



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo e validazione del codice di calcolo per la termoidraulica di
sistema CATHARE-2 per reattori refrigerati a metallo liquido
pesante

S. Manservigi, R. Scardovelli, M. Polidori



SVILUPPO E VALIDAZIONE DEL CODICE DI CALCOLO PER LA TERMOIDRAULICA DI SISTEMA
CATHARE-2 PER REATTORI REFRIGERATI A METALLO LIQUIDO PESANTE

S. Manservigi, R. Scardovelli (Università di Bologna – DIENCA)
M. Polidori (ENEA)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in
materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA

Titolo

Sviluppo e validazione del codice di calcolo per la termoidraulica di sistema CATHARE-2 per reattori refrigerati a metallo liquido pesante.

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE:
tema di ricerca “Nuovo nucleare da fissione”
Argomenti trattati: Reattori e sistemi innovativi
Codici di calcolo

Sommario

Nel corso della seconda annualità dell'Accordo di Programma tra ENEA e il Ministero dello Sviluppo Economico, il codice CATHARE venne modificato con l’aggiunta delle proprietà termofisiche dei metalli liquidi piombo e lega eutettica piombo-bismuto e venne fornita una prima validazione su dati sperimentali provenienti da una facility coreana (HELIOS). Il presente documento, prodotto nel corso della terza annualità (Linea Progettuale LP3 obiettivo E1), rappresenta la naturale prosecuzione dell’attività di validazione e intende dare un quadro aggiornato sulle potenzialità di simulazione dei sistemi raffreddati a metallo liquido pesante del codice termoidraulico di sistema CATHARE.

Saranno illustrate le soluzioni a problematiche evidenziate in precedenza e ne saranno avanzate nuove, inoltre i progressi ottenuti saranno testati attraverso il confronto con dati sperimentali della facility NACIE (Brasimone) e HELIOS (S.Korea).

Note

Il documento è stato realizzato all’interno della collaborazione ENEA-CIRTEN (UniBo).



REPORT LP3-E1a – PAR 2008-2009

Autori: Sandro Manservigi^(*), Ruben Scardovelli^(*), Massimiliano Polidori^(**)

(*) Università di Bologna – DIENCA

(**) ENEA UTFISSM-SICIS

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE		NOME	Massimiliano Polidori	Paride Meloni	Paride Meloni
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

INDICE

INDICE	2
1. INTRODUZIONE	3
2. IL CODICE TERMOIDRAULICO DI SISTEMA CATHARE	4
2.1. Generalità	4
2.2. Struttura modulare di CATHARE	5
2.3. Soluzione fisica	9
2.4. Sistema di equazioni.....	10
2.5. Modifiche e processo di validazione di CATHARE	11
3. LA FACILITY SPERIMENTALE NACIE	13
3.1. Descrizione della facility	13
3.2. La campagna sperimentale	17
4. IL MODELLO NACIE PER CATHARE	22
4.1. Descrizione del modello	22
4.2. Valutazione delle perdite di carico	24
4.3. Test simulati	26
5. RISULTATI DEI TEST IN CIRCOLAZIONE NATURALE NACIE	26
5.1. Test con rampa di potenza di 30 minuti	27
5.2. Test con rampa di potenza di 1 minuto	31
6. ATTIVITA' RELATIVE AL BENCHMARK LACANES	34
6.1. Benchmark LACANES	34
6.2. Modifiche alla nodalizzazione.....	37
6.3. Risultati.....	39
7. CONCLUSIONI.....	42
BIBLIOGRAFIA.....	43
LISTA DELLE FIGURE	45
LISTA DELLE TABELLE	46

1. INTRODUZIONE

I sistemi nucleari innovativi raffreddati da lega eutettica piombo-bismuto (LBE) e a piombo, sono oggetto di un costante interesse sia in Europa che al di fuori, come evidenziano il gran numero di progetti nazionali ed internazionali in corso. Nel quadro degli European Framework Programme è stata messa in luce la necessità di dotarsi di un codice di sistema termoidraulico in grado di trattare i sistemi a metalli liquidi pesanti (HLM), con un particolare interesse per lo sviluppo di un codice europeo.

Nell'ambito della seconda annualità dell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, una scheda di cooperazione tra ENEA e CEA (STC Agreement) ha riguardato la modifica del codice termoidraulico di sistema CATHARE per simulare reattori raffreddati a metallo liquido pesante, piombo e lega eutettica piombo-bismuto (Lead-Bismuth Eutectic o LBE). Questo codice nato per LWR (Light Water Reactor) presentava comunque il vantaggio di essere stato modificato nel recente passato per trattare diverse tipologie di refrigeranti tra cui un metallo liquido come il sodio [1]. Un ulteriore motivo di interesse verso questo codice, è che fa parte di una piattaforma di simulazione europea (progetto NURISP e futuro NURENEXT) che comprende codici CFD (Computational Fluid Dynamics), codici termomeccanici e neutronici, che in prospettiva dovrebbe diventare lo strumento di simulazione di riferimento per gli studi di sicurezza inizialmente per i reattori LWR ed in seguito anche per i reattori innovativi di IV generazione con fluidi refrigeranti diversi. In più, il team di sviluppo del codice è in grado di fornire un adeguato supporto per il suo sviluppo futuro.

Le proprietà termofisiche implementate sotto forma di correlazioni provengono dall'Handbook di riferimento delle caratteristiche dei metalli liquidi [2]. Questa metodologia lascia spazio a futuri aggiornamenti delle stesse correlazioni, quando maggiori evidenze sperimentali saranno disponibili.

Per quanto riguarda il dettaglio delle modifiche apportate al codice e per maggiori informazioni si rimanda al riferimento [3]. All'interno della stessa annualità, l'Istituto DIENCA della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna svolse una prima fase di validazione del trattamento dei nuovi fluidi da parte di CATHARE attraverso dati sperimentali provenienti dalla facility Sudcoreana HELIOS [4]. I dati facevano parte di un benchmark internazionale realizzato dall'OECD/NEA chiamato LACANES a cui ENEA partecipava con la propria versione modificata del codice RELAP5 per metalli fluidi [5].

Nella presente relazione tecnica viene presentata l'attività svolta presso ENEA e DIENCA nell'ambito della terza annualità dell'Accordo di Programma CIRTEN e Ministero dello Sviluppo Economico per la prosecuzione del processo di validazione di CATHARE. L'attività mira a verificare la capacità e i limiti del codice nel riprodurre test integrali su impianti sperimentali. In particolare, sono stati presi in considerazione i dati sperimentali provenienti dalla facility refrigerata a piombo-bismuto NACIE situata nel Centro ENEA Brasimone, inoltre è stata allargata l'attività di validazione sui dati della facility HELIOS alle condizioni di funzionamento in circolazione naturale, che sarà oggetto della seconda fase del benchmark.

2. IL CODICE TERMOIDRAULICO DI SISTEMA CATHARE

2.1. Generalità

CATHARE (Code for Analysis of THERmalhydraulics during an Accident of Reactor and safety Evaluation) [6] è un codice che tratta la termoidraulica a livello di sistema, quindi dell'intero impianto o dei suoi macro-componenti come generatori di vapore, vessel, ecc. Il codice, nato nel 1979, è il risultato di una collaborazione tra CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), EDF (Électricité de France) e l'attuale AREVA NP (ex FRAMATOME).

I principali campi di applicazione del codice sono:

- ❖ analisi di sicurezza dei reattori PWR attraverso simulazione di transitori operativi e incidentali: start-up di un nuovo impianto, incidente di rottura di una tubazione primaria (LOCA, Loss of Coolant Accident) o di tubazioni del generatore di vapore (SGTR, Steam Generator Tube Rupture), perdita di rimozione di calore dal circuito secondario (LOHS, Loss Of Heat Sink), etc.
- ❖ supporto ai processi di licensing di reattori, in particolare è stato usato per il licensing di reattori della filiera francese fra cui l'attuale EPR (European Pressurized Reactor)
- ❖ sviluppo di simulatori della dinamica d'impianto, anche in questo caso verrà impiegato per il simulatore di EPR.
- ❖ altri impieghi, possono essere la definizione e la verifica delle procedure operative e di emergenza, gli studi riguardanti nuovi tipi di core, nuovi reattori e nuovi progetti di sistema, ma anche come supporto alle fasi di progettazione di impianti sperimentali e preparazione di campagne test.

In sintesi si può dire che, come codice a se stante, le sue applicazioni sono limitate a transitori durante i quali l'integrità delle barrette di combustibile rimane assicurata, cioè nei casi in cui non si raggiungono le condizioni del così detto "incidente severo", il cui studio è demandato a codici di calcolo specifici con cui il codice CATHARE può essere accoppiato.

La versione più recente del codice CATHARE, acquisita tramite accordi bilaterali tra ENEA e CEA, è la V2.5_2. Questa versione del codice rappresenta la prima multifluido [1], rilasciata all'interno dell'accordo, con la possibilità di simulare anche reattori raffreddati a sodio. Inoltre, grazie ad uno specifico accordo di collaborazione ENEA/CEA (STC, Specific Topic of Cooperation), dedicato alla simulazione di reattori nucleari innovativi raffreddati a metallo pesante, sono state implementate le caratteristiche dei metalli liquidi pesanti [3], piombo e lega eutettica piombo-bismuto [2]. Il codice modificato è in fase di validazione e il presente documento rappresenta un contributo a questo processo.

Per la costruzione di modelli di simulazione, l'editing e il post-processing è disponibile anche un'interfaccia grafica chiamata GUIHARE [7] che permette una visualizzazione interattiva dei risultati nel corso dei calcoli (vedi Figura 1).

Purtroppo non è ancora possibile eseguire calcoli ed effettuare il post-processing con questa interfaccia nel caso di metalli liquidi a causa del mancato riconoscimento di alcune fondamentali istruzioni introdotte con le modifiche. Nondimeno, l'interfaccia è stata utilizzata proficuamente per l'editing dei modelli di NACIE e di HELIOS.

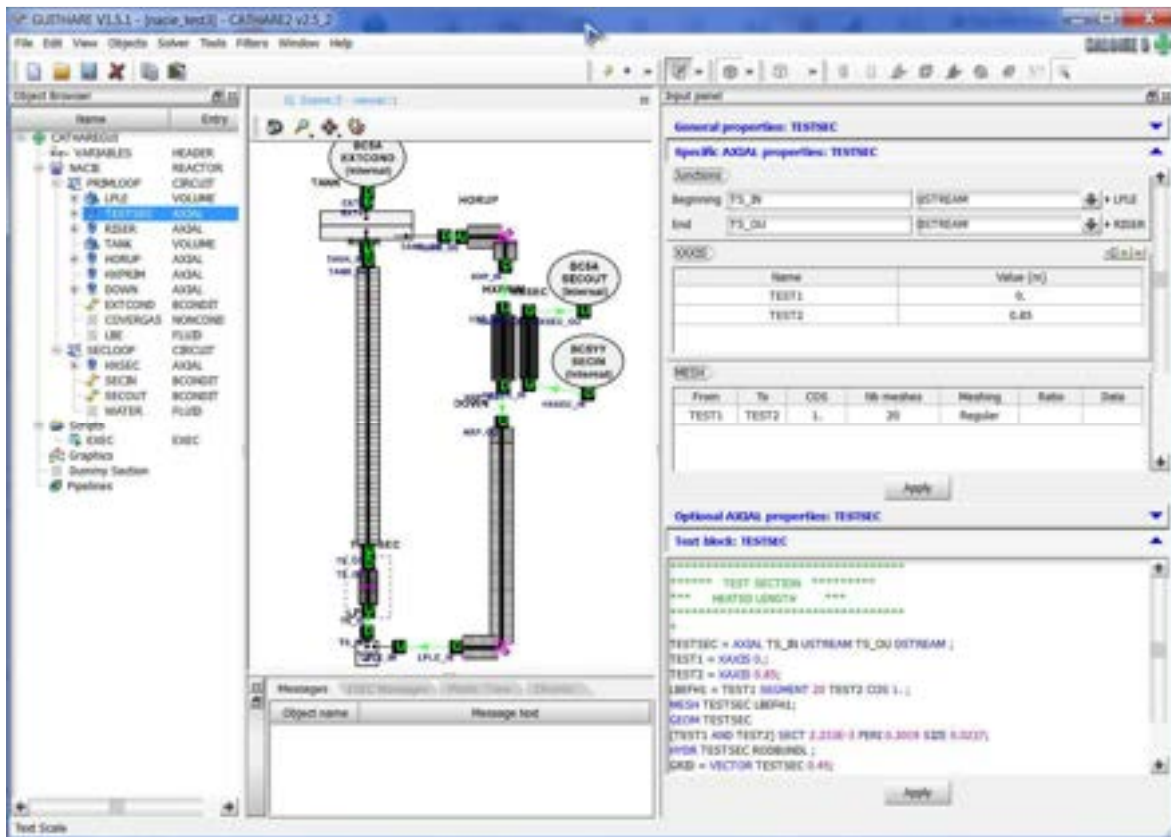


Figura 1 – GUITARE, interfaccia grafica di CATHARE.

2.2. Struttura modulare di CATHARE

Il codice CATHARE ha una struttura di tipo modulare. Ciascun modulo rappresenta un modello termoidraulico (equazioni di bilancio di massa energia e quantità di moto con le appropriate leggi di chiusura) adatto a descrivere un certo tipo di elemento: un volume zero- o tri-dimensionale, una tubazione o una condizione al contorno imposta. L'insieme di più moduli, collegati tramite giunzioni, vanno a costituire un circuito. Più circuiti accoppiati tra loro formano l'intero impianto. Esistono anche altri componenti denominati sotto-moduli e gadget. I primi hanno lo scopo di intervenire sulla termoidraulica del modulo (cioè nelle leggi di chiusura utilizzate dalle equazioni di bilancio) come, ad esempio, strutture termiche, barrette di combustibile, cinetica puntiforme, pressurizzatore. I secondi introducono specifiche caratteristiche ad un punto scalare o vettoriale come, ad esempio, uno snodo a T tra tubazioni, una rottura, una valvola, etc. [8] [6].

I moduli principali sono: Axial (1-D), Volume (0-D), Threed (3D), Boundary Condition (BC). Di seguito si fornirà una breve descrizione dei moduli utilizzati per la costruzione dei modelli di NACIE e HELIOS, tralasciando quindi il modulo Threed.

Modulo AXIAL

Il modulo Axial viene impiegato per descrivere parti di impianto in cui il flusso del refrigerante sia caratterizzato da un moto di tipo monodimensionale. Tale modulo viene

utilizzato per descrivere ad esempio la hot e cold leg, i tubi a U dei generatori di vapore ma anche i canali del core.

L'Axial può essere connesso a tutti gli altri moduli e sottomoduli, ed è caratterizzato da un modello a due fluidi (liquido/vapore) accompagnato da un massimo di quattro equazioni per il trasporto di gas non condensabili. Tale modello prevede, quindi, la soluzione di sei equazioni di bilancio (della massa, dell'energia e del momento) in sei incognite principali che verranno esposte nel seguente §2.4 e fino a quattro equazioni del trasporto per i gas incondensabili e dodici per materiali radiochimici dispersi. A tali equazioni vanno poi aggiunte un insieme di leggi di chiusura (trasferimento di massa e quantità di moto all'interfaccia, trasferimento di energia dalla parete al fluido).

In Figura 2 si riporta un esempio di modulo AXIAL con l'indicazione dei punti scalari e vettoriali in cui viene risolto il sistema di equazioni.

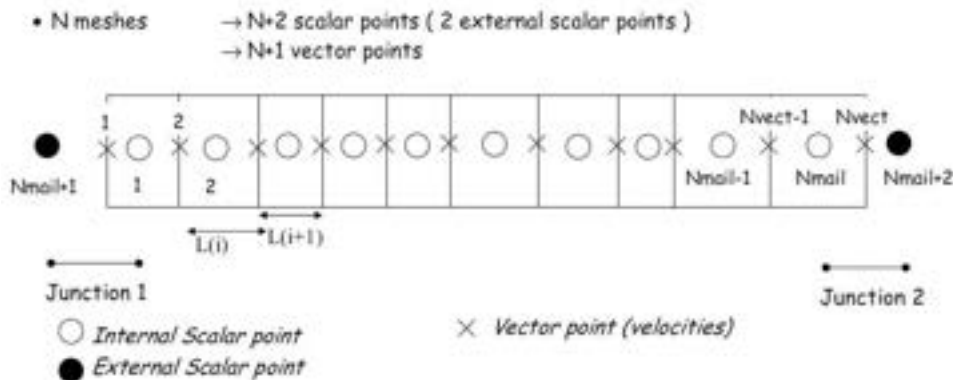


Figura 2 – modulo 1-D

Il modulo viene suddiviso in un certo numero di mesh le cui dimensioni non dovrebbero eccedere i 25cm e variabile a seconda del fenomeno fisico che si desidera rappresentare con la regola che più il fenomeno è rapido, come una rottura, più la mesh dovrebbe essere ridotta. All'interno di ciascuna mesh la soluzione delle equazioni fornisce pressione, entalpie e grado di vuoto in corrispondenza dei nodi scalari, e le velocità in corrispondenza dei nodi vettoriali. In più, alle estremità del modulo viene risolto il sistema di equazioni alla giunzione tra un nodo scalare esterno, appartenente al modulo limitrofo, il nodo scalare all'estremità del modulo stesso e il nodo vettoriale tra i due.

Modulo VOLUME

Il modulo Volume zero-dimensionale è un modulo a due nodi e due sottovolumi utilizzato per descrivere volumi di fluido di grande capacità, ma non necessariamente. A differenza del modulo assiale che può avere solo due connessioni, il volume fornisce la possibilità di considerare molteplici connessioni ad altri moduli. Può essere impiegato per simulare un pressurizzatore, l'accumulatore, la cupola del generatore di vapore ed il lower e l'upper plenum di un reattore. Il modulo volume è dotato di speciali correlazioni per determinare il livello, stratificazioni totali o parziali e fenomeni di separazione di fase alle giunzioni. In

Figura 3 si riporta un esempio di tale modulo, dove Z_c indica il livello di separazione tra le fasi considerando anche la fase vapore dispersa all'interno del liquido.

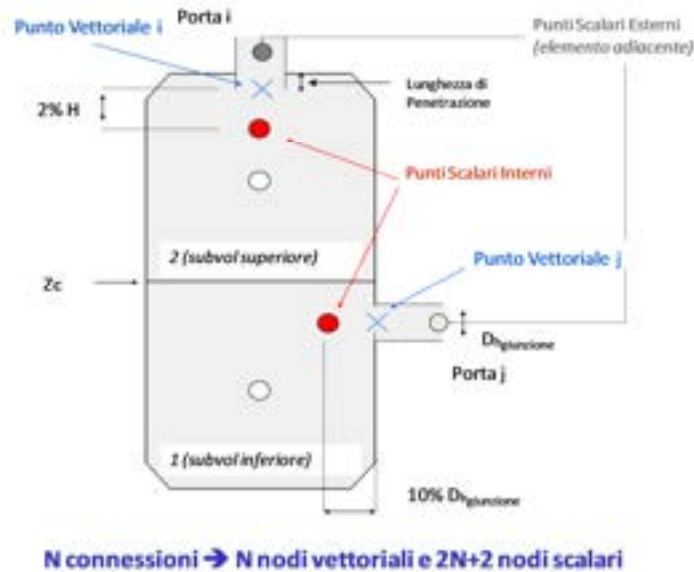


Figura 3 – modulo 0-D

Si assume che all'interno del volume 0-D le velocità siano trascurabili rispetto a quelle che si hanno alle giunzioni e che le forze d'inerzia possano essere considerate trascurabili rispetto a quelle di gravità (semplificando notevolmente l'equazione di bilancio della quantità di moto). Al volume possono connettersi un numero N di rami con diverse orientazioni.

In ciascuno dei due nodi interni, uno per ogni sottovolume, vengono scritte le equazioni di conservazione della massa e dell'energia, un'equazione per la presenza di non condensabili e una equazione idrostatica. Equazioni di chiusura sono risolte per considerare trasferimenti di massa ed energia tra le fasi.

Modulo BOUNDARY CONDITION

Il modulo Boundary Condition serve per imporre determinate condizioni al contorno del sistema. Questi possono essere collegati alle giunzioni di ogni modulo idraulico: pipe, volumi ed elementi 3-D.

Tali BC vengono utilizzate per imporre una o più condizioni idrauliche (pressione, velocità, portata per ogni fase, frazione di vuoto, etc.). A seconda del tipo di condizione imposta, le BC possono essere definite all'ingresso o all'uscita di un elemento. Queste si distinguono in BC Inlet, Outlet, o Mixed.

Le BC del tipo Inlet (es. imposizione di una portata entrante) non permettono l'impiego dei flussi inversi. Le variabili di ingresso sono definite rispetto al tempo.

Le BC del tipo Outlet (es. imposizione della pressione esterna in una rottura), richiedono l'impiego di un flusso uscente dall'elemento adiacente.

Le BC del tipo Mixed possono essere usate sia come condizioni inlet o outlet. In esse sono permessi flussi inversi di una o entrambe le fasi. Tutti i parametri imposti possono essere forniti in funzione del tempo.

Strutture termiche

La descrizione di ogni singolo componente dell'impianto deve comprendere un'accurata descrizione geometrica delle pareti che lo delimitano e delle sue strutture interne, affinché si possa valutare correttamente l'accoppiamento termico del fluido con le varie strutture e di queste ultime con l'ambiente circostante (es. perdite termiche).

Il codice CATHARE prevede l'impiego di tre diversi tipi di strutture termiche: pareti mono-multi-strato (WALL), scambiatori di calore (EXCHANGER) e barrette di combustibile. In particolare l'EXCHANGER si impiega per simulare lo scambio termico tra circuiti idraulici distinti.

Una struttura termica può essere associata a tutti i moduli eccetto le BC. Le pareti possono essere descritte sia in geometria piana che cilindrica, sia interne (es. rod-bundle) che esterne (es. tubi). I dati geometrici della parete necessari per effettuare i calcoli termici sono: lo spessore della parete, il perimetro bagnato o scaldante e quindi l'area di scambio con il fluido.

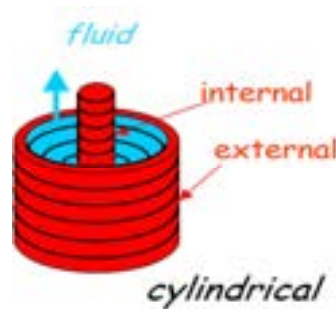


Figura 4 – Accoppiamento tra pareti in geometria cilindrica e fluido.

L'equazione che descrive il fenomeno della conduzione di calore attraverso la parete, è risolta in regime prevalentemente monodimensionale, cioè si suppone che il calore fluisca nella sola direzione radiale (perpendicolare alla direzione di flusso del fluido).

Ciascuna parete può avere una generazione interna di calore che può essere modellata tramite l'impiego di direttive SOURCE/POWER, mentre le perdite di calore verso l'esterno sono modellate tramite l'imposizione di flussi termici o l'utilizzo della legge di Fourier.

Varie

Inoltre, per affinare e completare la modellazione del circuito, a ciascun modulo principale possono essere connessi vari sottomoduli e gadget. Tra i principali sottomoduli, che possono essere connessi all'intero modulo, si possono citare quelli per il reflooding, la cinetica puntiforme, il modello termomeccanico della barretta di combustibile e il pressurizzatore. Tra i principali gadget, che possono essere connessi ad un solo punto (scalare o vettoriale) di un modulo, la giunzione a T, le sorgenti/pozzi di massa, valvole e pompe zero-dimensionali.

Tutti insieme, moduli, sottomoduli e gadget forniscono la necessaria flessibilità all'utente per poter simulare circuiti ed impianti di qualsivoglia complessità.

2.3. Soluzione fisica

Per quanto riguarda la soluzione idraulica, in tutti i moduli presenti all'interno del codice vengono risolte le equazioni di bilancio a due fluidi, acqua e vapore, in condizioni di non-equilibrio sia termico che meccanico e un massimo di quattro gas non condensabili. Anche nell'eventualità sia presente una sola fase, l'altra viene considerata come residuale ma comunque presente. Il codice permette di utilizzare in modo esplicito solo due regimi di transizione e cioè la transizione fra flusso stratificato e non, e transizione fra flusso anulare (annular flow) e flusso a gocce (droplet flow).

Queste due transizioni descrivono il passaggio da flusso separato a flusso disperso. Inoltre il codice tiene conto dei fenomeni di flusso co-corrente e contro-corrente grazie all'applicazione del CCFL.

In Figura 5 viene riportata la mappa dei regimi di moto implementata in CATHARE2-V2.5.

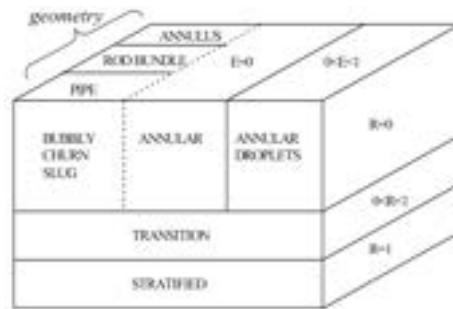


Figura 5 – Mappa dei regimi di moto in CATHARE

In relazione alla soluzione termica, il codice permette di simulare il trasferimento di calore tra fluido e superfici solide, siano esse semplici pareti o barrette di combustibile, prendendo in considerazione tutti i possibili processi di trasferimento del calore. Per citarne alcuni, la convezione forzata e naturale di entrambe le fasi, ebollizione-condensazione, flusso termico critico, etc. Inoltre esso consente di tenere conto dei fenomeni di trasferimento sia di calore che di massa all'interfaccia di separazione delle fasi

In Figura 6 viene riportata una rappresentazione dei termini di trasferimento della massa e dell'energia implementata in CATHARE2-V2.5.

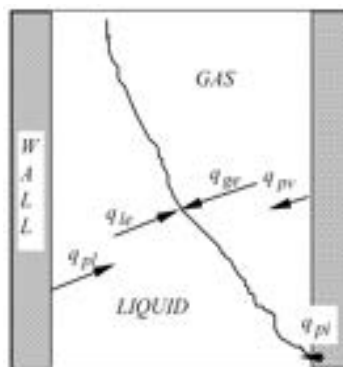


Figura 6 – Termini di trasferimento della massa e dell'energia.

2.4. Sistema di equazioni

CATHARE è un codice di calcolo che tratta la termoidraulica monodimensionale del fluido termovettore tramite un modello a due fluidi (liquido e vapore) e 6 equazioni di bilancio (massa, quantità di moto ed energia) per le 6 principali variabili: entalpia di liquido e gas (Hl, Hg), velocità di liquido e gas (Vl, Vg), pressione (P) e grado di vuoto (α). Inoltre sono incluse le equazioni di trasporto per considerare fino a quattro tipi di gas incondensabili (xi) e fino a dodici componenti radio-chimici.

I metodi numerici utilizzati per la soluzione di tali equazioni sono basati su volumi finiti al primo ordine e differenze finite per la discretizzazione spaziale. La discretizzazione temporale è completamente implicita per i moduli 0-D e 1-D e di tipo semi-implicito per i moduli 3-D. Il sistema non-lineare di equazioni differenziali viene risolto mediante il metodo iterativo di Newton-Raphson delle tangenti, che si è dimostrato essere particolarmente efficiente.

Le equazioni seguenti riportano i principi di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia valide per la fase gassosa. Equazioni del tutto simili sono risolte anche per la fase liquida in tutti i moduli.

Massa
$$\frac{\partial}{\partial t} (A\alpha\rho_G) + \frac{\partial}{\partial z} (A\alpha\rho_G V_G) = +A\Gamma + \sum_{i=1}^4 S_i + S_v$$

Momento
$$A\alpha\rho_G \left[\frac{\partial V_G}{\partial t} + V_G \frac{\partial V_G}{\partial z} \right] + A\alpha \frac{\partial P}{\partial z} + A\rho_l \frac{\partial \alpha}{\partial z} + A\beta\alpha(1-\alpha)\rho_m \left[\frac{\partial V_G}{\partial t} - \frac{\partial V_L}{\partial t} + V_G \frac{\partial V_G}{\partial z} - V_L \frac{\partial V_L}{\partial z} \right]$$

$$= A\Gamma(W_i - V_G) - A\tau_i - \chi_f C_s \frac{\rho_v}{2} V_G |V_G| + A\alpha\rho_G g_z + \frac{R(1-\alpha)}{4} p_i \frac{\partial A}{\partial z} + SM_G$$

Energia
$$A \frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha\rho_G \left[H_G + \frac{V_G^2}{2} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A\alpha\rho_G V_G \left[H_G + \frac{V_G^2}{2} \right] \right) - A\alpha \frac{\partial P}{\partial t}$$

$$= +Aq_{ge} + \chi_c q_{pg} + A\Gamma \left[H_v + \frac{W_i^2}{2} \right] + A\alpha\rho_G V_G g_z + SE_G$$

Le 6 equazioni sono derivate da equazioni istantanee locali, usando alcune semplificazioni attraverso assunzioni fisiche e utilizzando procedure mediate nel tempo e nello spazio.

Le proprietà scalari del fluido, pressione, entalpia, densità e frazione di vuoto, rappresentative di condizioni medie del fluido, sono calcolate nel baricentro delle maglie (punto scalare). Le proprietà vettoriali del fluido, le velocità, sono valutate in punti vettoriali interni (punti fra due meshes di un elemento assiale) o alle giunzioni tra due moduli contigui. Esempi di localizzazione dei punti scalari e vettoriali nella discretizzazione spaziale 1-D, sono riportati in Figura 2 e Figura 3.

La soluzione del sistema di equazioni differenziali implementate nel codice CATHARE richiede la scrittura di equazioni di chiusura che tengano conto dei fenomeni di scambio termico, di massa e di quantità di moto tra una fase e l'altra e tra il fluido e le pareti (correlazioni, etc.).

2.5. Modifiche e processo di validazione di CATHARE

Come già menzionato, le proprietà termofisiche di piombo e piombo-bismuto implementate in CATHARE provengono da un Handbook OECD/NEA [2] in cui sono state raccolte, nel recente passato, le conoscenze allo stato dell'arte per tutto ciò che riguarda i sistemi nucleari raffreddati a metallo liquido.


Le modifiche apportate al codice sono state ampiamente discusse in [3] e nello stesso riferimento è stata effettuata una prima valutazione delle nuove funzionalità attraverso il confronto tra risultati ottenuti con il codice numerico nello svolgimento di semplici test risolvibili analiticamente.

L'inizio di una vera e propria fase di validazione è stata discussa in [4], dove i dati provenienti da una campagna sperimentale sull'impianto a piombo-bismuto HELIOS (South Korea) sono stati impiegati per verificare le capacità di CATHARE di simulare il comportamento integrale della facility in condizioni stazionarie. I dati erano stati forniti nell'ambito della partecipazione ENEA al benchmark internazionale LACANES con una versione del codice RELAP5 anch'essa modificata per metalli liquidi pesanti. L'attività aveva sostanzialmente riguardato la valutazione delle perdite di carico lungo il circuito in regime di circolazione forzata in condizioni isoterme stazionarie ad alta (13.57 kg/s) e bassa portata (3.27 kg/s). Alcune simulazioni preliminari in regime di circolazione naturale erano state effettuate ma i dati sperimentali non erano ancora disponibili.

I risultati ottenuti in circolazione forzata con CATHARE erano stati confrontati sia con i dati sperimentali che con i risultati di RELAP5 ottenendo ottimi risultati. Inoltre, erano state fatte valutazioni sui risultati in circolazione naturale, attraverso il confronto diretto codice a codice, evidenziando una generale sovrastima delle portate calcolate da CATHARE rispetto quelle di RELAP5.

CATHARE evidenziava un forte limite nel trattamento dei nuovi fluidi e cioè l'impossibilità di simulare volumi con peli liberi. Il problema derivava dal fatto che durante l'inizializzazione del calcolo la temperatura della fase gassosa all'interno di un volume veniva settata alla temperatura di saturazione, procedura ottimale nella simulazione di reattori ad acqua leggera, in particolare per il volume di un pressurizzatore, ma nient'affatto nel caso di metalli liquidi. Lo stesso problema affliggeva anche il trattamento del sodio liquido, ma con temperature di saturazione che in questo caso non raggiungevano valori al di sopra dei 1000°C, il calcolo di inizializzazione poteva proseguire e la temperatura della fase gassosa veniva riportata a valori fisici attraverso un transitorio. Nel passaggio al trattamento dei metalli pesanti, con temperature di saturazione dell'ordine di 1700-2000°C, il calcolo si interrompeva senza raggiungere mai la convergenza.

Recenti sviluppi introdotti con il supporto del team CEA di sviluppo del codice hanno in parte risolto il problema che sembrava derivare da un calcolo errato di alcune variabili termodinamiche legate alla frazione di incondensabile, da imporre necessariamente nella parte superiore del volume con pelo libero. Il calore latente di evaporazione era stato imposto costante a 854 kJ/kg, come da Handbook, a pressione di 0.1 MPa nel caso dell'LBE. Il problema è stato risolto imponendo una leggera dipendenza funzionale rispetto alla temperatura al calore latente (L_{ev}). Nel caso del piombo-bismuto:

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 017	0	L	12	46

$$L_{ev} = 8.54e5 + 1. \cdot T \text{ J/kg}$$

Il problema è stato risolto solo parzialmente perché la temperatura della fase gassosa continua ad assumere valori elevati e non in equilibrio con la fase liquida, ad ogni modo ora è possibile effettuare simulazioni con un pelo libero già formato in fase iniziale. I test hanno evidenziato che la differenza di temperatura tra le fasi ha effetti non rilevabili.

3. LA FACILITY SPERIMENTALE NACIE

Nell'ambito del progetto europeo IP-EUROTRANS all'interno del 6° Programma Quadro, i laboratori di ENEA-Brasimone si assunsero l'impegno di eseguire un esperimento integrale con lo scopo di studiare la circolazione del fluido primario all'interno di un reattore nucleare raffreddato a metallo liquido di tipo a piscina, quindi a supporto della ricerca sia di sistemi critici LFR (Lead Fast Reactor) che sottocritici di tipo ADS (Accelerator Driven System)

L'attività sperimentale, denominata ICE (Integral Circulation Experiment), propose alcune modifiche da apportare al circuito CIRCE (CIRColazione Eutettico), in particolare con l'introduzione di una nuova sezione di prova [9]. Dal momento che la nuova sorgente di calore progettata per le attività di ICE, dal nome FPS (Fuel Simulator Pin), si basava sull'utilizzo di riscaldatori elettrici prototipici, si rese necessaria una fase di caratterizzazione preliminare delle loro prestazioni termiche ed elettriche al fine di sostenere il processo autorizzativo di attuazione delle modifiche in CIRCE.

Per affrontare questa attività preliminare ma di primaria importanza, è stato progettato e costruito presso lo stesso Centro Ricerche ENEA del Brasimone un nuovo impianto raffreddato da piombo-bismuto chiamato NACIE (NATural Circolation Experiment). Tra gli altri scopi per cui è stato costruito, possiamo annoverare quello di caratterizzare i regimi di circolazione naturale e di circolazione assistita (gas enhanced circulation) all'interno di un loop HLM, qualificare le procedure di prova e i componenti, ottenere dati sperimentali sullo scambio termico attraverso un bundle in circolazione naturale, ecc.

Sul loop NACIE è possibile eseguire attività sperimentali volte allo studio dei fenomeni di convezione influenzati dalla spinta idrostatica. La convezione monofase mista è un problema comune riscontrato in tutti i sistemi nucleari innovativi. Il trasferimento di calore dal combustibile al liquido di raffreddamento è fortemente influenzato dalla spinta idrostatica, che può portare a comportamenti indesiderati del flusso e del trasferimento di calore, come il deterioramento della stabilità del flusso e del trasferimento di calore.

3.1. Descrizione della facility

NACIE è un semplice circuito rettangolare costituito essenzialmente da due tubi verticali (OD 2.5"), che costituiscono il riser e il downcomer, collegati per mezzo di due rami orizzontali (OD 2.5"). Il materiale adottato è acciaio inox (AISI 304) e l'inventario totale di LBE è di circa 1000 kg. La temperatura di progetto e la pressione sono 550 °C e 10 bar, rispettivamente. Il layout generale del loop è schematizzato in Figura 7, mentre i principali dati geometrici che caratterizzano l'impianto NACIE sono riassunti nella Tabella 1.

Nella parte inferiore del riser si trova la sorgente di calore installata tramite una flangia, mentre nella parte superiore del downcomer è collegato uno scambiatore di calore. La differenza di livello tra il centro della sorgente termica e quella dello scambiatore di calore ($H = 4,5$ m) è stata fissata per avere una forza motrice disponibile durante il funzionamento in regime di circolazione assistita di circa 400 mbar con una frazione di vuoto media nel riser di circa il 10%. Il loop è completato da un vaso di espansione installato sulla parte superiore del circuito, coassialmente al riser.

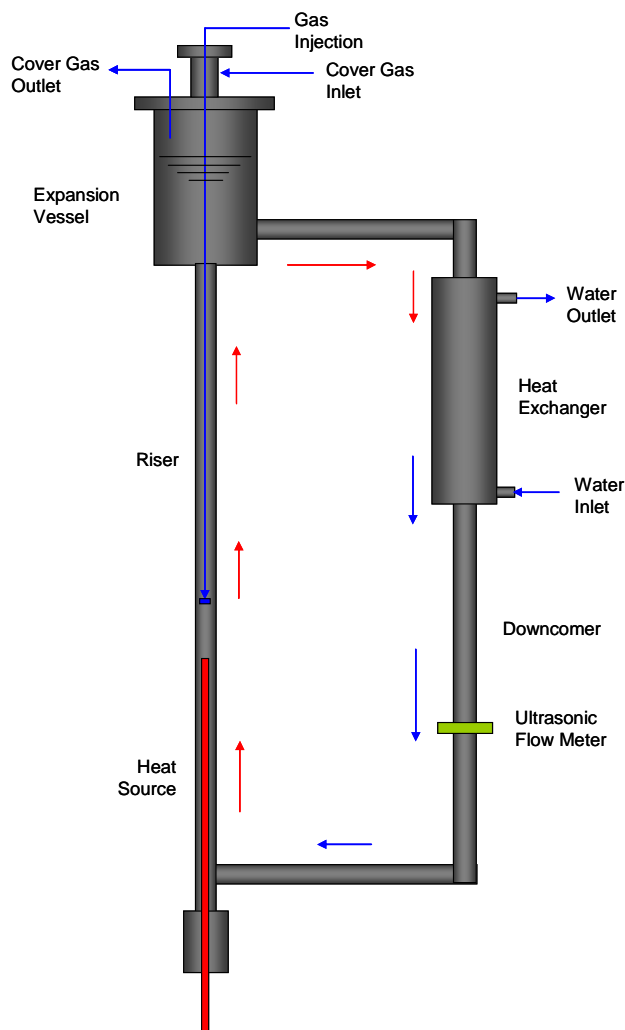


Figura 7 – Configurazione loop NACIE.

Tabella 1 – Principali dati geometrici di NACIE.

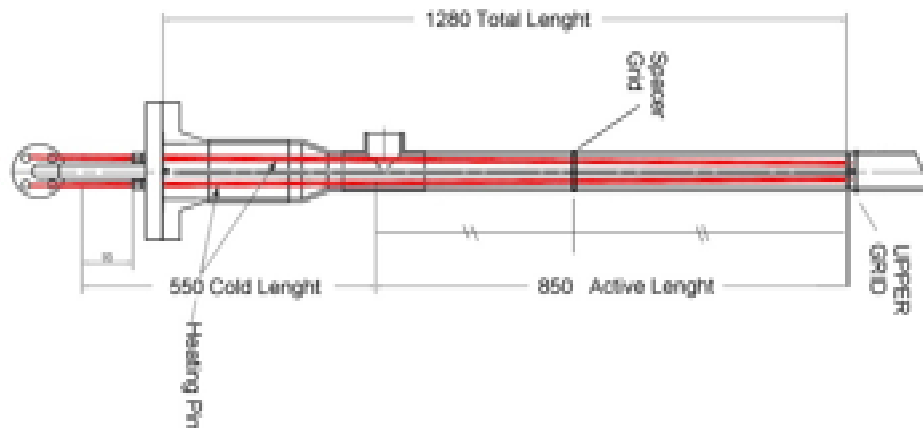
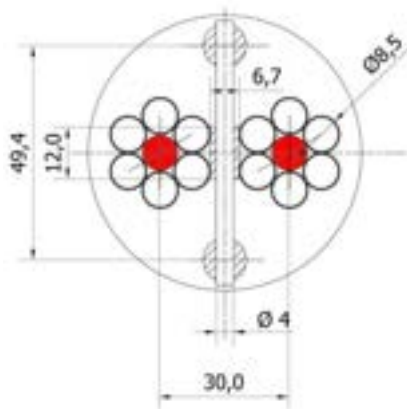
Altezza Totale	9231	[mm]
Larghezza	1000	[mm]
Diametro Interno Tubi	62.7	[mm]
Spessore Tubi	5.16	[mm]
Altezza Vaso di Espansione	765	[mm]
Diametro Vaso di Espansione	254.5	[mm]
Lunghezza Scambiatore di Calore	1500	[mm]
Lunghezza Attiva Sorgente di Calore	850	[mm]

Il circuito NACIE è predisposto per ospitare diversi tipi di bundle caratterizzate da geometrie, flussi di calore e densità di potenza diverse. Il bundle impiegato nella presente campagna sperimentale si compone di due pin ad alte prestazioni termiche e due dummy con funzione di sostegno meccanico dello stesso bundle. Le caratteristiche delle barre attive sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2 – Caratteristiche delle barre scaldanti di NACIE.

Numero di pin attivi	2	
Diametro	8.2	[mm]
Lunghezza Attiva	850	[mm]
Lunghezza Totale	1400	[mm]
Massimo Flusso Termico	100	[W/cm ²]
Distribuzione di Flusso Assiale	Uniform	
Massima Potenza Termica (cad)	22	[kW]

La potenza totale installata è circa 45 kW, anche durante i test solo una risulta attiva a causa del limite massimo di potenza dello scambiatore di calore adottato. In Figura 8 viene riportato uno schema della sezione scaldante. Nella sezione mediana e terminale della lunghezza attiva sono state installate due griglie spaziatrici, più una supplementare poco al di sopra. Queste hanno il compito di permettere l'espansione assiale delle barre, mantenendo inalterata l'area di passaggio del canale che altrimenti potrebbe essere alterata dall'incurvamento delle stesse barre.


Figura 8 – Schema della regione scaldante di NACIE.

Figura 9 – Sezione orizzontale e foto del bundle di NACIE.

In Figura 9 è riportato uno schema della griglia distanziatrice e una foto del fascio di barre che mostra la griglia distanziatrice, i pin attivi e dummy, così come le termocoppie installate vicino alla griglia e sulla superficie della barra.

Per ogni pin attivo sono state installate sette termocoppie in diverse posizioni al fine di monitorare l'andamento della temperatura di clad durante le prove. In Tabella 3 sono riportate l'altezza e la posizione azimutale a partire dal fondo della lunghezza attiva delle termocoppie installate su ciascuna delle pin attive. Di seguito le abbreviazioni TC1X e TC2X saranno utilizzate per indicare le termocoppie in posizione X- sul pin attivo n. 1 e n.2 rispettivamente. Come si può notare, le TC installate permettono di fare valutazioni sul fattore di punto caldo delle pin dovute alla presenza della griglia distanziatrice, e anche di determinare il profilo assiale di temperatura lungo il pin attivo.

Tabella 3 – Altezza e posizione azimutale delle termocoppie installate nella regione attiva.

TC	Active Pin n. 1	Active Pin n. 2
1	+50 mm (0°)	+50 mm (0°)
2	+410 mm (0°)	+410 mm (0°)
3	+425 mm (0°)	+425 mm (0°)
4	+425 mm (120°)	+425 mm (120°)
5	+425 mm (240°)	+425 mm (240°)
6	+440 mm (0°)	+440 mm (0°)
7	+800 mm (0°)	+800 mm (0°)

Per favorire la circolazione di LBE nel loop è stata adottata una tecnica di gas lifting [10] [11] [12] [13]. Un tubo con diametro interno di 10 mm è ospitato all'interno del riser e collegato attraverso la flangia del vaso di espansione superiore al sistema di alimentazione di argon. All'altra estremità del tubo è montato l'ugello di iniezione al di sopra della sezione scaldante. Il gas viene iniettato nel riser attraverso l'ugello per aumentare la portata di metallo liquido. Nel vaso di espansione la separazione tra le fasi, in questo modo si evita la possibilità che la miscela delle due fasi fluisca attraverso l'intero circuito che potrebbe causare il danneggiamento delle barre scaldanti. Il sistema di iniezione del gas è in grado di fornire una portata di Argon compreso tra 1 ÷ 75 NI/min con una pressione di iniezione massima di 5,5 bar.

Lo scambiatore di calore progettato per il circuito NACIE è del tipo "tubo in tubo" con funzionamento in controcorrente. Il fluido secondario è acqua a bassa pressione (circa 1,5 bar) in grado di scambiare una potenza termica non superiore a 30 kW. Lo scambiatore è costituito da tre tubi coassiali con diverse dimensioni, le cui caratteristiche sono riportate nella Tabella 4. Il piombo-bismuto scorre verso il basso nel tubo interno, mentre l'acqua scorre verso l'alto, nella regione anulare più esterna (vedi Figura 10).

La regione anulare creata tra il tubo interno e quello centrale è riempita da polvere di acciaio inox allo scopo di attenuare le sollecitazioni termiche sulle tubazioni a causa dell'espansione differenziale termico lungo l'asse durante l'operazione, garantendo il flusso termico verso l'acqua.

I tre tubi sono saldati tra loro su un piatto nella parte inferiore, mentre nella parte superiore solo il tubo centrale ed esterno sono vincolati tra loro. In questo modo il tubo interno non ha vincoli assiali con il lato secondario dello scambiatore.

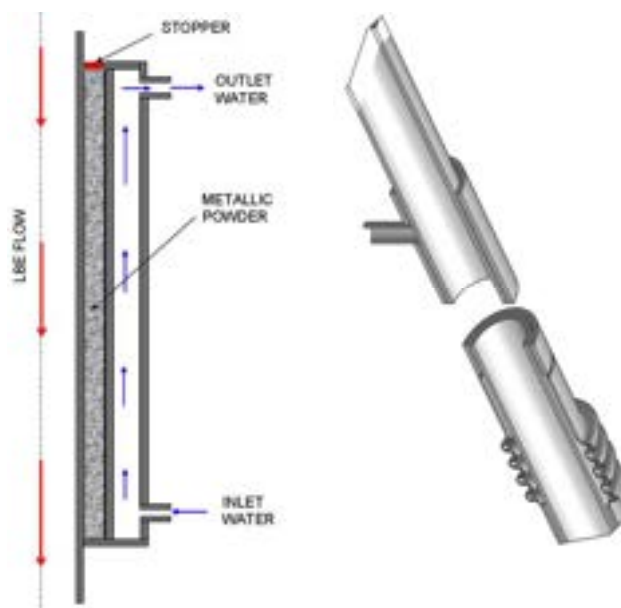


Figura 10 – Schema dello scambiatore di calore e vista del giunto ad espansione.

Tabella 4 – Dimensioni dei tubi dello scambiatore NACIE.

[mm]	Tubo Interno	Tubo Mediano	Tubo Esterno
Diametro Interno	62.68	84.9	102.3
Diametro Esterno	73	88.9	114.3
Spessore	5.16	2.0	6.02
Lunghezza	1500	1500	1500
Materiale	AISI 304	AISI 304	AISI 304

La zona anulare contenente la polvere è chiusa nella parte superiore da un “tappo” in grafite al fine di evitare la dispersione della polvere. Infine, sul tubo esterno un giunto assiale è installato per compensare l'espansione assiale differenziale tra il tubo centrale ed esterno. Inoltre, il gap creato dalla polvere tra il lato primario e secondario dello scambiatore permette di ridurre il gradiente termico attraverso lo spessore dei tubi, infatti la sua resistenza termica è di circa il 30 ÷ 50% del totale.

3.2. La campagna sperimentale

La campagna sperimentale effettuata sull'impianto NACIE include diversi test sia in circolazione naturale (NC) che in circolazione assistita (GEC). Ogni test è stato eseguito con un solo pin attivo all'interno della sezione di prova, con una potenza nominale di 22.5 kW.

Nella seguente Tabella 5 è stata riportata la matrice dei test adottata evidenziandone il regime di flusso indagato, la portata dell'iniezione di gas nel caso di circolazione assistita, la potenza totale fornita al sistema attraverso la barra elettrica riscaldante, così come la rampa temporale imposta alla fornitura di potenza per raggiungere il livello richiesto. Nella stessa tabella è stata indicata anche la temperatura media della sezione scaldante perché rappresenta uno dei parametri principali da prendere in considerazione nello studio del comportamento del sistema. Le diverse temperature medie sono state ottenute applicando condizioni al contorno differenti sul lato secondario dello scambiatore, in termini di variazione di portata d'acqua e temperatura in ingresso. Il range di temperature medie raggiunte nella presente campagna sperimentale varia tra 270 ÷ 345 °C.

Come si può vedere dalla matrice di prova, non vi sono test condotti senza fornitura di potenza al sistema, in semplice circolazione assistita. Questo perchè il misuratore di portata ad ultrasuoni previsto non era ancora stato installato sul circuito, cosicchè la portata di LBE, sia in circolazione naturale che assistita, può essere valutata solo attraverso un bilancio energetico del tipo:

$$W = \frac{\dot{Q}_{HS}}{c_{p,LBE} \Delta T_{HS}}$$

dove W portata di LBE, Q_{HS} potenza, $c_{p,LBE}$ calore specifico e ΔT_{HS} la variazione di temperatura attraverso la sezione scaldante.

Tabella 5 – Matrice di prova

Test	Flow Regime	Gas Injection Flow Rate [Nl/min]	Power Ramp Time [min]	Supplied Power [kW]	Heating Section Average Temperature [°C]
1	NC	-	30	18	300
2	NC	-	30	20.2	320
3	NC	-	30	22.5	340
4	NC	-	30	18	310
5	NC	-	30	20.2	340
6	NC	-	30	22.5	Cancelled
7	GEC	5	1	13.5	Cancelled
8	GEC	5	1	18	280
9	GEC	5	1	22.5	300
10	GEC	5	1	13.5	270
11	GEC	5	1	18	300
12	GEC	5	1	22.5	330
13	GEC	5-10	1	22.5	330
14	GEC	10-20	1	22.5	330
15	GEC	10-25	1	22.5	330
16	GEC NC	5-15	1	22.5	320
17	GEC NC	5-15	1	22.5	345
18	NC	-	1	18	280
19	NC	-	1	22.5	315
20	NC	-	1	18	315
21	NC	-	1	22.5	350
22	NC	-	1	22.5	390
23	GEC	5-10	1	22.5	380

Di seguito, una panoramica dei principali risultati ottenuti con la campagna sperimentale sarà brevemente discussa prendendo in considerazione alcuni test rappresentativi, al fine di valutare le condizioni di funzionamento e le prestazioni di impianto.

Test in circolazione naturale

I test eseguiti in circolazione naturale si sono svolti fornendo energia elettrica per il riscaldamento del fluido primario (attivazione del pin n°1) e con agendo sulla circolazione di acqua nel circuito secondario tale da evitare la sua ebollizione. Durante le prove, nessun gas viene iniettato nel riser in modo tale che l'unica forza motrice per la circolazione di LBE siano quelle di galleggiamento.

Nella Figura 11 è mostrato l'andamento della portata di LBE ottenuta durante la prova n. 21 calcolata da bilancio termico attraverso la sezione scaldante, le cui temperature sono riportate nell'immagine a destra, e rappresentativa delle portate ottenibili in circolazione naturale. Dopo un transitorio iniziale, la condizione stazionaria si ottiene con una portata stimata di circa 5.5 kg/s.

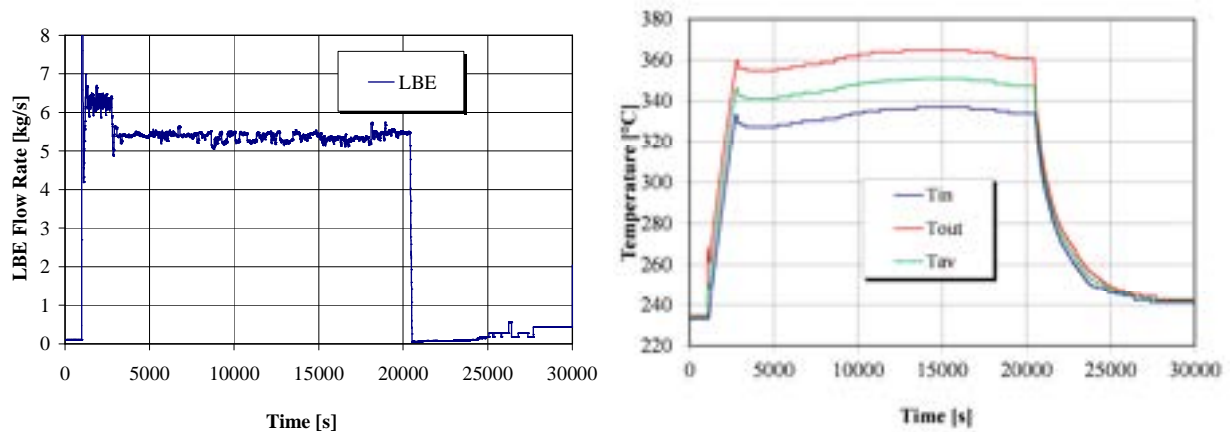


Figura 11 – Portata e temperature attraverso la sezione scaldante in circolazione naturale (test 21).

Per lo stesso test, la Figura 12 riporta la velocità media del piombo-bismuto e il valore del numero di Reynolds attraverso la sezione scaldante. Come si può notare, la velocità dell'LBE durante le prove in circolazione naturale è inferiore a 0,20 m/s con la potenza massima erogabile (22 kW), in queste condizioni stazionarie il numero di Reynolds è superiore a 40000.

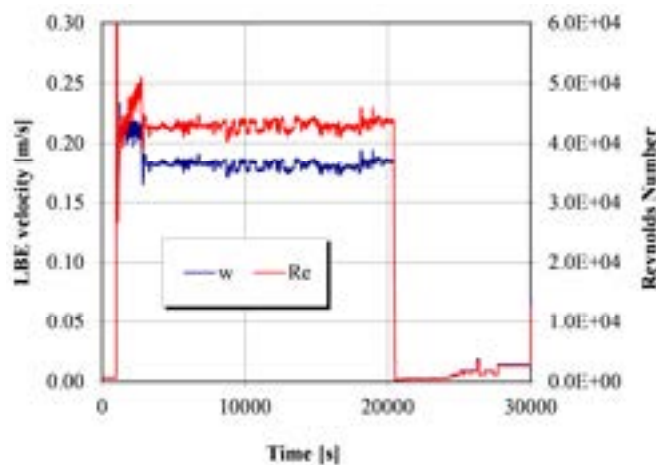


Figura 12 – Velocità dell'LBE e numero di Reynolds attraverso la sezione scaldante (test 21).

L'andamento delle temperature di parete della barra attiva a diverse quote sono riportate in Figura 13. In particolare, nell'immagine di sinistra sono visibili le temperature in corrispondenza della griglia distanziatrice, subito a monte (+410), a valle (+440) e sulla superficie di contatto pin-griglia (+425). Il fattore di hot spot appare chiaramente in questa figura, essendo la temperatura TC14 superiore di circa 15 °C rispetto alla temperatura a valle TC16. Il fattore di hot spot per la presenza della griglia distanziatrice appaiono chiaramente anche nell'immagine a destra, in cui viene confrontato l'andamento della temperatura di parete in ingresso (+50) e uscita (+800) con la termocoppia di griglia TC14. In questo caso la differenza tra TC14 e TC17 è attorno a 50 °C.

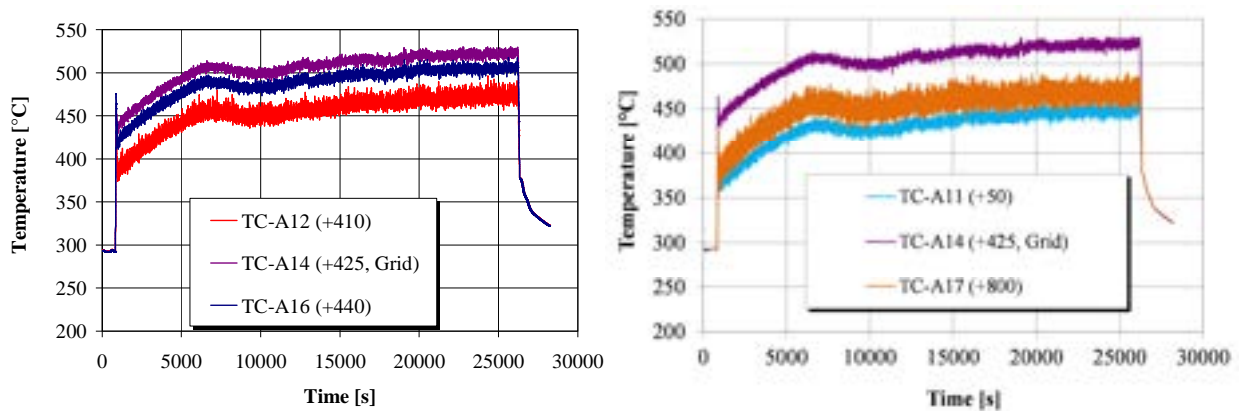


Figura 13 – Temperature di parete misurate a diverse quote (test 22).

Circolazione assistita

Per ciò che riguarda il funzionamento in regime di circolazione assistita, i test sono stati condotti con la fornitura di energia della sezione scaldante, l'iniezione di argon nell'LBE e facendo circolare l'acqua nel circuito secondario dello scambiatore di calore. Durante le prove, la forza motrice del fluido è dovuta oltre che a una componente di circolazione naturale anche per le forze di galleggiamento dovute alla formazione di vuoti all'interno del riser.

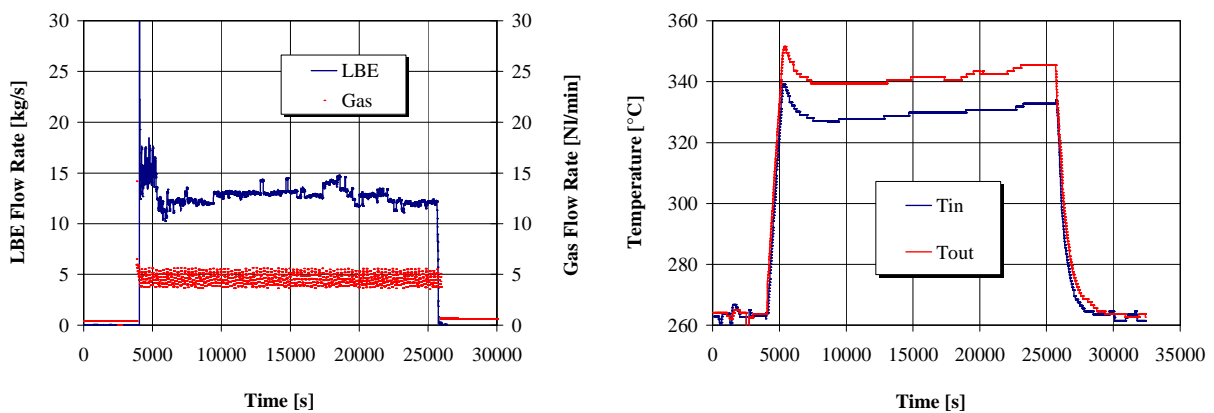


Figura 14 – Portata di LBE e gas, e temperature attraverso la sezione scaldante in circolazione assistita (test 12).

La Figura 14 a sinistra è riportato l'andamento della portata di LBE rispetto alla portata di gas iniettata. Qui è possibile notare come la portata sia superiore rispetto al caso dei test in circolazione naturale. Con una iniezione di gas di circa 5 NI/min, la portata di metallo liquido raggiunge un valore di circa 13 kg/s. A destra è riportato l'andamento della temperatura in ingresso e uscita della sezione scaldante.

Per lo stesso test, la Figura 15 riporta il numero di Reynolds e la velocità media del metallo liquido. Si può notare che la velocità raggiunge un valore di 0.45 m/s, contro i 0.20 m/s ottenuti durante le prove di circolazione naturale, e numero di Reynolds di circa 100000, sottolineando il comportamento maggiormente turbolento.

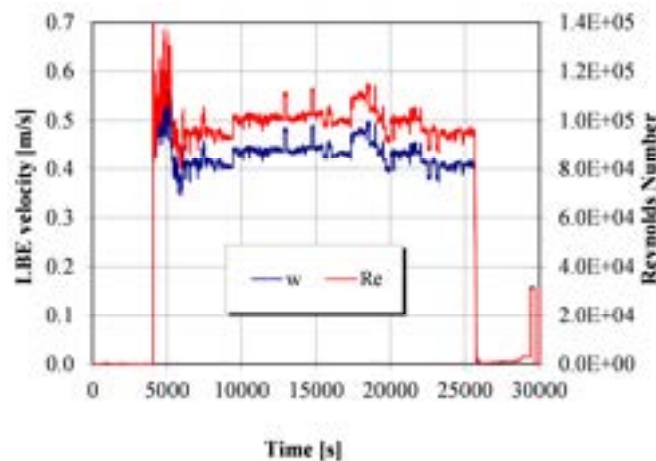


Figura 15 – Velocità dell'LBE e numero di Reynolds attraverso la sezione scaldante (test 12).

Per la prova n° 9, in Figura 16 è riportato l'andamento delle temperature di parete. La temperatura massima della barra è appena sopra i 400 °C, mettendo in evidenza che il coefficiente di scambio termico tra il metallo liquido e la barra è realmente aumentato se confrontato con il test di circolazione naturale. Come prima è valutabile il fattore di punto caldo dovuto alla griglia, anche in questo caso una differenza di 50°C è riscontrabile tra la termocoppia sulla griglia e all'uscita della barra e di 15°C tra griglia e la termocoppia subito a valle.

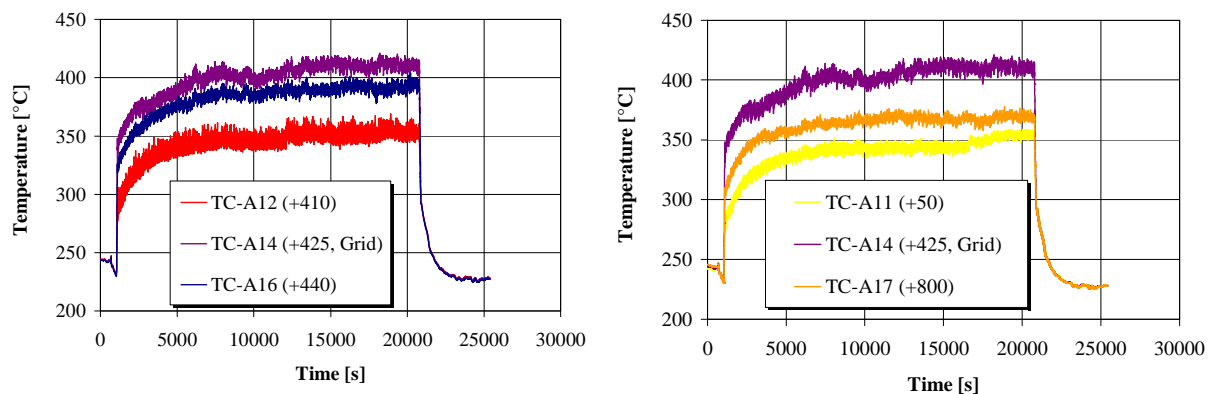


Figura 16 – Temperature di parete misurate a diverse quote, in circolazione assistita (test 9).

La prove sperimentali effettuate sul circuito NACIE sottolineano come l'incidenza del fattore di hot spot sembra abbastanza indipendente dalla turbolenza e dalla velocità del metallo liquido, almeno nel range investigato. I test condotti sono utili per lo studio dei fenomeni legati alla circolazione naturale e per la verifica e validazione dei codici di calcolo.

4. IL MODELLO NACIE PER CATHARE

4.1. Descrizione del modello

La nodalizzazione del circuito NACIE per CATHARE è stata sviluppata con elementi monodimensionali e zero-dimensionali. Dato l'interesse principale verso la simulazione del sistema a metallo liquido, la descrizione del circuito secondario ad acqua è stata notevolmente semplificata con l'imposizione di boundary conditions. Il circuito primario a piombo-bismuto è stato descritto con circa 230 nodi idraulici con dimensioni massime di circa 10 cm al fine di assicurare un adeguato dettaglio descrittivo. Una meshatura più fitta è stata adottata per i componenti più importanti: la regione scaldante (TESTSEC) e lo scambiatore di calore lato primario (HXPRIM) e lato secondario (HXSEC).

Lo schema della nodalizzazione di NACIE è riportato in Figura 17. Le linee rosse rappresentano le strutture termiche (WALL) simulate, le linee rosa indicano la presenza di una perdita di carico concentrata per le cui valutazioni si rimanda al §4.2. Si possono anche notare le giunzioni tra i moduli dove D (downstream) indica che il flusso è in uscita dall'elemento e U (upstream) indica un flusso entrante nell'elemento.

Dallo schema è possibile individuare tutti i principali componenti del circuito. La zona inferiore alla sezione scaldante (LPLE), su cui si inserisce la linea discendente o downcomer (DOWN), è stata simulata con un modulo VOLUME. Al di sopra si trova la zona attiva (TESTSEC) della barra elettrica. Qui sono state descritte quattro strutture termiche: la barra attiva con generazione di potenza, la barra non attiva, i due elementi dummy (con un'unica struttura equivalente), e infine la parete esterna del tubo mantenuta isolata dall'ambiente esterno. Sono state considerate anche le perdite di carico concentrate dovute alle griglie distanziatrici, una nel midplane e due in uscita, nella parte superiore.

Salendo attraverso il lungo tubo del RISER si giunge al vaso di espansione (TANK) dove sono state considerate le lunghezze di penetrazione dei tubi in arrivo da riser e in mandata verso lo scambiatore. Sulla tank è stata imposta una leggera sovrappressione di 1.313 bar attraverso la boundary condition EXTCOND.

A valle della tank si trova la linea che porta l'LBE allo scambiatore di calore (HORUP). La struttura termica associata è accoppiata con l'ambiente esterno. Segue il tratto di scambiatore termico primario (HXPRIM) e il downcomer (DOWN) che chiude il circuito. Anche la struttura termica associata al downcomer è accoppiata con l'esterno.

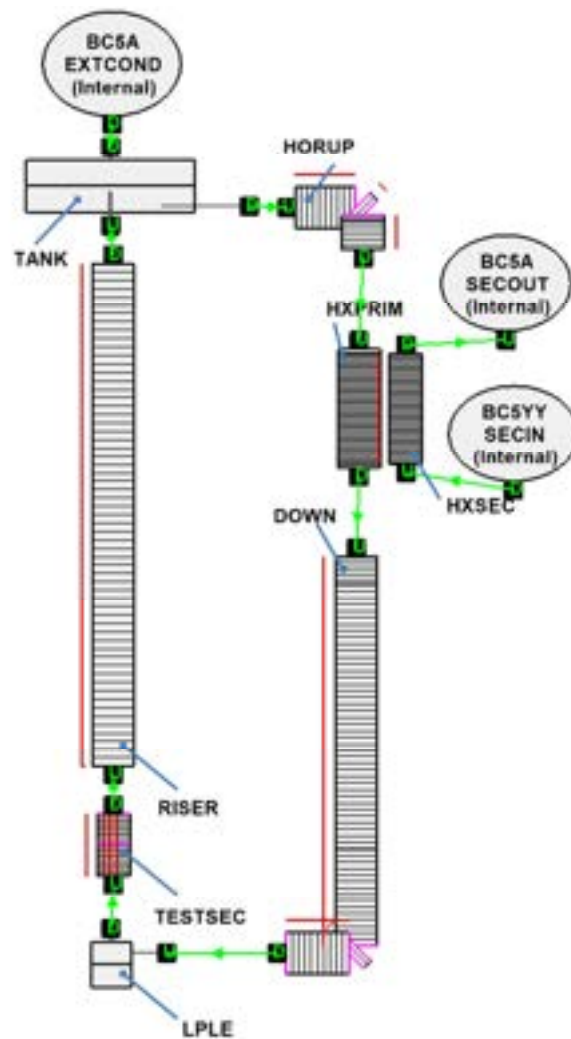


Figura 17 – Schema del modello NACIE per CATHARE.

Alle strutture termiche di HORUP e DOWN è demandato il compito di compensare le perdite di potenza dovute in parte a dissipazioni verso l'ambiente ma soprattutto al continuo scambio termico con il circuito secondario. Infatti, nella realtà sperimentale, per evitare che l'acqua secondaria giunga ad ebollizione, deve essere sempre costantemente mantenuta una certa portata, anche se piccola. Ne deriva che per evitare il congelamento del metallo-liquido è necessario, in ogni condizione, fornire una certa potenza per compensare le perdite termiche del circuito primario. Nel modello, alle strutture termiche in oggetto viene imposto un elevato coefficiente di scambio e una temperatura ambiente elevata, in grado di riprodurre durante lo stazionario iniziale le temperature sperimentali di ingresso della zona scaldante e ingresso dello scambiatore di calore. Nella fase transitoria vera e propria, i coefficienti di scambio con l'esterno vengono abbattuti in modo da lasciare evolvere liberamente il sistema.

A causa di questo continuo scambio termico con il secondario, si instaura una continua circolazione naturale attraverso il primario. Per questo, soprattutto nello stazionario iniziale di ogni test, non è propriamente corretto far riferimento alla portata derivata dal bilancio termico attraverso la sezione scaldante. Infatti, come vedremo in seguito, da bilancio risulta un portata di LBE nulla, che non corrisponde alla realtà.

La descrizione del circuito secondario si limita alla tubazione anulare della regione di scambio termico (HXSEC). Le condizioni di funzionamento sono imposte attraverso boundary conditions. In particolare, dalla BC SECIN sono state imposte le condizioni di portata e temperatura dell'acqua in ingresso. Attraverso un modello di tipo mixed BC5YY è stato possibile descrivere, indipendentemente l'una dall'altra, la tempistica di evoluzione delle variabili così come misurata nei test. La condizione di pressione del circuito secondario è imposta con la BC SECOUT al valore di 1.5 bar costanti.

L'accoppiamento fra circuito primario e secondario viene realizzato attraverso un EXCHANGER a parete multistrato. Il primo strato non è altro che il tubo del primario in acciaio inox AISI304, il secondo strato è costituito dalla polvere di acciaio e il terzo strato è la parete interna della regione anulare a contatto con il secondario, anch'essa in acciaio AISI304. Per l'AISI304 sono state impiegate le proprietà incluse nelle librerie di CATHARE. Le proprietà della polvere di acciaio sono state aggiunte al codice come materiale aggiuntivo, attraverso un file mask FXMAXX.f. Questo non è altro che un file sorgente che viene compilato se posto nella directory di esecuzione delle simulazioni. Le proprietà qui descritte sono la conducibilità e il prodotto tra la densità e il calore specifico derivate dal modello RELAP5, in cui le caratteristiche sono tabulate in funzione della temperatura di parete. La conducibilità è stata considerata pari al 12.5% della conducibilità dell'acciaio come in RELAP5.

4.2. Valutazione delle perdite di carico

La facility NACIE, come già evidenziato, è caratterizzata da lunghi tratti dritti le cui perdite di carico sono essenzialmente legate alla rugosità interna delle tubazioni, assunta come da modello RELAP5 a un valore di $1.5e-5$ m per tutto il circuito principale.

Le perdite di carico concentrate possono essere localizzate all'ingresso e uscita dalla tank di espansione, sulle due curve che precedono e seguono lo scambiatore di calore, all'ingresso della test section, ma soprattutto sulle tre griglie distanziatrici della rod-bundle. Si è proceduto ad una stima delle perdite concentrate per poter riprodurre adeguatamente i risultati sperimentali.

Ingresso/uscita tanka di espansione

Sull'ingresso e uscita dalla tanka sono state considerate le perdite di carico caratteristiche del brusco allargamento e brusco restringimento della sezione di passaggio.

- Ingresso tanka: $k = 0.5$
- Uscita tanka: $k = 1.0$

Curve a 90°

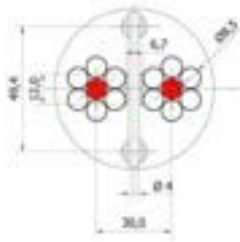
Le curve che precedono e seguono lo scambiatore di calore sono state valutate in $k = 0.25$ ciascuna, da input RELAP5. In più una perdita di $k = 0.1$ è stata posta all'imboccatura della test section.

Griglie distanziatrici del bundle

Le griglie distanziatrici rappresentano le perdite di carico concentrate più importanti. Come è possibile notare in Figura 9 esse rappresentano un forte ostacolo alla circolazione del fluido, aggravato anche dalla presenza delle piccole tubazioni che ospitano le termocoppie.

Una stima delle perdite di questo tipo di griglia è stata effettuata con l'impiego della correlazione di Rehme [14].

Per prima cosa è necessario determinare l'area di passaggio indisturbata del rod bundle, dopodichè si procederà alla stima dell'area occupata da una griglia. Riprendendo la sezione della test section presentata in Figura 9:



Area indisturbata: 2.8685e-3 m²

Area totale griglia (stimata): 1.01e-3 m²

Come noto, la perdita di carico concentrata è espressa dalla relazione:

$$\Delta p = k \frac{\rho}{2} v^2$$

Dove Δp è la perdita di pressione, k il coefficiente di perdita, ρ è la densità del fluido e v è la sua velocità. Rehme propone la seguente relazione per tenere in considerazione il fattore di restrizione dell'area di flusso:

$$k = C_v \cdot \epsilon^2$$

dove: $\epsilon = A_v / A_S = 0.352$

$$C_v = 3.5 + \frac{73.5}{R_e^{0.264}} + \frac{2.79 \cdot 10^{10}}{R_e^{2.79}}$$

ϵ è il fattore di restringimento espresso dal rapporto dell'area della griglia A_v e l'area di flusso indisturbato A_S . C_v è un fattore dipendente dal numero di Reynolds (~40000 nel caso dei test in circolazione naturale di NACIE) approssimato ad 8.

Da ciò risulta una perdita concentrata $k = 1.0$ su ciascuna griglia. In questo calcolo sono stati stimati anche gli ulteriori restringimenti dovuti alle tubazioni delle termocoppie.

Successive comunicazioni con il personale operante sull'impianto hanno evidenziato che le perdite sulle griglie potrebbero essere perfino superiori e da loro valutate in $k = 2$. A questo punto, data l'incertezza relativa, le perdite sono state comunque considerate pari a 1.0 su ciascuna griglia, ottenendo buoni risultati che verranno discussi in seguito.

4.3. Test simulati

Nell'ambito della presente attività vi era l'intenzione di valutare le capacità di CATHARE nella simulazione di transitori in circolazione naturale e in circolazione assistita attraverso l'iniezione di gas incondensabile.

Nella fase di sviluppo e messa a punto del modello di NACIE per l'iniezione di gas incondensabile, ci si è resi conto che il codice non giungeva mai al termine della fase di inizializzazione con segnalazione di errori di convergenza. Successive interazioni avute con il team di sviluppo di CATHARE ha evidenziato che il codice semplicemente non è in grado di simulare la presenza di gas incondensabile in un nodo (mesh) con presenza di sola fase liquida, nel nostro caso lungo il RISER, ma è necessaria la presenza di una fase vapore non residuale.

In base alle indicazioni ricevute, si è provveduto ad iniettare una quantità di vapore di piombo-bismuto unitamente al gas incondensabile, ottenendo una corretta inizializzazione dal calcolo. Nonostante ciò, non appena si avviava l'iniezione, il time step di calcolo per il raggiungimento della convergenza veniva ridotto a valori dell'ordine $1.e-6$, rendendo praticamente impossibile la simulazione di transitori che nel caso di NACIE hanno una durata di migliaia di secondi. Inoltre, l'iniezione di vapore estremamente caldo (dell'ordine dei 1800°C) induceva un riscaldamento sulla fase liquida assolutamente non accettabile.

Il problema del trattamento dei gas incondensabili era in effetti già noto al team di sviluppo, la cui soluzione è stata messa in agenda per i mesi a venire.

A causa di questo problema per ora insormontabile, lo studio qui presentato ha dovuto concentrarsi sulla simulazione dei test in circolazione naturale.

I test della campagna sperimentale in circolazione naturale possono essere suddivisi in due categorie. I test effettuati con rampa di potenza di 30 minuti (test da 1 a 5 della Tabella 5) e i test con rampa di potenza di 1 minuto (test da 18 a 22 della Tabella 5).

Nel presente studio sono stati considerati due test con rampa di 30 minuti: test 2 e 3; e due test con rampa di 1 minuto: test 19 e 21 della Tabella 5.

5. RISULTATI DEI TEST IN CIRCOLAZIONE NATURALE NACIE

Le simulazioni con CATHARE sono composte da una fase di inizializzazione di tutto il circuito a cui segue una fase di stabilizzazione e regolazione e per finire una fase transitoria. Tutti i test simulati seguono lo stesso schema.

CATHARE ha uno schema di risoluzione che segue la topologia del circuito descritta dell'utente. Nel caso del modello NACIE, la risoluzione del circuito comincia dall'elemento in uscita dal vaso di espansione (HORUP) nel circuito primario e dall'unico elemento presente nel circuito secondario (HXSEC). In questa fase le boundary conditions non sono considerate. La soluzione del primo elemento richiede la descrizione delle caratteristiche di tutte le giunzioni in ingresso in modo che il codice sia in grado, a partire dal primo elemento, di caratterizzare via via tutto il circuito. In questa fase di inizializzazione vengono fornite le caratteristiche di velocità e temperature dei fluidi delle due giunzioni in ingresso all'elemento

HORUP e in ingresso allo scambiatore HXSEC. In più, viene definito il livello sul vaso di espansione e la presenza di solo incondensabile nella fase gassosa e per finire, viene inizializzata la potenza scambiata tra i due circuiti attraverso l'EXCHANGER.

Saltando la fase di regolazione, non necessaria in questo caso, tutti i test simulati sono stati seguiti dall'abbattimento dei coefficienti di scambio termico verso l'esterno durante l'inizio del transitorio cioè all'avvio della potenza prodotta nella barretta scaldante. Ricordiamo che lo scambio con temperature esterne artificialmente alte era stato utilizzato per la compensazione della potenza rimossa da parte del circuito secondario. Nella realtà questa composizione era attuata tramite tracciamento elettrico delle tubazioni che non può essere simulato per mancanza di informazione come meglio spiegato in seguito.

Il transitorio vero e proprio viene descritto dalle evoluzioni temporali della potenza prodotta dalla barretta e delle caratteristiche dell'acqua in ingresso del circuito secondario. In particolare, la portata e la temperatura in ingresso sono imposte dalla boundary condition SECIN.

Sembra importante a questo punto porre l'accento su alcune questioni relative alla campagna sperimentale in oggetto. Il sistema raffreddato a piombo-bismuto è opportunamente isolato dall'esterno, attraverso l'uso di lana di roccia, al fine di limitare le perdite di calore e quindi il congelamento del metallo. Ciononostante è sempre necessario adottare dei riscaldatori lungo le tubazioni al fine di compensare le perdite. Nel caso di NACIE, data anche la tipologia di scambiatore di calore adottato nella facility, una non trascurabile potenza dell'ordine dei 6 kW viene continuamente rimossa dal circuito secondario, per cui i riscaldatori giocano un ruolo niente affatto marginale quando le potenze della sezione di prova sono nulle. Per di più, la posizione dei riscaldatori e il loro sistema di controllo non sono chiari; la potenza generata da ciascuno e l'evoluzione della generazione di potenza durante il transitorio non sono noti. Inoltre, le termocoppie che definiscono le temperature di ingresso e uscita della sezione di prova sono in realtà molto distanti dalla sezione stessa, e la presenza di riscaldatori tra queste due rilevazioni è provata dai dati sperimentali. Per semplicità, nel modello sviluppato per CATHARE sono stati imposti grandi coefficienti di scambio con l'esterno posto a temperature elevate, tali da ottenere le temperature sperimentali in ingresso allo scambiatore e al core.

Tutto questo concorre ad avere notevoli incertezze e difficoltà nel riprodurre adeguatamente sia gli stati iniziali del sistema, sia le fasi transitorie di accensione della potenza (e relativo spegnimento dei riscaldatori).

Tenuto conto di tutti questi fattori, si concentra l'interesse di queste simulazioni nel riprodurre correttamente lo stato stazionario raggiunto in ciascun test. Solo in questa fase lo stato di funzionamento del sistema è perfettamente noto e questo nonostante l'assenza di un misuratore di portata sul circuito primario, poiché la portata viene correttamente valutata attraverso il bilancio termico sulla sezione scaldante.

5.1. Test con rampa di potenza di 30 minuti

Il primo test considerato è il numero 3 e su questo si è proceduto alla calibrazione del modello di simulazione per CATHARE. I dati in ingresso, per l'esecuzione del transitorio sono

l'evoluzione nel tempo della potenza della barra nel core e le condizioni al contorno del circuito secondario, temperatura in ingresso allo scambiatore e la relativa portata d'acqua. In Figura 18 sono riportati i grafici della potenza sperimentale confrontata con la curva adottata in CATHARE, e l'andamento sperimentale di temperatura e portata del secondario, imposte per la simulazione.

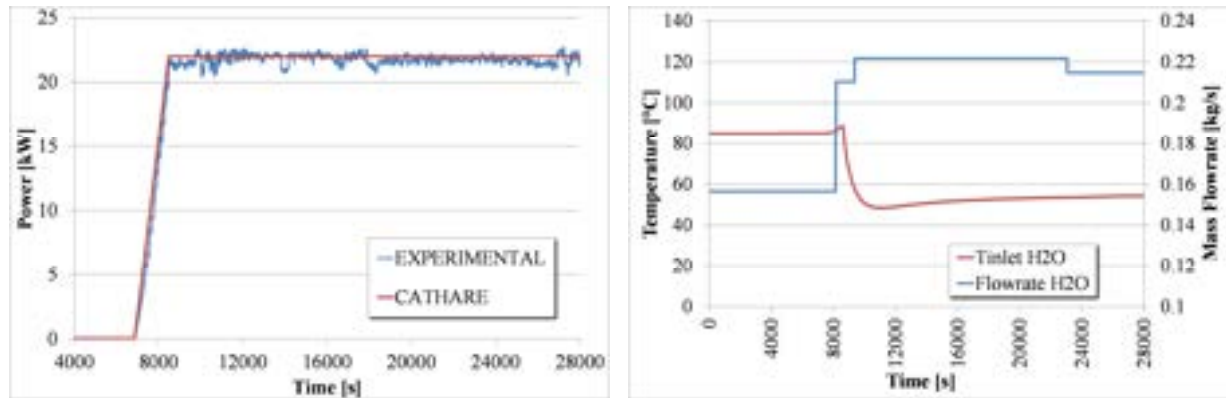


Figura 18 – Potenza prodotta, temperatura in ingresso e portata del secondario (test 3).

Questa metodologia sarà poi impiegata in tutti le simulazioni con opportune variazioni per riprodurre il test sperimentale considerato.

La fase di calibrazione si è limitata essenzialmente alla definizione di un fouling factor da applicare al lato secondario dello scambiatore di calore, tale da riprodurre efficacemente le temperature di ingresso alla sezione di prova del primario. Il fouling factor è un fattore correttivo al coefficiente di scambio termico il cui utilizzo serve a compensare tutte le incertezze sopra descritte, non ultima l'incertezza relativa alle proprietà della polvere di acciaio (conducibilità e capacità termica) posta nell'interstizio tra circuito primario e secondario dello scambiatore. Nel nostro caso è stato sufficiente un fattore di 1.17 di riduzione del coefficiente di scambio.

In Figura 19 sono stati riportati i grafici di portata di piombo-bismuto e di temperatura in ingresso e uscita dal core ottenuti con CATHARE nella simulazione del test 3. Come è possibile notare, la curva sperimentale di portata e quella calcolata con il codice differiscono proprio a causa della non applicabilità del bilancio termico durante la fase iniziale del transitorio. In quell'intervallo temporale, infatti, la potenza sviluppata dalla barra è nulla e tale risulta anche la portata. Nella realtà, la portata è considerevolmente diversa da zero. Questo effetto è dovuto alla potenza prodotta dai riscaldatori usati per evitare il congelamento del metallo liquido durante le fasi di "attesa" del loop, e all'accoppiamento termico tra circuito primario e l'acqua del secondario che viene continuamente ricircolata per evitare la sua ebollizione. L'effetto di generazione di potenza in una zona del circuito e rimozione da un'altra comporta l'instaurarsi di una circolazione naturale anche nella fase iniziale del transitorio.

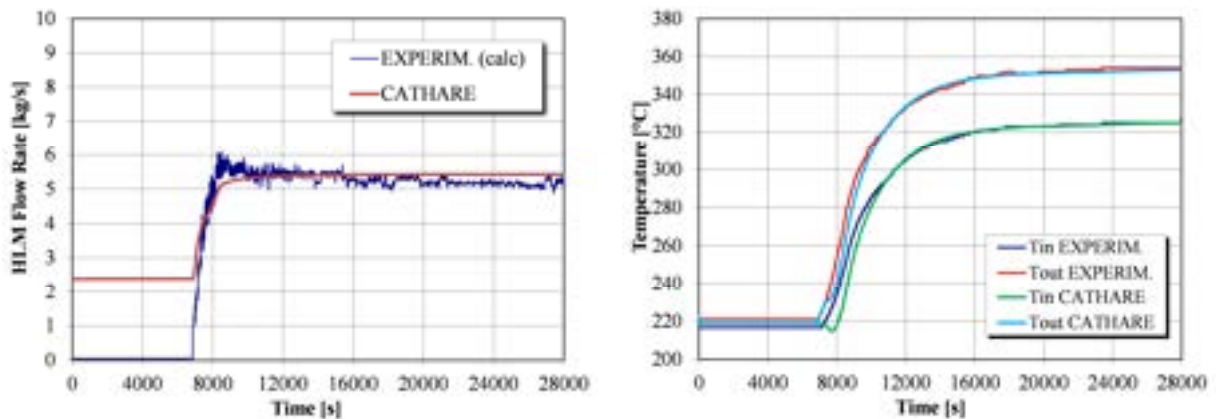


Figura 19 – Portata di LBE e temperature ingresso/uscita core (test 3).

I risultati ottenuti con CATHARE nello stazionario a valle dell'accensione della barra scaldante fino a una potenza di 22 kW sono molto buoni sia per quanto riguarda la portata di metallo liquido che le temperature di ingresso e uscita dalla sezione di prova. Si può notare un piccolo ritardo nella salita delle temperature, ciò è dovuto a una non perfetta riproduzione dei salti termici attraverso lo scambiatore. Il piombo-bismuto uscente dallo scambiatore risulta più freddo rispetto a quanto rilevato sperimentalmente a causa di un'eccessiva efficacia dello scambio termico primario-secondario che al momento non è stata risolta. A causa di ciò, quando ad inizio transitorio vengono abbattuti i coefficienti di scambio termico con l'esterno (a simulare lo spegnimento dei riscaldatori), del fluido relativamente più freddo raggiunge l'ingresso della sezione scaldante ritardando la salita delle temperature del sistema. L'adozione di un fouling factor serve appunto a recuperare la non perfetta riproduzione delle condizioni di scambio primario-secondario.

In particolare nel test 3, il grafico di temperature si riferisce ad un caso in cui l'abbattimento dei coefficienti di scambio è stato effettuato con una legge esponenziale della stessa durata dell'inserzione di potenza (circa 30 minuti). Il risultato, messo in confronto con i successivi casi studiati in cui l'abbattimento è avvenuto istantaneamente all'inizio del transitorio, fornisce curve di temperatura più regolari, ma si è visto non avere alcun effetto sui valori in regime stazionario.

Il successivo test (nr 2) è stato preso in considerazione per verificare che la messa a punto del modello sul test 3 sia ancora valida nel caso di un transitorio con analoghe condizioni. Il test è caratterizzato dalla una potenza inserita di circa 20 kW, contro i 22 kW del test 3, a temperature medie di sistema leggermente diverse di circa 320 °C, contro i circa 340 °C del test 3 a fine transitorio.

In Figura 20 sono riportate le condizioni al contorno del test 2, potenza e portata/temperatura del secondario, e in Figura 21 i risultati ottenuti.

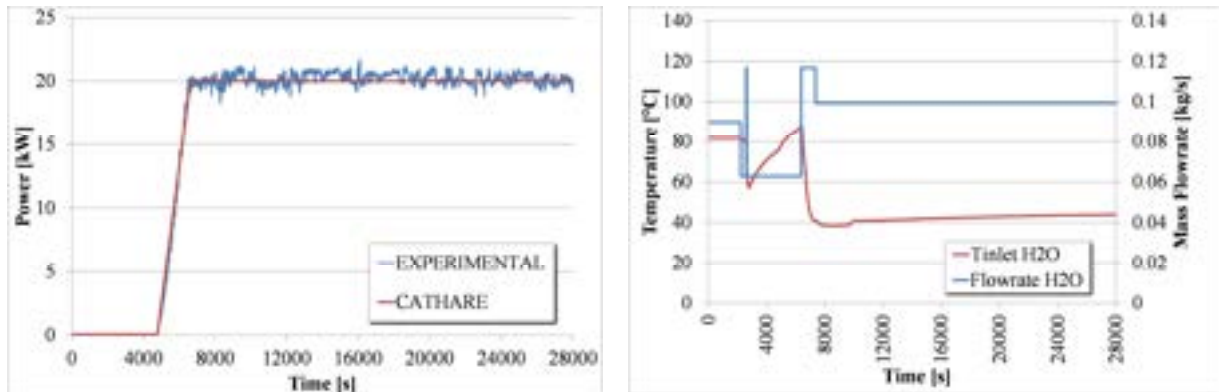


Figura 20 – Potenza prodotta, temperatura in ingresso e portata del secondario (test 2).

Si nota come la portata valutata dal codice a valle dell'iniezione di potenza sia ancora in buon accordo con il dato sperimentale. Dal grafico delle temperature, si può stimare l'effetto del differente abbattimento del coefficiente di scambio con l'esterno che qui avviene istantaneamente ad inizio transitorio (circa 4800 secondi). L'abbassamento delle temperature in ingresso al core è valutabile in circa 20 °C ma nonostante ciò le temperature a regime risultano anch'esse in buon accordo. Tale livello di raffreddamento è dovuto anche ai tempi caratteristici di risposta del sistema. Una volta annullato lo scambio, occorre un certo tempo prima che il fluido proveniente dalla sezione scaldante raggiunga lo scambiatore, ma nel frattempo il secondario continua a estrarre calore e ad abbattere la temperatura in uscita del metallo liquido.

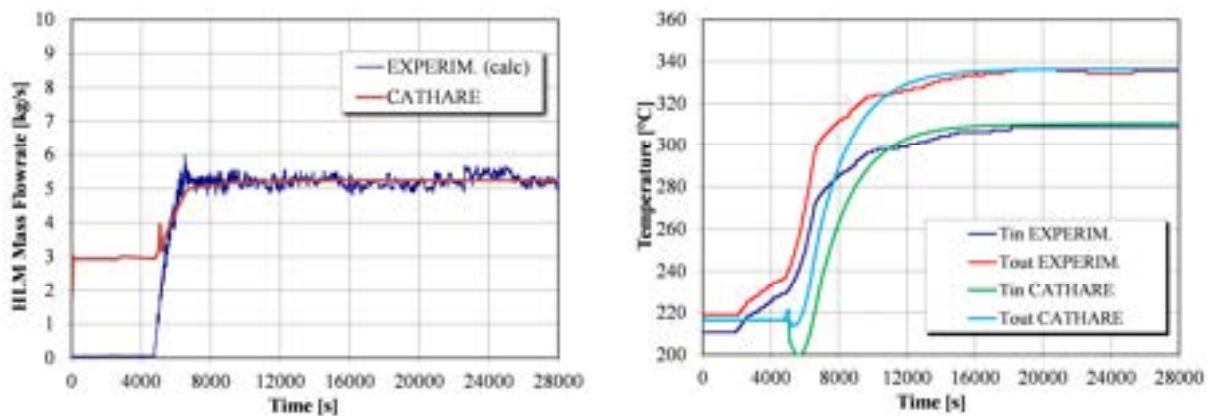


Figura 21 – Portata di LBE e temperature ingresso/uscita core (test 2).

E' indubbio che una maggiore conoscenza del sistema, così come l'affinamento del modello con per la simulazione delle perdite di calore e una migliore ricostruzione delle condizioni di scambio tra primario/secondario anche nelle fasi precedenti l'inizio dei transitori, possano portare notevoli benefici al modello. Ad ogni modo, i risultati ottenuti in queste prime simulazioni sono comunque più che soddisfacenti, in particolare riferendosi alle condizioni di funzionamento a regime.

5.2. Test con rampa di potenza di 1 minuto

Il secondo gruppo di test considerati differisce dal precedente per l’inserzione della potenza in un tempo molto ridotto, circa un minuto. La simulazione di questo tipo di transitori, che si possono definire rapidi, è molto più semplice ed efficace rispetto alla tipologia precedente. Nei transitori rapidi, infatti, tutti i riscaldatori devono essere spenti in tempi molto brevi, al limite istantanei, per cui la non perfetta conoscenza del sistema di controllo dei riscaldatori ha un effetto molto minore sulle simulazioni.

In Figura 22 sono riportate le condizioni al contorno considerate per il test 19. Nella figura a destra, in particolare, data la notevole oscillazione della rilevazione della temperatura sperimentale in ingresso al secondario è stato riportato anche l’andamento considerato in CATHARE (curva verde).

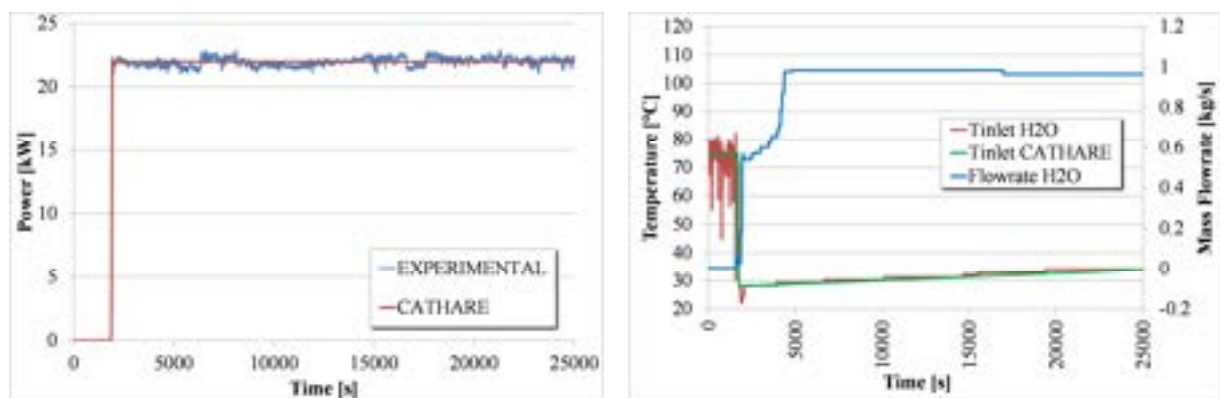


Figura 22 – Potenza prodotta, temperatura in ingresso e portata del secondario (test 19).

Dai risultati ottenuti, vedi Figura 23, si può vedere come la minor incidenza delle condizioni al contorno non note relative al funzionamento dei riscaldatori, porti ad avere ottimi risultati anche nella fase transitoria. Di nuovo la portata viene correttamente stimata dal codice e si vede come le temperature seguano adeguatamente il profilo misurato dalle termocoppie lungo il circuito anche nella fase successiva l’avvio della potenza della barra nella sezione scaldante. Sia in questo test che nel successivo, l’abbattimento dei coefficienti di scambio avviene a inizio transitorio e la durata della salita in potenza è di circa 50 secondi.

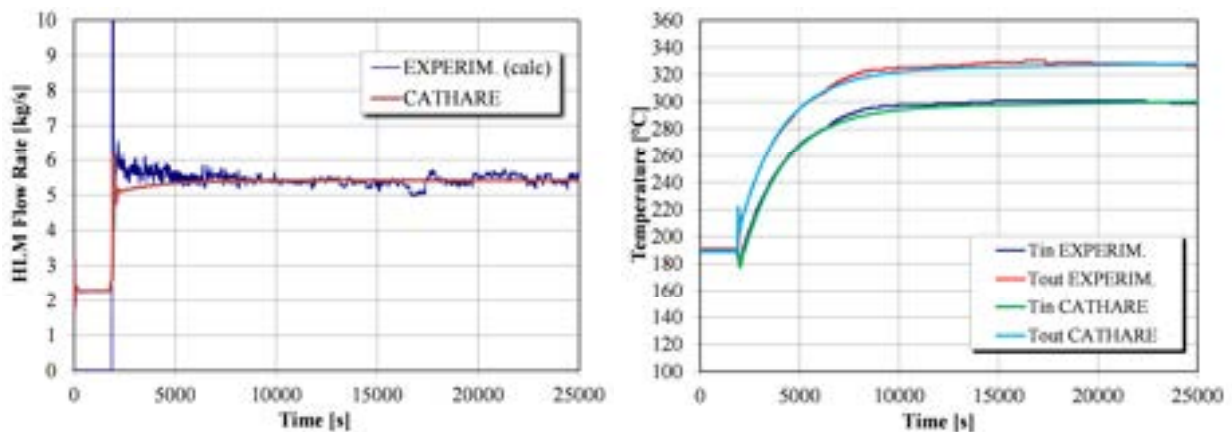


Figura 23 – Portata di LBE e temperature ingresso/uscita core (test 19).

Per questa tipologia di transitori è stato però necessario ricalibrare il fouling factor fino ad un valore di 1.3 sul lato secondario al fine di ottenere le temperature desiderate sul lato primario, quindi con una leggera ulteriore diminuzione del coefficiente di scambio tra i circuiti. Con tutta probabilità 1.3 è il valore di fouling factor più corretto per la simulazione di tutti i transitori in circolazione naturale, anche quelli con rampa di 30 minuti, ma data le incognite più volte descritte riguardanti il sistema di funzionamento dei riscaldatori, i transitori di 30 minuti soffrono di incertezze che al momento possono essere bypassate solo attraverso la modifica del fouling factor. Ne è la prova, il fatto che un fattore di 1.17 è ottimale per entrambe i test a rampa di 30 minuti e, come vedremo, 1.3 è ottimale per entrambe i test con rampa di un minuto.

Di seguito, in Figura 24, vengono riportate le condizioni al contorno del test 21, caratterizzato da una potenza di circa 22 kW e un temperatura di ingresso sul secondario molto prossima ai 100 °C.

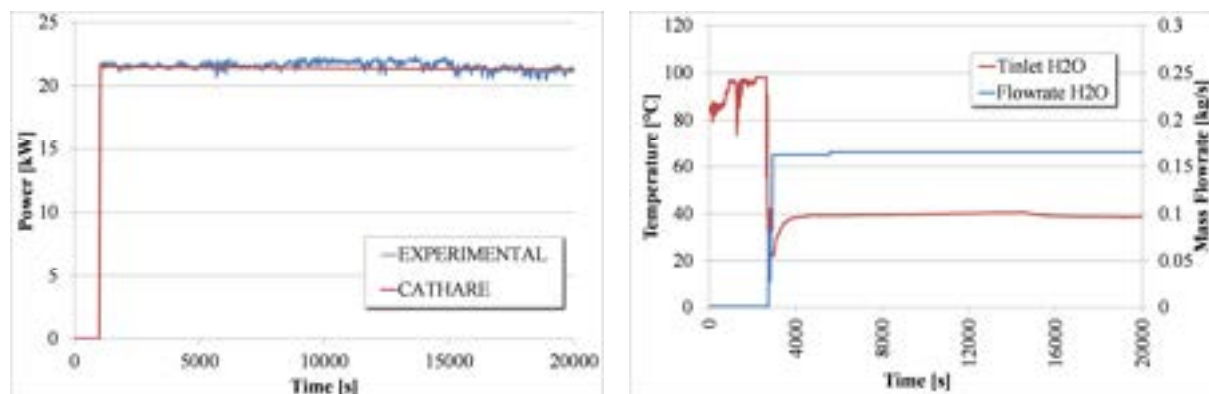


Figura 24 – Potenza prodotta, temperatura in ingresso e portata del secondario (test 21).

In base al confronto dei risultati ottenuti con CATHARE con quelli sperimentali di Figura 25 è possibile notare che dopo l’inserzione della potenza a circa 1500 s, la portata sperimentale raggiunge valori superiori a quella simulata. Questo perché sul lato secondario si ha l’ebollizione parziale dell’acqua che aumenta lo scambio termico inducendo una maggiore portata di piombo-bismuto fino a quando, a circa 3000s non viene abbassata la temperatura dell’acqua in ingresso al secondario fino a valori di circa 40 °C. A questo punto, il minore scambio termico con acqua sottoraffreddata abbassa la portata di LBE del test fino a valori identici a quella ottenuta numericamente.

A causa della stessa fenomenologia, la salita delle temperature misurate sul circuito primario risulta essere più rapida durante la fase di transitorio rispetto a quella calcolata da CATHARE come si vede in Figura 23, il valore delle temperature a regime è comunque in buon accordo con il dato sperimentale.

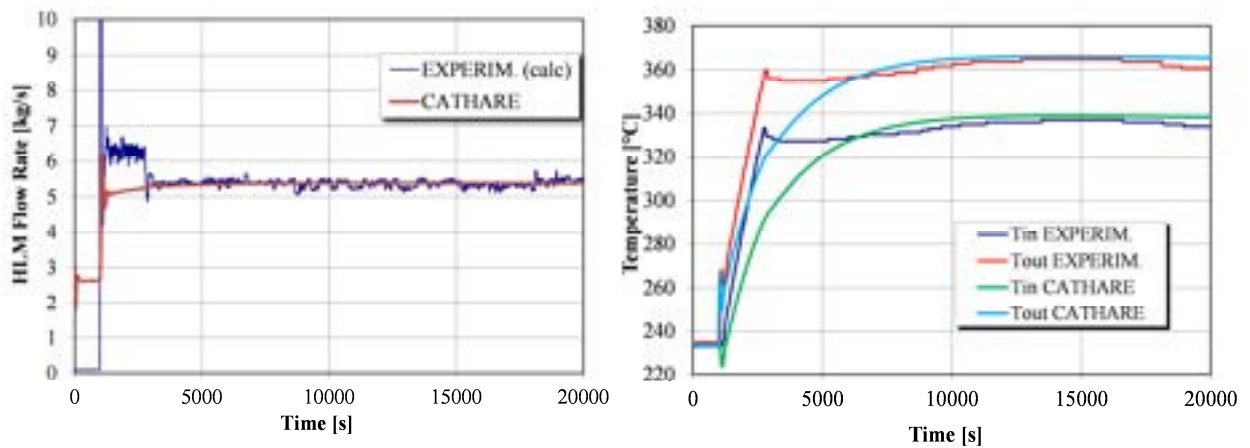


Figura 25 – Portata di LBE e temperature ingresso/uscita core (test 21).

A prescindere dalle informazioni mancanti sulle condizioni di prova che permetterebbero un miglioramento del modello CATHARE di NACIE il modello sviluppato e impiegato nel presente studio ha fornito buoni risultati per quel che riguarda la stima della portata in circolazione naturale e delle temperature attraverso la sezione scaldante, sia in transitorio ma soprattutto in regime stazionario. Questo è un ulteriore passo verso la validazione del codice CATHARE per il trattamento dei metalli liquidi pesanti.

6. ATTIVITA' RELATIVE AL BENCHMARK LACANES

6.1. Benchmark LACANES

Il benchmark LACANES (Lead-Alloy Cooled Advanced Nuclear Energy System) è alla base di un programma di studio internazionale lanciato nel 2007 dall'OECD/NEA per testare i codici e la modellistica utilizzata nelle analisi termoidrauliche di sistemi nucleari avanzati raffreddati con LBE. Gli obiettivi principali del benchmark sono di qualificare i diversi modelli utilizzati per la simulazione termoidraulica dell'impianto e di stabilire delle linee guida per la determinazione dei vari parametri utilizzati nella valutazione delle perdite di pressione e nel trasferimento di calore. Le tipologie di codici impiegati fanno parte sia dei cosiddetti codici di sistema, a carattere prevalentemente monodimensionale, sia di tipo CFD (Computational Fluid Dynamics), tridimensionali.

ENEA, che sta partecipando al benchmark con la propria versione dedicata ai metalli liquidi pesanti del codice RELAP5, ha messo a disposizione le informazioni relative all'impianto, i dati sperimentali distribuiti per il benchmark ed i risultati ottenuti con il codice RELAP5, per realizzare un importante passo verso la validazione della versione del codice CATHARE dedicata ai metalli liquidi pesanti. Sulla base di queste informazioni è stato sviluppato un modello CATHARE della facility HELIOS.

LACANES ha per oggetto di studio la facility coreana HELIOS (Heavy Eutectic liquid metal Loop for Integral test of Operability and Safety of PEACER), un circuito integrale di LBE alto 12 metri costruito alla Seoul National University nel 2005 [15]. Il benchmark, che è stato suddiviso in una prima fase relativa al funzionamento in circolazione forzata ed una seconda in circolazione naturale, è ora in via di conclusione. Tutti i test si riferiscono a condizioni stazionarie dell'impianto.

Il loop HELIOS è una facility termoidraulica in scala del reattore PEACER-300 [16], un reattore trasmutatore raffreddato a LBE, attualmente allo stadio di progetto concettuale. Il loop è stato progettato per ottenere la massima similitudine possibile per le caratteristiche di circolazione naturale del reattore, quindi mantenendo le stesse elevazioni e le perdite di carico globali di PEACER [17].

Il loop è alto 12 m con una differenza di elevazione di 7.4 m tra il serbatoio freddo (heat exchanger) e la sorgente calda (core). La configurazione del loop è riportata in Figura 26 in cui è messa in evidenza la strumentazione (T/C termocoppie, DP misuratori di differenze di pressione). La potenza nel core è fornita da quattro barre riscaldate elettricamente in grado di fornire un massimo di 60 kW. Lo scambiatore nella parte alta di HELIOS ha come fluido secondario olio in condizioni monofase. Il piombo-bismuto scorre verso il basso nel mantello dello scambiatore, mentre l'olio scorre in controcorrente verso l'alto all'interno di tubi.

Il serbatoio di espansione permette di controllare le variazioni di livello e la concentrazione di ossigeno nel LBE. La pompa di tipo centrifugo può fornire una prevalenza di 14 m di LBE e una portata di 14kg/s.

Il loop è dotato di una linea di bypass della pompa che permette di escluderla durante i test in circolazione naturale [18] [19].

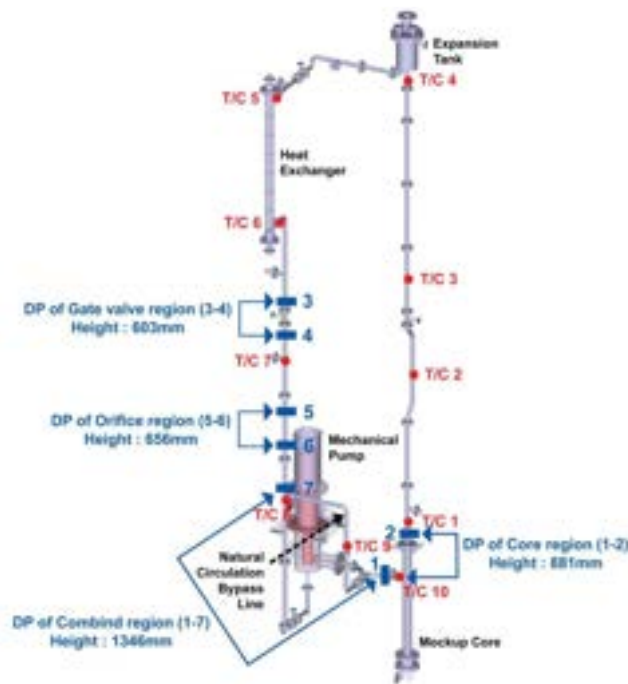


Figura 26 – Schema 3D di HELIOS con posizionamento della strumentazione.

La prima parte della validazione di CATHARE riguardante lo studio in circolazione forzata era già stata oggetto di precedenti attività [4] e di questa, per completezza, verranno riassunti di seguito i principali risultati. Lo scopo era quello di verificare l'adeguatezza dei codici e in particolare di CATHARE nel calcolare le perdite di pressione distribuite e nel determinare i suoi limiti nella valutazione delle perdite di pressione concentrate.

In Figura 27 sono riportati i grafici delle perdite di pressione cumulate valutate da CATHARE e confrontate con i risultati di RELAP5 e dei dati sperimentali in condizioni stazionarie isoterme di 250°C con portate di 13.57 kg/s e 3.27 kg/s.

E' importante sottolineare che le perdite di pressione distribuite e concentrate del modello CATHARE sono le medesime utilizzate e ottimizzate per le simulazioni con il codice RELAP5 [20]. Le perdite di pressione cumulate partono dal downcomer e passano attraverso tutti i componenti del loop HELIOS. Le maggiori perdite di pressione si trovano sul core e su un orifizio di misurazione della portata. Il salto di pressione finale è infine dovuto alla prevalenza della pompa.

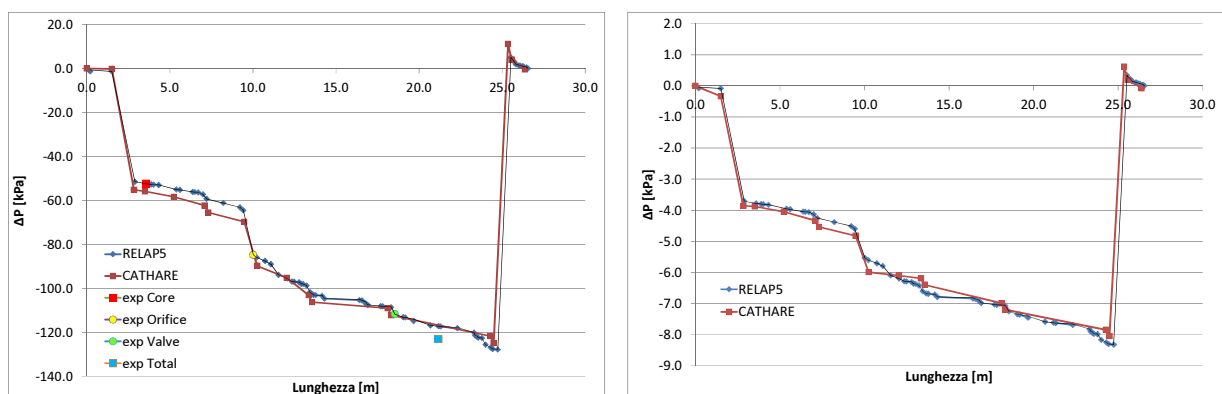


Figura 27 – Perdite di pressione cumulate con portata di 13.57 e 3.27 kg/s di LBE.

I risultati ottenuti sono molto buoni e le piccole discrepanze sono dovute anche a piccole differenze tra le metodologie di nodalizzazione di RELAP5 e di CATHARE. Ciò che può essere notato è una buona capacità di valutazione delle perdite di carico concentrate che risultano confrontabili con quelle di RELAP5, ma anche una generale sottostima delle perdite di pressione distribuite.

Oltre a queste simulazioni in circolazione forzata, data la mancanza di dati sperimentali della seconda fase, nello stesso ambito erano state effettuate alcune valutazioni sul funzionamento in circolazione naturale, in cui al variare della potenza prodotta dalle barre si andava a valutare la portata in condizioni stazionarie (vedi Figura 28). Attraverso il confronto diretto codice a codice si era evidenziata una generale sovrastima delle portate calcolate da CATHARE rispetto quelle di RELAP5 dell'ordine di 10÷15%.

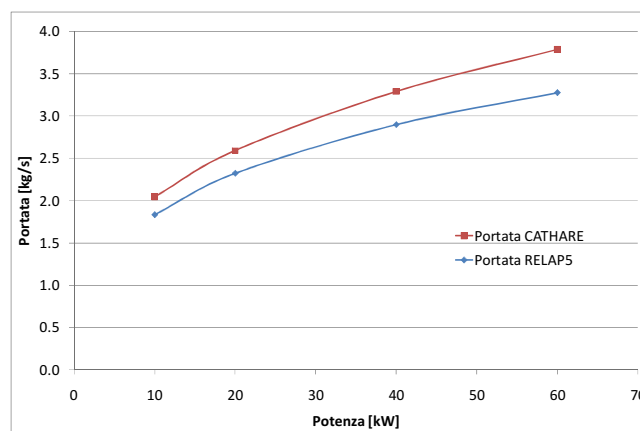


Figura 28 – Portata di circolazione naturale in funzione della potenza prodotta.

Per ulteriori dettagli riguardo questa prima fase di validazione di CATHARE si rimanda al riferimento [4].

Un primo set di dati necessari per il completamento dalla seconda parte del benchmark sono stati resi noti recentemente, anche se hanno carattere preliminare. Nel seguito verranno presi in considerazione tre test a diversa potenza: 13.89 kW, 17.7 kW e 10.18 kW. Il circuito secondario, raffreddato a olio è caratterizzato da una portata imposta di 0.12 kg/s e una temperatura costante in ingresso allo scambiatore. Nella seguente Tabella 6, sono riassunte le principali rilevazioni sperimentali dei test considerati.

Tabella 6 – Dati sperimentali test LACANES in circolazione naturale.

		Test 1	Test 2	Test 3
Primary Loop: LBE	Core Heat [kW]	13.89	17.7	10.18
	Hotleg Temperature [°C]	304	302	293
	Coldleg Temperature [°C]	255	253	244
	Mass Flowrate [kg/s]	1.95	NA	1.41
Secondary Loop: OIL	Inlet/Outlet Temperature [°C]	62/114	62/NA	58/108
	Mass Flowrate [kg/s]	0.12	0.12	0.12

Il raggiungimento degli stati stazionari in circolazione naturale avviene sperimentalmente attraverso un transitorio a partire da condizioni isoterme a 250°C in circolazione forzata e con i riscaldatori lungo il loop funzionanti. I riscaldatori servono a compensare le perdite di calore

verso l'esterno. Il transitorio comincia con lo spegnimento della pompa del circuito primario e l'apertura delle valvole del ramo di bypass, e contemporaneamente con lo spegnimento dei riscaldatori, l'accensione delle barre del core e l'avvio della pompa del circuito ad olio.

La sequenza di raggiungimento dello stato stazionario non può essere simulata dal codice CATHARE, data l'impossibilità di simulare l'olio come fluido termovettore. Il circuito secondario, infatti, è stato modellato solo tramite una condizione di scambio termico con l'ambiente esterno, imponendo il flusso termico. Questa informazione, non fornita nell'ambito del benchmark, è stata derivata dalle simulazioni RELAP5 in cui è possibile simulare il circuito secondario ad olio.

Quello che ci si aspetta è una conferma della capacità del codice CATHARE di simulare il comportamento termoidraulico di un circuito a LBE in circolazione naturale.

6.2. Modifiche alla nodalizzazione

Tra le future attività di sviluppo del codice CATHARE, uno dei principali desiderata è sicuramente l'implementazione delle proprietà termodinamiche di un olio come fluido termovettore, sia per il suo largo impiego in facility sperimentali sia perché è stato preso in considerazione come fluido secondario per i sistemi di sicurezza passivi di reattori evolutivi. Ad esempio, per il reattore EFIT (European Facility for Industrial Transmutation) di tipo ADS veniva usato nel sistema passivo di rimozione del calore residuo (DHR – Decay Heat Removal System) ed il suo utilizzo continua ad essere valutato in altri progetti.

L'assenza di oli come fluidi in CATHARE porta a dover fare delle semplificazioni nel modello da utilizzare per le simulazioni in circolazione naturale. La principale riguarda lo scambiatore di calore. In Figura 29 è riportato un confronto tra vecchia e nuova nodalizzazione dello scambiatore, con l'avvertenza che la zona di scambio coincide con il tratto verticale superiore.

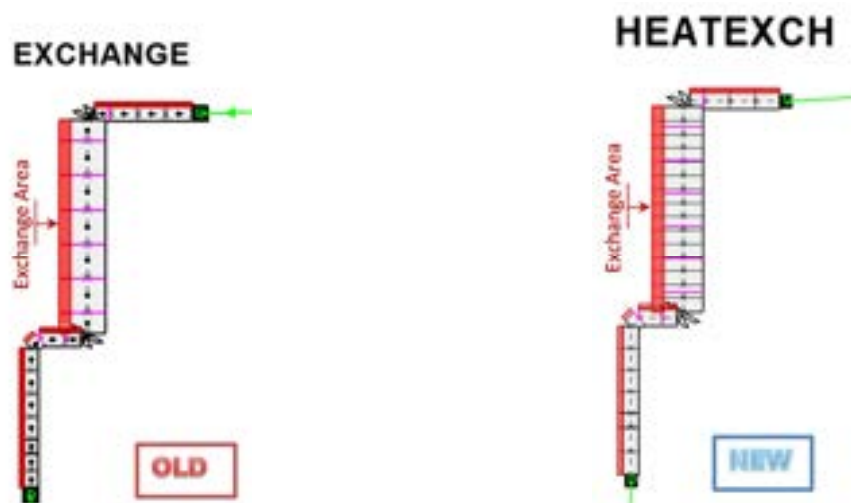


Figura 29 – Confronto tra vecchio e nuovo scambiatore di calore.

La meshatura precedente e successiva è rappresentativa delle linee/tubazioni di ingresso e uscita. Il precedente modello, presentato in [4], era piuttosto grossolano e caratterizzato da

una dimensione della mesh di 30 cm nella zona di scambio, coincidente con il passo delle griglie distanziatrici (sei) in cui erano state poste le perdite di carico concentrate.

Per sfruttare le informazioni fornite dai risultati delle simulazioni RELAP5, la meshatura della regione di scambio è stata infittita e resa comparabile a quella del modello RELAP ed ora è composta da 15 mesh. Per preservare la localizzazione delle perdite concentrate sono stati definiti punti vettoriali ad-hoc in cui collocare i k-factors mantenendo il passo di 30 cm.

Sulla struttura termica di scambio sono stati imposti i flussi termici, mesh per mesh, derivati dalle simulazioni RELAP5. In questo caso, l'ambiente esterno fa le veci del circuito secondario, non simulabile con CATHARE.

Grazie alla soluzione del problema riscontrato nel trattamento dei volume con pelo libero è stato possibile semplificare la zona del vaso di espansione con un unico volume come mostrato in Figura 30. A questo è imposto il livello di separazione tra le fasi, la presenza di solo incondensabile (Argon) nella fase gassosa e la pressione atmosferica con la boundary condition EXTP.

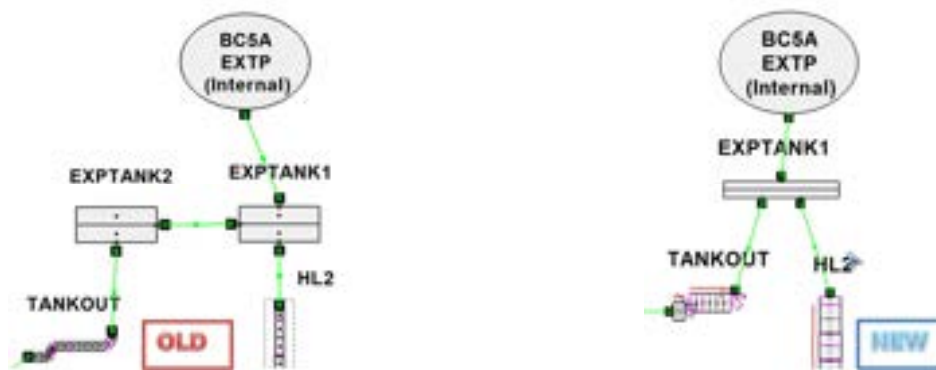


Figura 30 – Confronto tra vecchio e nuovo vaso di espansione.

Nella seguente Figura 31 è riportata una vista di insieme della nodalizzazione del loop HELIOS per lo studio in circolazione naturale, il ramo della pompa in questo caso non viene simulato.

Il volume DWCVOL e l'axial DWNCOMER rappresentano il downcomer, seguono il volume LOWPLEN lower plenum, il CORE, dove sono state descritte le strutture termiche delle barrette scaldanti e l'upper plenum UPLE. Segue il ramo caldo delle tubazioni (hot leg), HL1, CHICANE, GVALV1 e HL2. L'elemento GVALV, ricorrente lungo il loop, è rappresentativo di gate valve. Continuando il percorso del loop, si trovano il vaso di espansione EXPTANK1 e la linea che porta allo scambiatore di calore TANKOUT, lo scambiatore HEATEXCH, e per finire il ramo freddo (cold leg) composto da DWNLIN e PUMPLOUT che chiude il circuito. Il sistema è stato considerato adiabatico, per cui non sono state prese in considerazione le perdite di calore verso l'esterno, anche in considerazione del fatto che eventuali perdite siano compensate dai riscaldatori di calore situati lungo il loop. Questa considerazione potrebbe non essere realistica durante la fase transitoria che precede il raggiungimento dello stazionario in circolazione naturale. In questa fase, come già detto, i riscaldatori vengono spenti per cui una certa parte di calore disperso dal sistema, non compensato dagli heaters, potrebbe avere un certo peso nei risultati ottenuti.

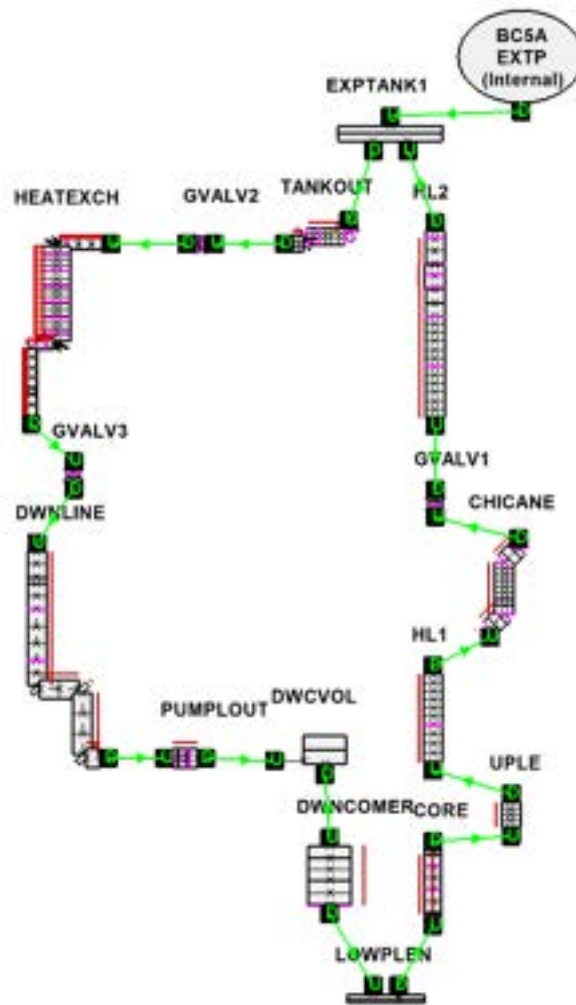


Figura 31 – Schema della nuova nodalizzazione di HELIOS in circolazione naturale.

6.3. Risultati

Le simulazioni con CATHARE, come già evidenziato nella descrizione dei transitori NACIE, sono composte da una fase di inizializzazione di tutto il circuito a cui segue una fase di stabilizzazione e regolazione e per finire una fase transitoria. Di seguito sarà preso in considerazione, come caso di riferimento, il test 1 a potenza di 13.89 kW. Gli altri test sono condotti con la stessa metodologia, ma con piccole variazioni.

Durante la fase di inizializzazione sono state imposte le condizioni in ingresso al primo elemento considerato nel loop TANKOUT, in questo la pressione, le temperature del liquido e del gas (anche se è solo una fase residua), le velocità di liquido e gas sono imposte nella giunzione in uscita dal vaso di espansione. Inoltre sono imposti il livello del pelo libero nel TANK e la presenza di solo incondensabile nella fase gassosa. Le barre scaldanti in questa fase sono spente e il flusso di calore dell'heat exchanger è posto nullo.

Dopo la fase di inizializzazione, segue la fase di regolazione/stabilizzazione. In questa fase, suddivisibile in ulteriori fasi, viene dapprima avviata la generazione di potenza delle barre nel core e vengono sfruttate le strutture termiche della hot leg per disperdere il calore generato, facendo quindi le veci dello scambiatore propriamente detto. Per fare ciò è stato posto un

elevato coefficiente di scambio verso l'esterno e la temperatura ambiente posta alla temperatura di uscita dal core attesa nei test (nel caso del primo test si avrà una temperatura di 304.4 °C). Dopo questa prima fase della durata di 1000 s, viene abbattuto il coefficiente di scambio della hot leg e si impongono i flussi termici derivati dalle simulazioni RELAP5, mesh per mesh, per ulteriori 500 s di simulazione. Da qui si parte con la fase di regolazione vera e propria, che termina a 20000 s di evoluzione, in cui si regolano i valori dei flussi termici tramite un controllo proporzionale sulla temperatura in uscita dal core (gli stessi 304.4 °C). Tutto questo è necessario per raggiungere le condizioni di flusso termico desiderate alla temperatura desiderata. L'imposizione della temperatura si rende necessaria proprio per l'impossibilità di simulare il circuito secondario a olio e quindi di effettuare un transitorio con le stesse condizioni al contorno di quello sperimentale.

L'ultima fase della simulazione consta di ulteriori 5000 s in cui si interrompe la regolazione e si impongono di nuovo i flussi termici derivati da RELAP5 allo scambiatore, al fine di verificare il raggiungimento di uno stato stazionario stabile.

Il test 1, relativo alla potenza prodotta di 13.89 kW, è stato impiegato come caso di riferimento per il settaggio del modello di simulazione. Per rendere i risultati confrontabili, è stato deciso di imporre come temperatura di regolazione, la temperatura sperimentale in uscita dal core. Come già esplicitato, al termine della fase di regolazione, sono stati imposti di nuovo i flussi termici derivati da RELAP5 constatandone la totale uguaglianza rispetto a quelli relativi alla fase terminale di regolazione. Data la provata affidabilità del metodo di regolazione, i successivi test analizzati, non disponendo della caratterizzazione dei flussi termici di RELAP5, non contempleranno questa ultima fase di simulazione.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i confronti tra i dati sperimentali e i risultati ottenuti dalle simulazioni RELAP5 e CATHARE.

Tabella 7 – Confronto dei risultati del Test 1 (13.89 kW).

TEST 1	Hotleg Temperature [°C]	Coldleg Temperature [°C]	Mass Flowrate [kg/s]
EXPERIMENTAL	304.4	255.3	1.95
RELAP5	304.3	259.1	2.09
CATHARE	304.4	263.6	2.33

Tabella 8 – Confronto dei risultati del Test 2 (17.7 kW).

TEST 2	Hotleg Temperature [°C]	Coldleg Temperature [°C]	Mass Flowrate [kg/s]
EXPERIMENTAL	302.0	253.0	2.46
RELAP5	376.9	321.7	2.25
CATHARE	302.0	254.2	2.53

Tabella 9 – Confronto dei risultati del Test 3 (10.18 kW).

TEST 3	Hotleg Temperature [°C]	Coldleg Temperature [°C]	Mass Flowrate [kg/s]
EXPERIMENTAL	293.0	244.0	1.41
RELAP5	245.1	207.6	1.88
CATHARE	293.0	259.8	2.10

Dalle tabelle di confronto, si nota che in tutti i test analizzati la portata di circolazione naturale valutata dal codice CATHARE risulta sovrastimata rispetto a quella di RELAP5 del 12% circa. Questo fatto conferma i risultati ottenuti nelle precedenti valutazioni del documento [4], in cui le portate valutate a differenti potenze risultavano sovrastimate del 10÷15%.

Dalla Tabella 7 è anche possibile evidenziare come la stima di CATHARE rispetto ai dati sperimentali risulti superiore del 20%.

Sebbene i risultati di CATHARE dimostrino una certa coerenza rispetto a quelli ottenuti con RELAP5, ciò non è più vero nel confronto con i dati sperimentali. Riferendosi al test a potenza 17.7 kW, vedi Tabella 8, la portata sperimentale, non essendo resa disponibile, è stata valutata attraverso un bilancio termico. Rispetto al valore di 2.46 kg/s, la portata di CATHARE risulta superiore del 3% e quella valutata da RELAP5, addirittura sottostimata. Riferendosi poi al test 3 di Tabella 9 a potenza 10.18 kW, la sovrastima della portata di RELAP5 risulta del 33% mentre quella di CATHARE del 50%. Anche in questo caso, le minori temperature medie di RELAP non incidono sulla stima di portata.

Nel secondo e terzo test, le temperature valutate da RELAP5 sono rispettivamente superiori di circa 70 °C e inferiori di circa 50°C, questo è dovuta probabilmente a una non ottimizzata sequenza di transitorio, in cui l'equilibrio tra potenza prodotta nel core ed estratta nello scambiatore si ottiene in un momento successivo o precedente rispetto a quello sperimentale, dando al sistema il tempo di aumentare o diminuire la sua temperatura media. Nonostante le temperature medie valutate da RELAP5 siano molto differenti da quelle sperimentali, questo non è sufficiente a spiegare la differente portata stimata, dato che per il LBE la densità è una funzione lineare della temperatura, la portata in circolazione naturale è solo funzione principalmente della differenza di temperatura tra hotleg e coldleg.

In base alle evidenze sperimentali, si può però notare come le differenze di temperatura tra ingresso e uscita core sia di 49°C in tutti i test considerati nonostante le differenti potenze prodotte. Una spiegazione possibile è che in realtà la generazione della totalità della potenza non abbia luogo solo nel core ma che i riscaldatori lungo il loop contribuiscano al raggiungimento del valore nominale di potenza. In altre parole, che le temperature rilevate non siano rappresentative delle temperature medie di hotleg e coldleg. Un'altra possibile spiegazione è che nel loop sperimentale vi siano dispersioni termiche non prese in considerazione nel modello numerico.

I gestori del loop sperimentale, consci di questa discrepanza tra potenza generata e differenza di temperatura in ingresso e uscita core, per ora hanno limitato le possibilità a un cambiamento delle dispersioni di calore tra i test, oppure a brusche variazioni della driving force in circolazione naturale o più semplicemente a errori di misurazione. Prima della conclusione del benchmark LACANES, provvederanno a fornire il set completo di dati sperimentali in circolazione naturale e la loro giustificazione.

7. CONCLUSIONI

La presente attività ha riguardato lo sviluppo e la validazione del codice termoidraulico di sistema CATHARE modificato per il trattamento dei metalli liquidi pesanti, piombo e lega eutettica piombo-bismuto (LBE). Lo studio si è svolto attraverso il confronto con dati sperimentali provenienti da due circuiti integrali: NACIE (NATural Circolation Experiment) presente al laboratorio ENEA-Brasimone e HELIOS (Heavy Eutectic liquid metal Loop for Integral test of Operability and Safety of PEACER) della Seoul National University.

Il modello di NACIE per CATHARE è stato sviluppato e testato ottenendo buoni risultati. Le portate di metallo liquido e le temperature lungo il loop sono state adeguatamente valutate nel funzionamento in circolazione naturale, soprattutto nel funzionamento a regime. Permangono alcuni limiti nella simulazione delle condizioni iniziali di prova e delle situazioni transitorie di avvio della potenza, che richiederebbero una migliore conoscenza delle condizioni di prova. Ad esempio, la potenza fornita dai riscaldatori posti lungo il loop, i tempi di risposta del sistema alle variazioni di potenza da essi forniti sui principali componenti, fermo restando l'affidabilità delle condizioni al contorno del circuito secondario, sono tutti fattori che contribuirebbero a un migliore affinamento del modello e a più precise simulazioni.

Non è stato possibile simulare i test in circolazione assistita attraverso l'iniezione di gas a causa di limiti intrinseci riscontrati nel trattamento degli incondensabili da parte di CATHARE. La soluzione di questo problema, noto al team di sviluppo del codice, è in agenda.


Il modello di HELIOS, sviluppato in precedenti attività, è stato migliorato ma a causa della mancanza dell'olio come fluido di processo in CATHARE, il circuito secondario è stato simulato con le condizioni di scambio termico ottenuto da simulazioni con il codice RELAP5. Le portate di circolazione naturale valutate a differenti potenze sono risultate superiori del 12% rispetto alle rispettive simulazioni con RELAP5 e del 20% rispetto i dati sperimentali. Alcune incongruenze nelle rilevazioni sperimentali dovranno in futuro essere chiarite dai gestori dell'impianto nell'ambito del benchmark internazionale LACANES. Il modello di HELIOS, le cui perdite di carico erano state ottimizzate per le simulazioni con RELAP5, dovrà essere ricalibrato con l'introduzione di perdite di carico ad-hoc per CATHARE.

Grazie all'interazione avuta con il team di sviluppo di CATHARE, nell'ambito dell'attività è stato possibile risolvere alcuni problemi rilevanti per le simulazioni di sistemi a metallo liquido. Innanzitutto ora è possibile simulare volumi con peli liberi già formati in fase di inizializzazione, inoltre ora è possibile utilizzare differenti correlazioni di scambio termico specifiche per tali tipi di sistema e per particolari geometrie, come ad esempio in presenza di rod-bundle scaldante.

Tutti i limiti di CATHARE sin qui riscontrati non sembrano comunque in grado di porre un freno all'impiego del codice in future attività riguardanti gli impianti di IV generazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Geffraye et al., "CATHARE 2 V2.5_2 : a Single Version for Various Applications," *Proceeding of NURETH-13, Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, Sept 27th-Oct 2nd, 2009*.
- [2] OECD/NEA, "Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-Hydraulics and Technology," ISBN 978-92-64-99002-9, 2007.
- [3] M. Polidori, "Implementation of Thermo-Physical Properties and Thermal-Hydraulic Characteristics of Lead-Bismuth Eutectic and Lead on CATHARE Code," *Rapporto Tecnico ENEA, NNFISS – LP1 - 001*, 2010.
- [4] A. Cervone, S. Manservigi, M. Polidori, and P. Meloni, "Valutazione e modifica del codice termoidraulico di sistema ATHARE applicato a metalli liquidi pesanti e ai dati sperimentali del benchmark LACANES ," Bologna, CIRTEN-UNIBO RL 1303/2010, 2010.
- [5] F.S. Nitti and P. Meloni, "RELAP5 Code Validation in the Framework of the LACANES OECD/NEA Benchmark for HLM Innovative Nuclear System," *Proceeding NUTHOS8, Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety*, Shanghai, China, October 10-14, 2010.
- [6] CEA, "CATHARE2 V2.5_1 : User's Guidelines," *DER/SSTH/LDAS/EM/2005-034* , Febbraio 2006.
- [7] CEA, "GUTHARE User's Dictionary Guide," *DTS/OCC/OC2D07043/003/V0M2*.
- [8] CEA, "CATHARE 2 V2.5_2mod5.1: Dictionary of Directives and Operator ," *DEN/CAD/DER/SSTH/LDLD/EM/NT/2010-024/A* , Maggio 2010.
- [9] M. Tarantino et al., "Heavy Liquid Metal Natural Circulation in a One-Dimensional Loop," *17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE-17, Brussels, Belgium, July 12-16, 2009*.
- [10] W. Ambrosini, G. Forasassi, N. Forgiione, F. Oriolo, and M. Tarantino, "Experimental study on combined natural and gas-injection enhanced circulation," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 235, no. 10-12, p. 1179–1188, 2005.
- [11] W. Ambrosini, G. Forasassi, N. Forgiione, F. Oriolo, and M. Tarantino, "Natural and Gas-injection Enhanced Circulation in a Loop with Variable Friction," *International Conference on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plants, GENES4/ANP2003*, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan, September 15-19, 2003.
- [12] G. Benamati et al., "Experimental study on gas-injection enhanced circulation performed with the CIRCE facility," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 237, no. 7, pp. 768-777, 2007.
- [13] Tarantino M., "Gas Enhanced Circulation Experiments On Heavy Liquid Metal System," *Report ENEA HS-F-R-001*, 2007.
- [14] K. Rehme, "Pressure drop correlations for fuel element spacers," *Nuclear Technology Review*, vol. 17, January 1973.
- [15] S.H. Jeong, "Development of an Integral Test Loop, HELIOS and Investigation of Natural Circulation Ability for PEACER," *Nuclear Engineering Department*, Seoul


 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP3 - 017	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 44	di 46
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

National University, Seoul 2006.

- [16] Agency O.N.E., "Benchmarking of thermal-hydraulic loop models for Lead-alloy cooled advanced nuclear energy systems (LACANES) - Task Guideline for Phase 1: Characterization of HELIOS," 2007.
- [17] I. S. Hwang, B. G. Park, W. S. Yang, K. Y. Suh, and C. H. Kim, "The concept of proliferation-resistant, environment-friendly, accident-tolerant, continual and economical reactor (PEACER)," *Progress in Nuclear Energy*, 37(1-4) 2000.
- [18] S. H. Jeong et al., "Operation Experience of LBE loop: HELIOS," Proceeding of ICAPP06 2006.
- [19] J. Lim et al., "Progresses in the Operation of Large Scale LBE Loop HELIOS," Proceeding of ICAPP07, Nice, France 2007.
- [20] I.E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd ed.: Jaico Publishing House, 2003.

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 – GUITARE, interfaccia grafica di CATHARE.	5
Figura 2 – modulo 1-D	6
Figura 3 – modulo 0-D	7
Figura 4 – Accoppiamento tra pareti in geometria cilindrica e fluido.	8
Figura 5 – Mappa dei regimi di moto in CATHARE	9
Figura 6 – Termini di trasferimento della massa e dell'energia.	9
Figura 7 – Configurazione loop NACIE.	14
Figura 8 – Schema della regione scaldante di NACIE.	15
Figura 9 – Sezione orizzontale e foto del bundle di NACIE.	15
Figura 10 – Schema dello scambiatore di calore e vista del giunto ad espansione.	17
Figura 11 – Portata e temperature attraverso la sezione scaldante in circolazione naturale (test 21).	19
Figura 12 – Velocità dell'LBE e numero di Reynolds attraverso la sezione scaldante (test 21).	19
Figura 13 – Temperature di parete misurate a diverse quote (test 22).	20
Figura 14 – Portata di LBE e gas, e temperature attraverso la sezione scaldante in circolazione assistita (test 12).	20
Figura 15 – Velocità dell'LBE e numero di Reynolds attraverso la sezione scaldante (test 12).	21
Figura 16 – Temperature di parete misurate a diverse quote, in circolazione assistita (test 9).	21
Figura 17 – Schema del modello NACIE per CATHARE.	23
Figura 18 – Potenza prodotta, temperatura in ingresso e portata del secondario (test 3).	28
Figura 19 – Portata di LBE e temperature ingresso/uscita core (test 3).	29
Figura 20 – Potenza prodotta, temperatura in ingresso e portata del secondario (test 2).	30
Figura 21 – Portata di LBE e temperature ingresso/uscita core (test 2).	30
Figura 22 – Potenza prodotta, temperatura in ingresso e portata del secondario (test 19).	31
Figura 23 – Portata di LBE e temperature ingresso/uscita core (test 19).	31
Figura 24 – Potenza prodotta, temperatura in ingresso e portata del secondario (test 21).	32
Figura 25 – Portata di LBE e temperature ingresso/uscita core (test 21).	33
Figura 26 – Schema 3D di HELIOS con posizionamento della strumentazione.	35
Figura 27 – Perdite di pressione cumulate con portata di 13.57 e 3.27 kg/s di LBE.	35
Figura 28 – Portata di circolazione naturale in funzione della potenza prodotta.	36
Figura 29 – Confronto tra vecchio e nuovo scambiatore di calore.	37
Figura 30 – Confronto tra vecchio e nuovo vaso di espansione.	38
Figura 31 – Schema della nuova nodalizzazione di HELIOS in circolazione naturale.	39

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 017	0	L	46	46

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 – Principali dati geometrici di NACIE.	14
Tabella 2 – Caratteristiche delle barre scaldanti di NACIE.	15
Tabella 3 – Altezza e posizione azimutale delle termocoppie installate nella regione attiva.	16
Tabella 4 – Dimensioni dei tubi dello scambiatore NACIE.	17
Tabella 5 – Matrice di prova	18
Tabella 6 – Dati sperimentali test LACANES in circolazione naturale.	36
Tabella 7 – Confronto dei risultati del Test 1 (13.89 kW).	40
Tabella 8 – Confronto dei risultati del Test 2 (17.7 kW).	40
Tabella 9 – Confronto dei risultati del Test 3 (10.18 kW).	40