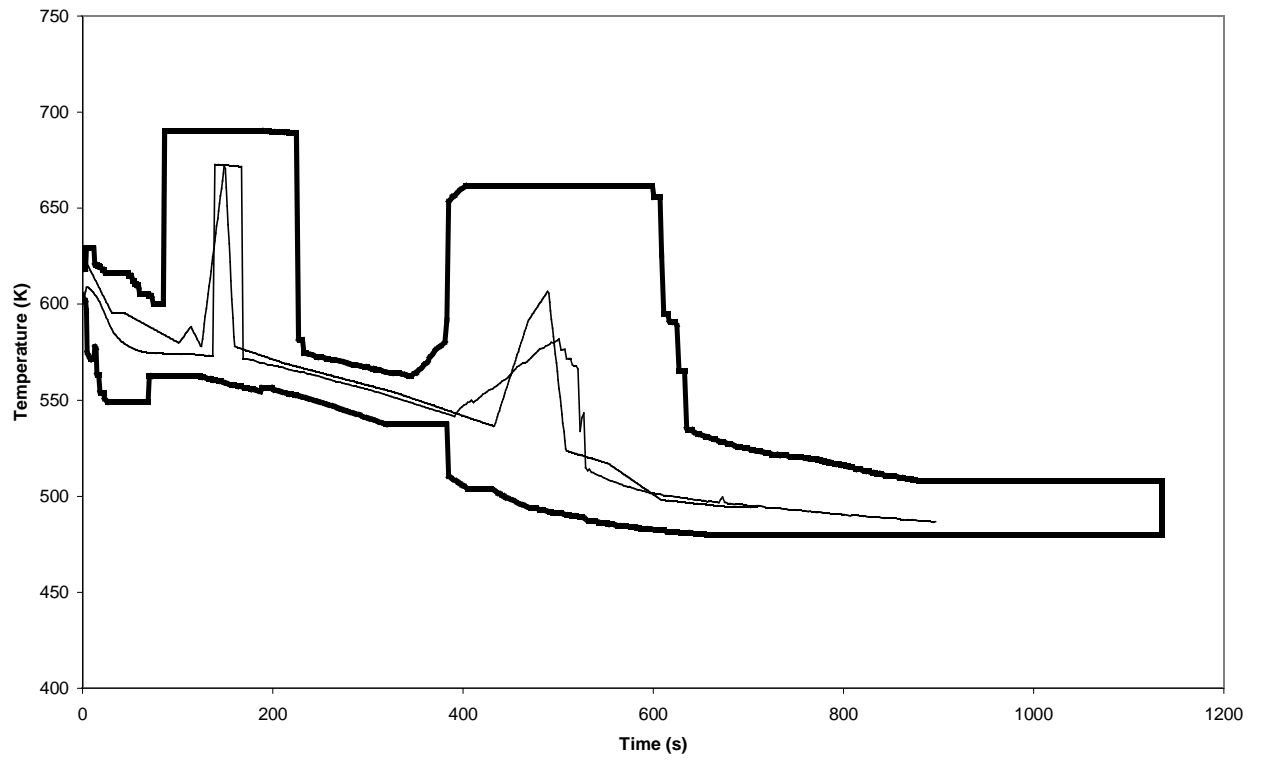


Fig. 11 – CL-18 Test: core fuel clad temperature at 2/3 core height and uncertainty band

APPENDICE 7

Le figure seguenti riportano i risultati ottenuti dalla applicazione della procedura CIAU con QUM e TUV set n.3. I grafici non hanno ovviamente alcun valore relativamente alla determinazione della incertezza, ma mostrano la capacità numerica della procedura.

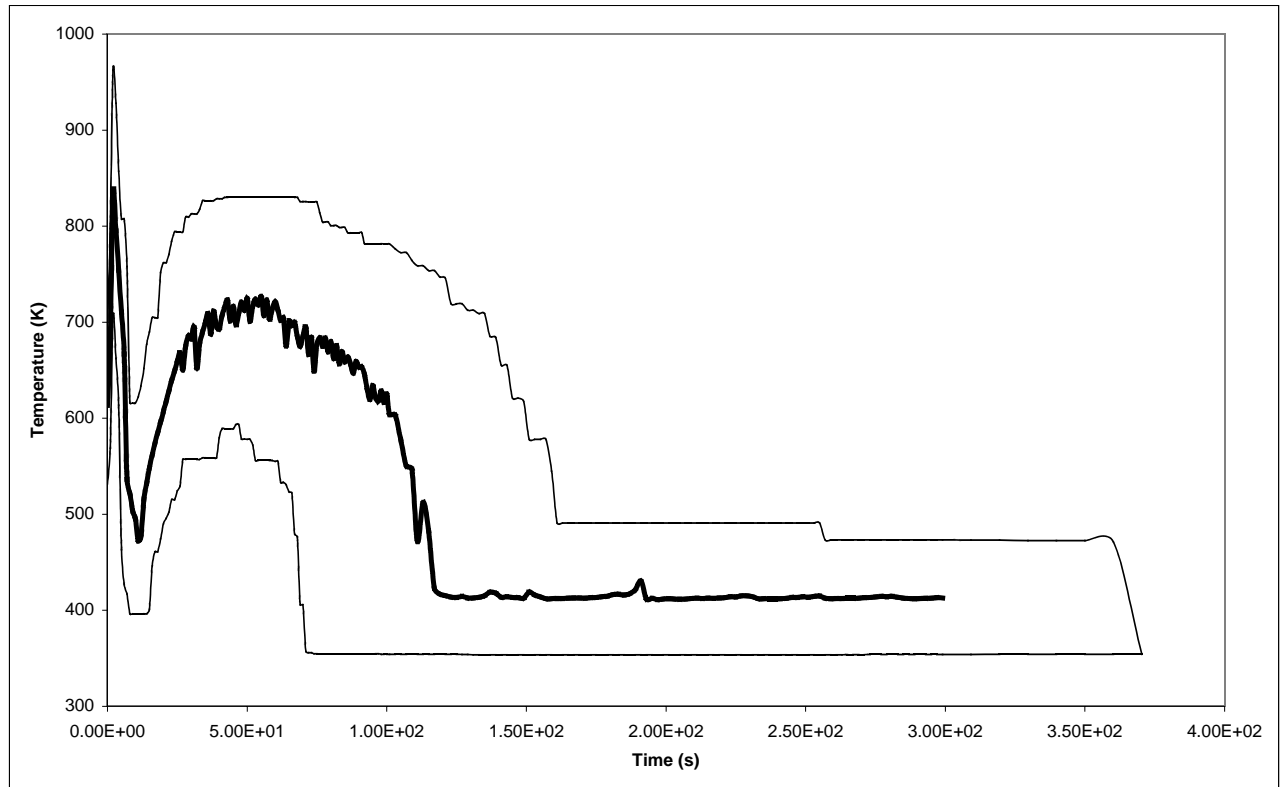


Fig. 1 – Application of the CIAU to the analysis of a large break LOCA in a two-loop PWR: rod surface temperature at 2/3 core height and related uncertainty bands.

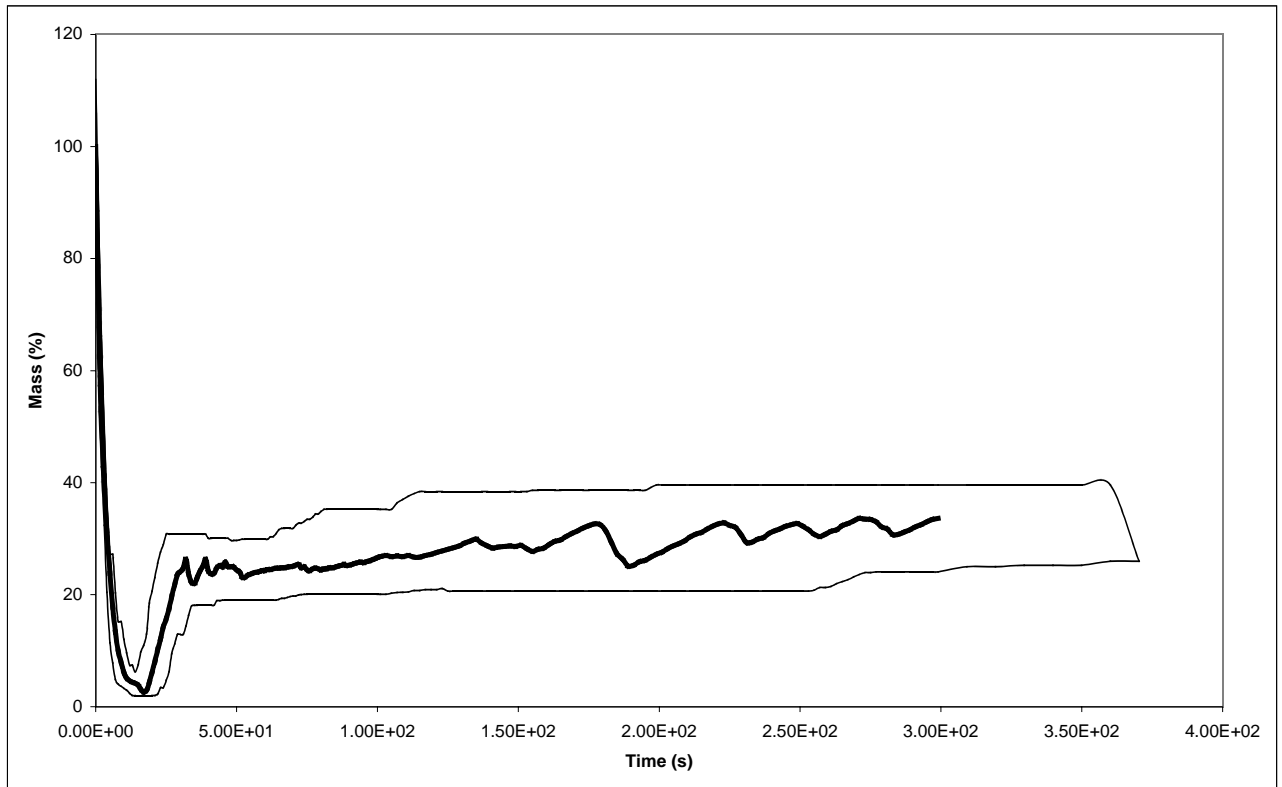


Fig. 2 – Application of the CIAU to the analysis of a large break LOCA in a two-loop PWR: mass inventory in primary loop and related uncertainty bands.

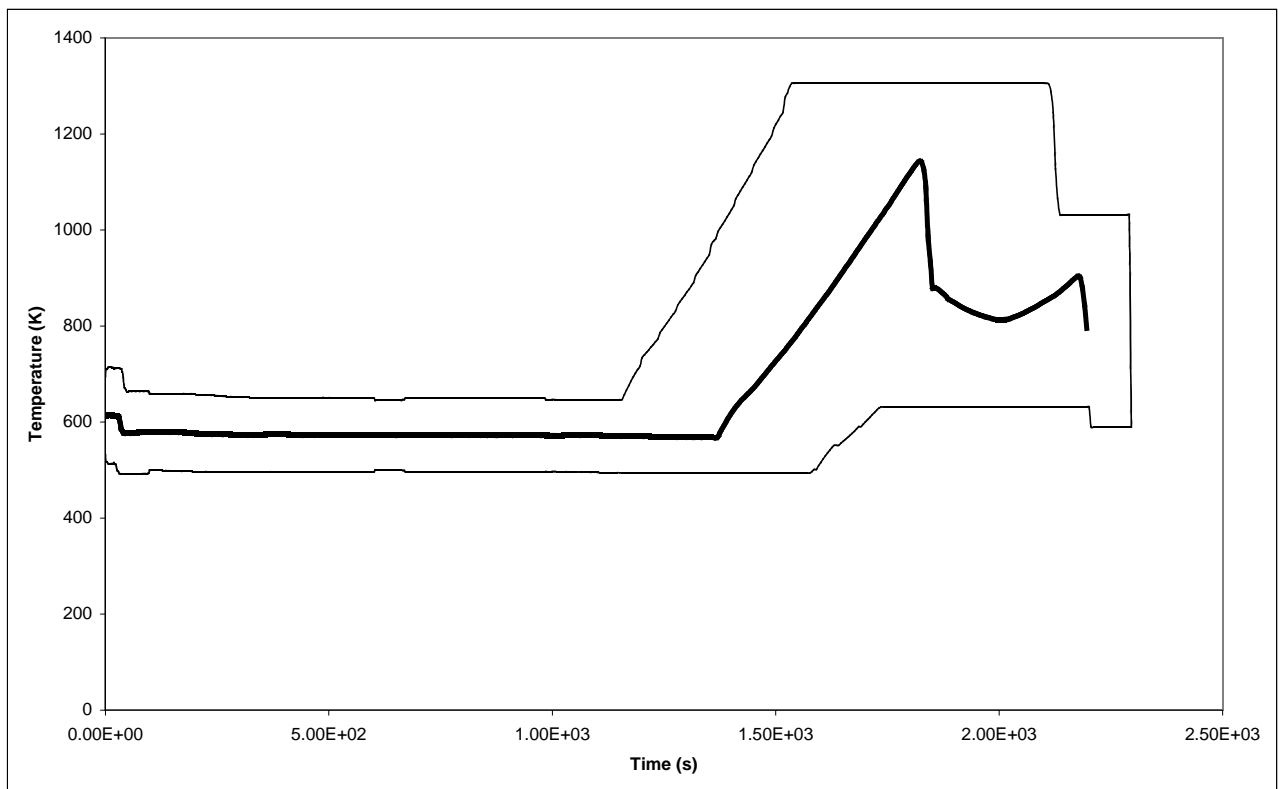


Fig. 3 – Application of the CIAU to the analysis of a small break LOCA in a two-loop PWR: rod surface temperature at 2/3 core height and related uncertainty bands.

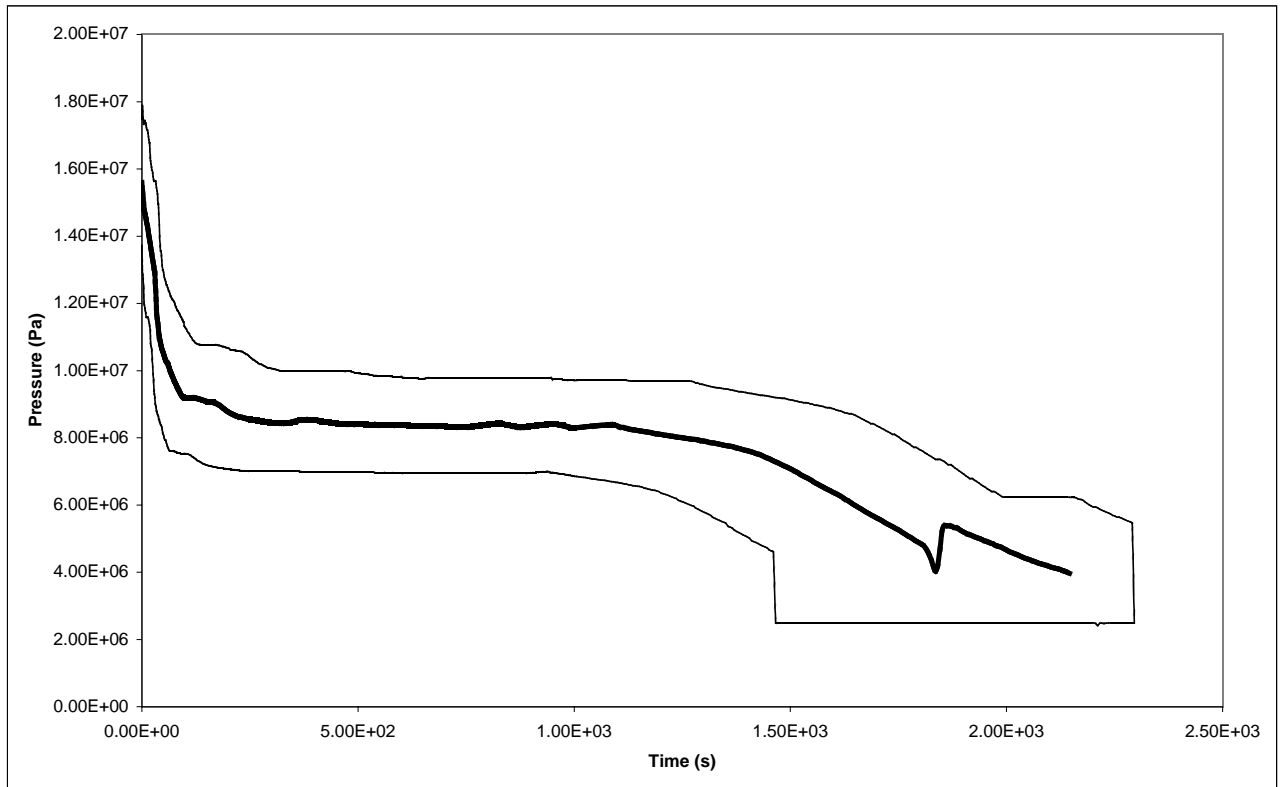


Fig. 4 – Application of the CIAU to the analysis of a small break LOCA in a two-loop PWR: upper plenum pressure and related uncertainty bands.

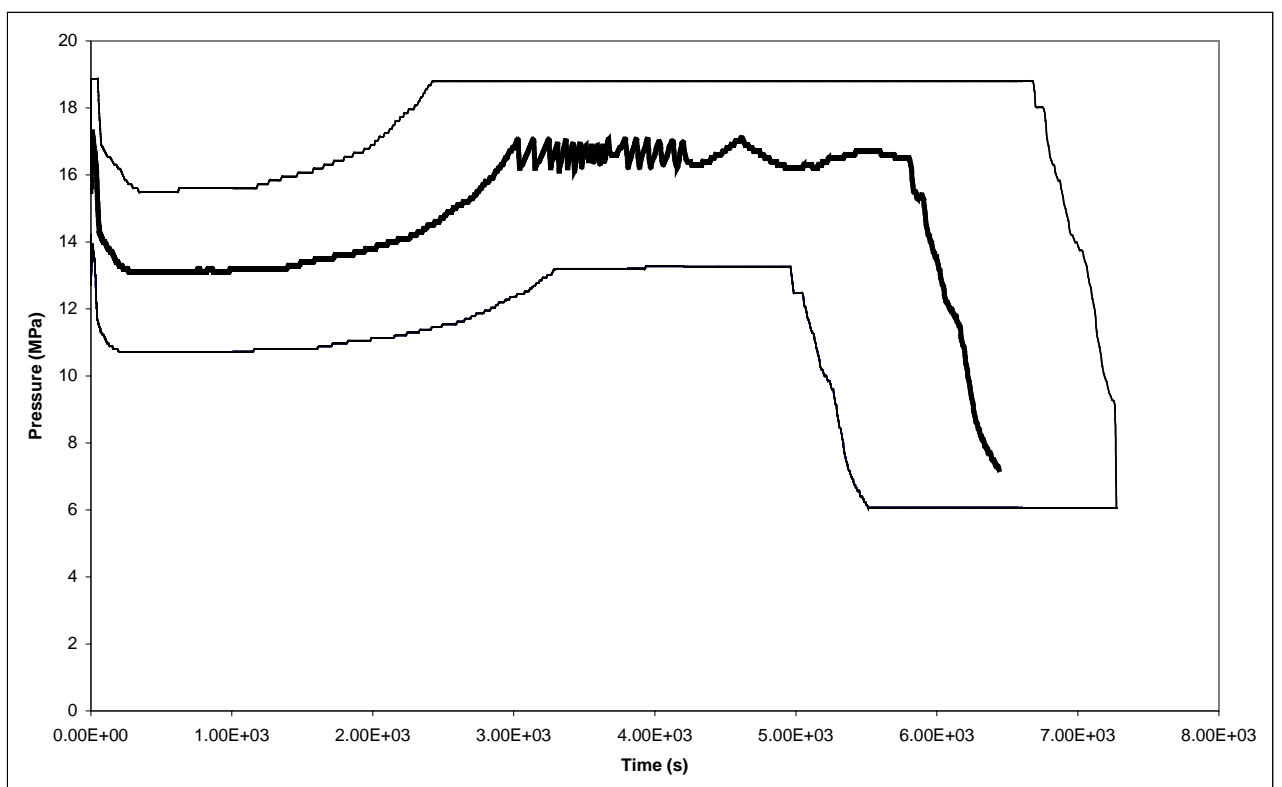


Fig. 5 – Application of the CIAU to the analysis of a LOFW in a two-loop PWR: upper plenum pressure and related uncertainty bands.