



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Revisione della validazione del codice T/H CATHARE2 attraverso il benchmark LACANES

Massimiliano Polidori

Report RdS/PAR2014/214

PRE-TEST CFD ANALYSIS OF THE ROD BUNDLE EXPERIMENTI IN THE HLM FACILITY NACIE-UP

R. Marinari, I. Di Piazza - ENEA

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Linea: Collaborazione internazionale per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Termoidraulica del refrigerante

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Titolo
**Revisione della validazione del codice T/H CATHARE2
attraverso il benchmark LACANES**
Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Termoidraulica dei reattori nucleari
 Reattori e sistemi innovativi
 Sicurezza nucleare

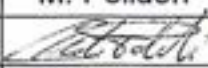
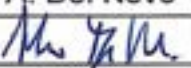
Sommario

Il presente documento è stato preparato nel corso della terza annualità dell'Accordo di Programma tra ENEA e Ministero dello Sviluppo Economico all'interno dell'obiettivo C (Termoidraulica del Refrigerante), Task C1 (Sperimentazione e modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi) della Linea Progettuale LP2 (Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione). Nel documento viene presentata una revisione a parziale completamento dell'attività di validazione del codice termoidraulico di sistema CATHARE, modificato per la simulazione di sistemi refrigerati a metallo liquido pesante (piombo e piombo-bismuto), che ha avuto inizio nelle precedenti annualità dell'AdP. In particolare, è stata testata l'ultima versione del codice CATHAREv2.5_3mod2.1, la prima versione provvista nativamente delle proprietà termodinamiche degli HLM, rilasciata ufficialmente dal team di sviluppo. La validazione è stata eseguita con nuovi dati provenienti dalle campagne sperimentali svolte sulle facility HELIOS (South-Korea) e fornite all'interno del benchmark internazionale LACANES, e NACIE (Brasimone), questi ultimi entrati a far parte del benchmark in un secondo momento. La revisione è limitata alla capacità del codice nel riprodurre test integrali in circolazione naturale, anche in confronto con simulazioni RELAP5, che è il codice impiegato ufficialmente da ENEA all'interno del benchmark LACANES.

Note:
Autore:

M. Polidori (ENEA)

Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	15/09/15	NOME	M. Polidori	A. Del Nevo	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 46
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

INDICE

INDICE	2
1. INTRODUZIONE	3
2. IL CODICE TERMOIDRAULICO DI SISTEMA CATHARE	4
2.1. Generalità	4
2.2. Stato del processo di validazione di CATHARE	5
3. IL BENCHMARK LACANES	7
4. VALIDAZIONE CON DATI HELIOS	9
4.1. Descrizione della facility HELIOS.....	9
4.2. Nuovi dati sperimentali	10
4.3. Il modello di HELIOS per RELAP5	11
4.4. Il modello di HELIOS per CATHARE	14
4.5. Risultati.....	15
5. VALIDAZIONE CON DATI NACIE.....	19
5.1. Descrizione della facility NACIE	19
5.2. La campagna sperimentale NACIE.....	23
5.3. Il modello NACIE per CATHARE	30
5.4. Risultati della simulazione dinamica del Test 301.....	37
6. CONCLUSIONI.....	40
BIBLIOGRAFIA	42
LISTA DELLE FIGURE.....	44
LISTA DELLE TABELLE	45
LISTA DEGLI ACRONIMI	46

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 3	di 46
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

1. INTRODUZIONE

I sistemi nucleari innovativi raffreddati da lega eutettica piombo-bismuto (LBE) e a piombo sono oggetto d'interesse nell'ambito della ricerca internazionale, come evidenziano il gran numero di progetti in corso. Nell'ambito 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 (PAR 2010), 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 il sodio [1]. Inoltre, CATHARE fa parte di una piattaforma di simulazione europea che comprende codici CFD (Computational Fluid Dynamics), codici termomeccanici e neutronici, che in prospettiva dovrebbe diventare un riferimento per gli studi di sicurezza anche per i reattori innovativi di IV generazione.

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. In effetti, nel mese di Luglio 2015 è stata rilasciata una nuova versione dell'Handbook [3] in cui le proprietà termodinamiche dei metalli liquidi sono state ritoccate. Queste non saranno attualmente prese in considerazione per questioni di budget, ma l'aggiornamento del codice CATHARE potrebbe essere oggetto di valutazione nelle prossime annualità dell'Accordo di Programma ENEA/MSE.

Per quanto riguarda il dettaglio delle modifiche apportate al codice si rimanda al riferimento [4].

All'interno della stessa annualità, e nelle successive, ha avuto inizio l'attività di verifica e validazione del codice modificato attraverso il confronto con dati sperimentali forniti all'interno del benchmark internazionale LACANES, in cui ENEA partecipa con il codice RELAP5 [5].

Nella prima fase, sono stati impiegati dati sperimentali provenienti dalla facility Sudcoreana HELIOS [6], in cui CATHARE ha dimostrato buone capacità di simulazione sia in convezione forzata che naturale, con una leggera tendenza a sovrastimare fino al 10% le portate in circolazione naturale rispetto a quelle rilevate da RELAP5.

Nella seconda fase (seconda annualità del PTR 2012-2014), sono stati impiegati i dati provenienti da una recente campagna sperimentale svolta sulla facility NACIE presso i laboratori ENEA Brasimone [7], condotti al fine di testare un nuovo misuratore di flusso (flowmeter) a induzione per metalli liquidi. In particolare è stata utilizzata l'ultima versione del codice, CATHAREv2.5_3mod2.1, che è la prima versione provvista nativamente delle proprietà termodinamiche degli HLM rilasciata ufficialmente dal team di sviluppo. In questo caso CATHARE ha mostrato una generale sovrastima delle perdite di carico in confronto a RELAP5, ma anche una sovrastima della portata in circolazione naturale, parzialmente giustificata dalla differente implementazione delle proprietà termodinamiche in RELAP5 (Soft-Sphere Model). Nella simulazione dinamica, CATHARE si è dimostrato capace di approssimare sia qualitativamente sia quantitativamente gli andamenti delle principali grandezze fisiche rilevate durante il transitorio (Test 301).

Nella presente annualità dell'Accordo di Programma ENEA/MSE (terza annualità del PTR 2012-2014), proseguirà l'attività di validazione di CATHARE con nuovi dati in circolazione naturale provenienti dalla facility HELIOS, inoltre il modello e le simulazioni dei test NACIE saranno oggetto di revisione.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 4	di 46
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

2. IL CODICE TERMOIDRAULICO DI SISTEMA CATHARE

2.1. Generalità

CATHARE (Code for Analysis of Thermalhydraulics during an Accident of Reactor and safety Evaluation) [8] 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_3. Questa versione del codice multifluido [1], è la prima rilasciata all'interno dell'accordo con la possibilità di simulare sia reattori raffreddati a sodio sia alla simulazione di reattori nucleari innovativi raffreddati a metallo pesante. Infatti, questa è la prima versione che ingloba nativamente le caratteristiche dei metalli liquidi pesanti, piombo e lega eutettica piombo-bismuto [2] [4], che sono state implementate grazie ad uno specifico accordo di collaborazione ENEA/CEA (STC, Specific Topic of Cooperation). Il codice modificato è in fase di validazione e il presente documento rappresenta un contributo a questo processo.

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] [9].

I moduli principali sono: Axial (1-D), Volume (0-D), Threed (3D), Boundary Condition (BC). Per una più estesa descrizione dei moduli e del loro funzionamento, nonché delle equazioni e della soluzione fisica, si rimanda a [10].

Per la costruzione di modelli di simulazione, l'editing e il post-processing è disponibile anche un'interfaccia grafica chiamata GUITHARE [11] 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.

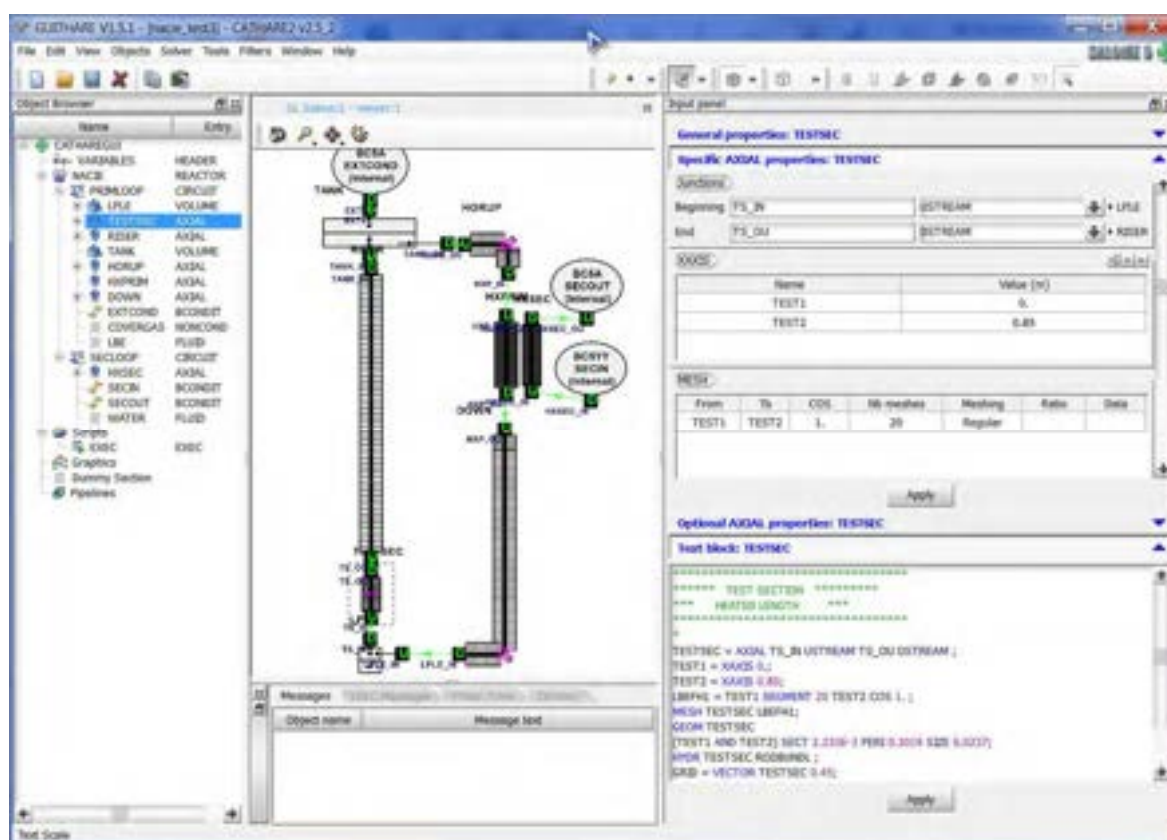


Figura 1 – GUITHARE, interfaccia grafica di CATHARE.

2.2. Stato del processo di validazione di CATHARE

Come già menzionato, le proprietà termofisiche di piombo e piombo-bismuto implementate in CATHARE provengono dall'Handbook OECD/NEA datato 2007 [2] in cui sono state raccolte 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 [4] 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 [6], 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

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFIS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 6	di 46
--	---	------------------	----------------------	------------------	-----------------

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. La validazione di CATHARE con i dati sperimentali in circolazione naturale di HELIOS sarà oggetto del presente documento.

I risultati ottenuti in circolazione forzata con CATHARE erano stati confrontati sia con i dati sperimentali che con le simulazioni 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 nella gestione 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.

In seguito, con il supporto del team CEA, si è 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 (Lev). Nel caso del piombo-bismuto:

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

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.

Attraverso le simulazioni dei test NACIE si è evidenziato come CATHARE abbia dimostrato una generale sovrastima delle perdite di carico, fino a +20% in circolazione naturale rispetto a RELAP5, nonostante in CATHARE non sia possibile prendere in considerazione una rugosità differente da 1 um (valore di default), e anche la leggera sovrastima della portata (+2%). Causa della discrepanza è da ricercare sia nella diversa implementazione delle proprietà termodinamiche dell'LBE, in particolare la densità in funzione della temperatura risultante in una maggiore driving-force stimata da CATHARE, sia nel diverso modo di calcolare le perdite di carico (argomento trattato al §7.2 di [12]. Nella simulazione dinamica di un test di spegnimento e seguente riaccensione della barra scaldante, CATHARE si è dimostrato capace di approssimare sia qualitativamente che quantitativamente gli andamenti delle principali grandezze fisiche rilevate durante il transitorio, con alcune differenze causate principalmente da incertezza sulle procedure di prova.

Ulteriori limiti presenti nel processo di validazione del codice CATHARE sono l'impossibilità di simulare una fase gassosa di incondensabile immersa nel fluido, che rende impossibile modellare la tecnica di gas-lifting presente in alcuni test di NACIE, e l'assenza dell'olio come fluido termovettore, che rende impossibile simulare correttamente il circuito secondario di HELIOS, raffreddato appunto a olio.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 7	di 46
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

3. IL 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:

- ❖ La validazione dei modelli termoidraulici attraverso attività di benchmark tra codici e con un set di dati sperimentali ben caratterizzati provenienti da facility integrali raffreddati con leghe metalliche,
- ❖ La definizione di linee guida per la quantificazione dei vari parametri utilizzati nella valutazione delle perdite di pressione e nel trasferimento di calore in sistemi raffreddati con leghe metalliche,
- ❖ L'identificazione di problematiche specifiche, sia nella modellazione sia nella preparazione dei test sperimentali sulle facility, che dovrebbero essere affrontate in future campagne sperimentali.

Le tipologie di codici impiegati fanno parte sia dei cosiddetti “codici di sistema”, a carattere prevalentemente monodimensionale, sia di tipo CFD, da impiegare per lo studio tri-dimensionale di sezioni specifiche delle facility.

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 costruito alla Seoul National University nel 2005 [13]. Il benchmark è stato suddiviso in due fasi:

- ❖ Fase I, relativa al funzionamento in circolazione forzata isoterma
- ❖ Fase II, relativa al funzionamento in circolazione naturale non-isoterma.

Tutti i test si riferiscono a condizioni stazionarie dell'impianto, tralasciando quindi lo studio delle fasi transitorie.

ENEA sta partecipando al benchmark con la propria versione dedicata ai metalli liquidi pesanti del codice RELAP5. In questo frangente, le informazioni relative all'impianto e i dati sperimentali conseguiti sono stati messi a disposizione per realizzare la validazione della versione del codice CATHARE modificata per il trattamento dei metalli liquidi pesanti.

Il principale risultato della Fase I già conclusa è stata la definizione di linee guida per il calcolo delle perdite di pressione in sistemi raffreddati a piombo-bismuto, conseguendo una migliore comprensione della modellazione delle perdite di carico concentrate e migliorando la qualità delle simulazioni numeriche [14].

Il benchmark è quindi proseguito con la Fase II, in cui la facility HELIOS è stata studiata in condizioni di circolazione naturale ed è stato effettuato un confronto tra le simulazioni dei vari codici e i dati sperimentali per test effettuati a 9.8, 15 e 18.9 kW. Le conclusioni sono di seguito riassunte:

- ❖ Si sono verificate elevate discrepanze nella valutazione delle temperature da parte di tutti i partecipanti, in particolare ad elevate potenze,
- ❖ I risultati ottenuti dai modelli di calcolo sono fortemente dipendenti dai parametri di trasferimento di calore nello scambiatore LBE/olio,
- ❖ Le discrepanze sono da attribuirsi principalmente alle perdite di calore del loop, non ben caratterizzate, che causano un comportamento della facility molto lontano dalle condizioni ideali di adiabaticità.

In conseguenza di ciò è stato deciso di sospendere temporaneamente la Fase II condotta con i test di HELIOS, rimandando a nuovi test a 15 kW da eseguire a valle di importanti interventi sulla facility, riguardanti l'isolamento termico e il sistema di preriscaldamento al fine di migliorare le condizioni di adiabaticità, e di sostituire l'olio Dowtherm RP del circuito secondario.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFIS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 8	di 46
--	---	------------------	----------------------	------------------	-----------------

I risultati conseguiti con il codice CATHARE con i dati sperimentali della fase I sia della fase II con dati riferiti alla facility HELIOS sono disponibili in [6].

Nel frattempo, il Working Group LACANES ha concordato di introdurre nel benchmark la facility NACIE e l'uso dei dati di una recente campagna sperimentale al fine di continuare l'investigazione sulle condizioni di circolazione naturale in sistemi raffreddati a metallo liquido. La campagna sperimentale in oggetto era finalizzata alla caratterizzazione di un nuovo flussimetro a induzione e i dati relativi sono stati gentilmente concessi dai colleghi dei Laboratori ENEA Brasimone. Il vantaggio di spostare l'oggetto della ricerca sui dati sperimentali NACIE è che questi dovrebbero fornire una maggiore confidenza dei dati HELIOS, dato che la facility:

- ❖ è piuttosto semplice e composta da tubi dritti senza valvole e pompe meccaniche, inoltre è raffreddato con acqua nel lato secondario;
- ❖ ha un miglior isolamento termico che rende il loop pressoché adiabatico;
- ❖ ha un'elevata coerenza tra il funzionamento in circolazione forzata e naturale, dato che non cambia la configurazione del loop (con questo si intende che non è presente un ramo di bypass della pompa come in HELIOS).

Cionondimeno, in attesa dell'upgrade programmato per la facility (NACIE-UP), la campagna sperimentale cui si fa riferimento ha alcune deficienze:

- ❖ non sono disponibili misure di pressione o differenza di pressione;
- ❖ non sono ben conosciute le proprietà termiche della polvere di acciaio posizionata nell'intercapedine tra circuito primario e secondario dello scambiatore di calore;
- ❖ sussiste un'notevole incertezza nelle portate misurate dal flussimetro a induzione, specialmente alle portate caratteristiche del funzionamento in circolazione naturale (circa 5 kg/s).

Le attività precedenti sulla facility HELIOS ci hanno dato l'opportunità di valutare l'approccio al calcolo delle perdite di carico in confronto con i dati sperimentali in convezione forzata isoterma. D'altro canto, i dati sperimentali hanno mostrato un alto livello di incertezza sulle perdite di calore, e anche sulla perdita di carico lungo la linea di bypass della pompa meccanica nei test a circolazione naturale.

Con i dati sperimentali provenienti da NACIE si è cercato di condurre un lavoro complementare, dato che le misure di perdite di pressione non sono disponibili, ma si ha una ragionevole fiducia circa le perdite di calore del loop verso l'esterno. Si procederà quindi con la caratterizzazione delle perdite di carico attraverso la simulazione di due test, uno in circolazione forzata (gas enhanced circulation) e uno in circolazione naturale da verificare con confronto tra codici di calcolo e con l'uso di dati sperimentali o bilanci termici (nel caso di circolazione naturale).

I test selezionati dalla matrice di prova di Tabella 9 sono:

- ❖ Test 301: circolazione naturale, potenza del bundle 21.5 kW
- ❖ Test 206: circolazione forzata (GEC) isoterma (il circuito secondario non è in funzione).

4. VALIDAZIONE CON DATI HELIOS

4.1. Descrizione della facility HELIOS

La facility coreana HELIOS (Heavy Eutectic liquid metal Loop for Integral test of Operability and Safety of PEACER), è un circuito integrale di LBE costruito alla Seoul National University nel 2005 [13].

Il loop HELIOS è una facility termoidraulica in scala del reattore PEACER-300 [15], 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 [16].

Il loop è alto 12 m con una differenza di elevazione di 7.4 m tra il pozzo freddo (heat exchanger) e la sorgente calda (core). La configurazione del loop è riportata in Figura 2 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 termovettore 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 due tubi paralleli.

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 [17] [18].

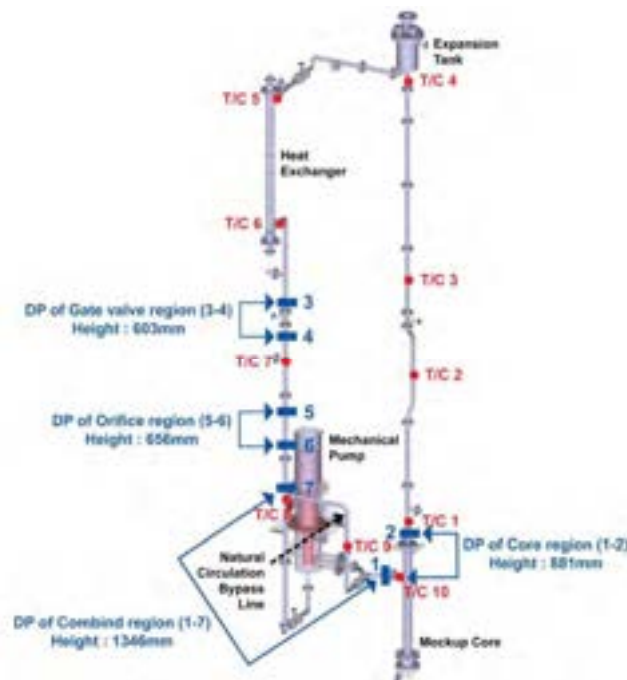


Figura 2 – Schema 3D di HELIOS con posizionamento della strumentazione.

4.2. Nuovi dati sperimentali

La prima parte della validazione di CATHARE riguardante lo studio in circolazione forzata era già stata oggetto di precedenti attività [6] 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 3 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 [19]. Le perdite di pressione cumulate partono dal downcomer (mockup core) 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.

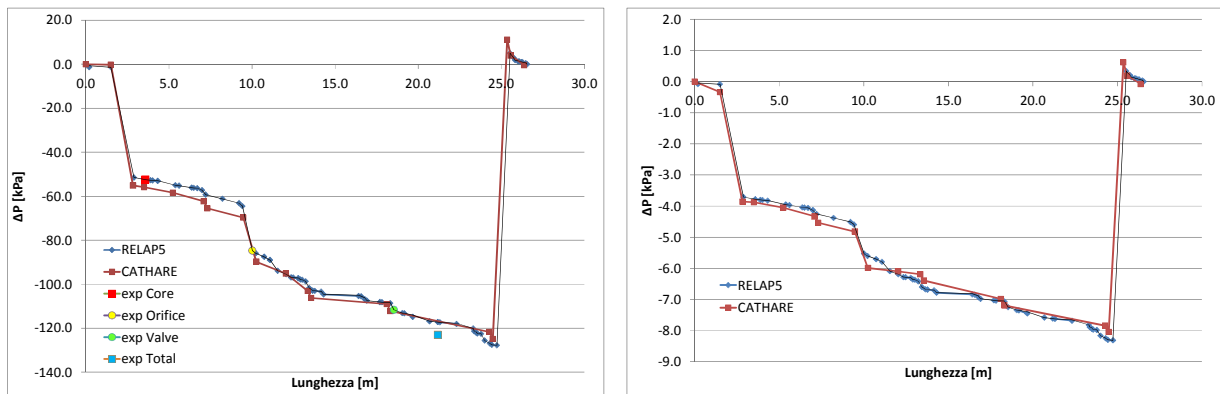


Figura 3 – Perdite di pressione cumulate con portata di 13.57 e 3.27 kg/s di LBE.

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 confronto diretto con RELAP5, evidenziano una generale sovrastima delle portate calcolate da CATHARE rispetto quelle di RELAP5 dell'ordine di 10÷15%.

Per ulteriori dettagli riguardo questa prima fase di validazione di CATHARE si rimanda al riferimento [6].

Dopo una prima parte della Fase II, in cui sono furono rilasciati dati provenienti da test in circolazione naturale a diverse potenze, apparvero evidenti alcune deficienze sui dati forniti, in particolare riguardo le perdite di calore, che richiedevano un intervento sull'impianto a livello di coibentazione e il sistema di preriscaldamento al fine di migliorare le condizioni di adiabaticità. Oltre questo, è stato sostituito anche l'olio Dowtherm RP del secondario. Infine, nuovi test a 15 kW e 9.8 kW sono stati rilasciati di recente e saranno impiegati qui per scopo di validazione del codice CATHARE.

I dati sperimentali sono riportati in Tabella 1 e Tabella 2.

Tabella 1 – Dati sperimentali test LACANES in circolazione naturale.

	Core power (kW)	Primary side mass flow rate (kg/s)	Secondary side oil		
			Inlet temperature (°C)	Outlet temperature (°C)	Mass flow rate (kg/s)
Case-I	15	2.39	113.6	130.2	0.29
Case-II	9.8	2.1	143.5	169.1	0.12

Tabella 2 – Temperature sperimentali test LACANES in circolazione naturale.

POSITION	T/C #	Accumulated length (m)	Case-I (15.0kW) temperature (°C)	Case-II (9.8kW) temperature (°C)
Core inlet	T/C1	0	268.8	257.4
Core outlet	T/C2	3.72	318.0	288.0
Chicane	T/C3	6.54	316.5	289.6
Riser middle	T/C4	9.47	315.1	292.4
Expansion tank	T/C5	10.88	315.8	293.9
HX inlet	T/C6	14.32	313.9	288.0
HX outlet	T/C7	16.52	266.5	260.0
Downcomer middle	T/C8	19.23	265.3	257.4
Bypass inlet	T/C9	21.42	263.1	259.5
Bypass middle	T/C10	22.65	270.4	258.5



Oltre a questi dati sperimentali, sono state fornite anche alcune indicazioni per la messa a punto dei modelli di calcolo, seguendo un approccio di tipo “calorimetrico”, basato sulla ricostruzione dei salti entalpici lungo tutto il circuito primario, siano essi perdite o guadagni di calore. Quest’ultimo caso è dovuto evidentemente all’azione dei riscaldatori posizionati all’esterno delle tubazioni con la funzione di compensare le perdite di calore.

4.3. Il modello di HELIOS per RELAP5

All’interno del benchmark LACANES, ENEA fa riferimento al codice di sistema RELAP5. Di seguito viene introdotto il modello usato nel benchmark perché funzionale alle simulazioni condotte con CATHARE. L’assenza di oli come fluidi in CATHARE porta a dover fare delle semplificazioni nel modello da utilizzare per le simulazioni non isoterme in circolazione naturale. Per ovviare a questo limite, i coefficienti di scambio termico LBE/olio ottenuti con RELAP5 saranno replicati sul modello CATHARE.

In Figura 4 è riportato lo schema della nodalizzazione per RELAP5. Il modello è monodimensionale da cui è possibile riconoscere tutti i componenti dell’impianto HELIOS. Le strutture termiche sono simulate, ossia tutte le tubazioni, le 4 canne scaldanti a simulare il core e lo scambiatore termico. La descrizione del lato secondario è limitata alla sezione di scambio tra piombo-bismuto e olio. Il secondario viene poi controllato attraverso boundary conditions per quanto riguarda la portata, la temperatura di ingresso e la pressione. La pompa meccanica è simulata attraverso una giunzione tempo-dipendente. Le perdite di carico distribuite sono calcolate dal codice (Colebrook-White con approssimazione di Zigrang-Sylvester), mentre le perdite di carico concentrate sono inserite nel modello dall’utente e provengono da calcoli e valutazioni condotte con correlazioni presenti in letteratura. Il testo di riferimento per il calcolo delle perdite di carico in sistemi idraulici è l’Handbook

Idelchik [19]. Le perdite di carico sono state calibrate nella prima fase del benchmark LACANES con test isoterma in circolazione forzata a diversa portata.

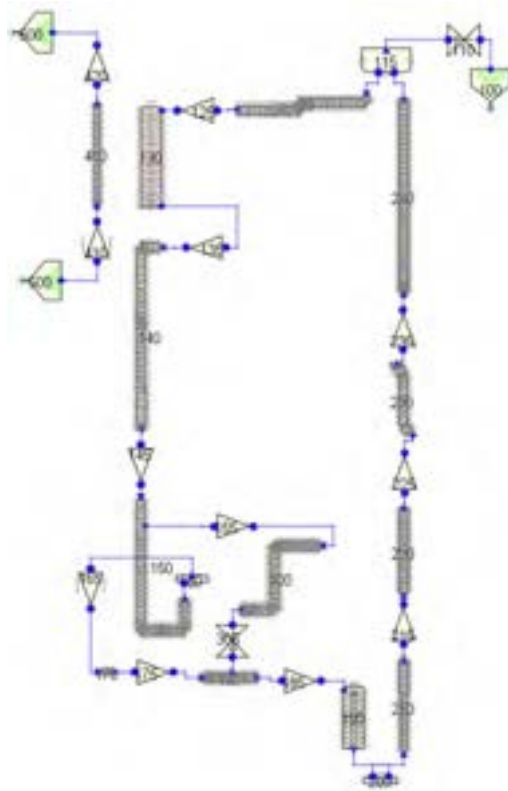


Figura 4 – Schema del modello di HELIOS per RELAP5.

Recentemente, le proprietà termodinamiche dei metalli liquidi presenti nel codice RELAP5 mod 3.3 sono state modificate e aggiornate alle proprietà di riferimento presenti nell'Handbook OECD/NEA [2]. Le proprietà termodinamiche dell'olio, come capacità termica, energia interna, etc., presenti in RELAP5 si riferiscono al THT (Tetra Hydro Thiophene) eccetto la conducibilità termica che si riferisce al Dowtherm RP presente in HELIOS. Va quindi fatta notare una certa differenza nella capacità termica tra l'olio implementato nel codice e quello nella facility HELIOS, così come mostrato in Figura 5.

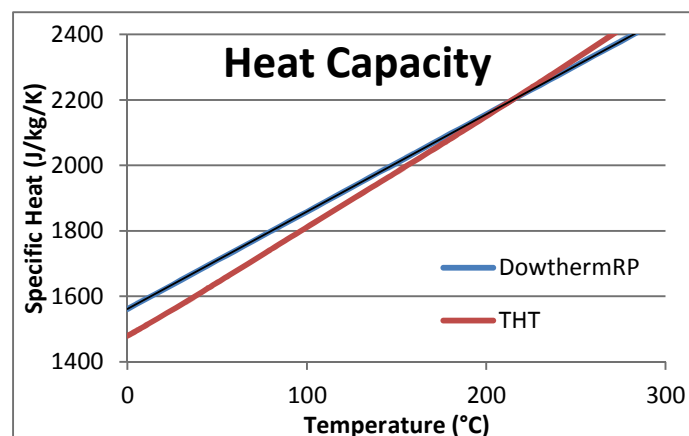


Figura 5 – Differenza tra capacità termiche THT e Dowtherm RP.

Le correlazioni di scambio termico convettivo utilizzate in RELAP5 sono Seban-Shimazaky per il primario in cui l'LBE fluisce nel lato mantello dello scambiatore, e Dittus-Boelter per il lato secondario in cui l'olio fluisce all'interno di due tubi paralleli in controcorrente rispetto al piombo-bismuto.

Il modello è stato calibrato in base alle indicazioni fornite nel benchmark, facendo riferimento ai dati sperimentali ottenuti con il test in circolazione naturale a 15 kW.

La calibrazione si è eseguita in tre step:

- ❖ Step 1. Calibrazione delle temperature nel loop primario.
- ❖ Step 2. Calibrazione della portata in circolazione naturale.
- ❖ Step 3. Calibrazione del coefficiente di scambio termico tra primario e secondario.

Nel primo step, partendo da un modello semplificato senza il circuito secondario, si è imposta la portata sperimentale attraverso una giunzione tempo-dipendente. In queste condizioni è stato possibile riprodurre i salti termici sperimentali inserendo perdite o guadagni di potenza nelle varie sezioni del loop primario, compresa la regione dello scambiatore di calore, dato che il secondario è stato rimosso. Con riferimento alla Figura 6 in cui sono mostrati gli interventi effettuati nel modello, nelle sezioni in rosso è stata introdotta potenza attraverso le pareti delle tubazioni e nelle sezioni blu si sono introdotte perdite di calore. Nelle restanti sezioni il sistema è mantenuto adiabatico. Nel secondo step, l'LBE è stato fatto circolare liberamente rimuovendo la portata imposta, calibrando la portata ottenuta in circolazione naturale agendo sulle perdite di carico concentrate inserite nel modello. A questo scopo è stato necessario rimuovere grande parte dei k-factor nelle sezioni tratteggiate di Figura 6. In tal modo si è in parte inficiato il lavoro fatto nella prima fase del benchmark, tuttavia si è dimostrato essere l'unico modo per replicare le portate di circolazione naturale. Infine, si è ripristinato il secondario, e attraverso la calibrazione delle perdite di calore nel mantello dello scambiatore e con aggiustamenti del fouling factor lato olio (un moltiplicatore per il coefficiente di scambio termico) si è potuto ottenere un ottimo stato stazionario.

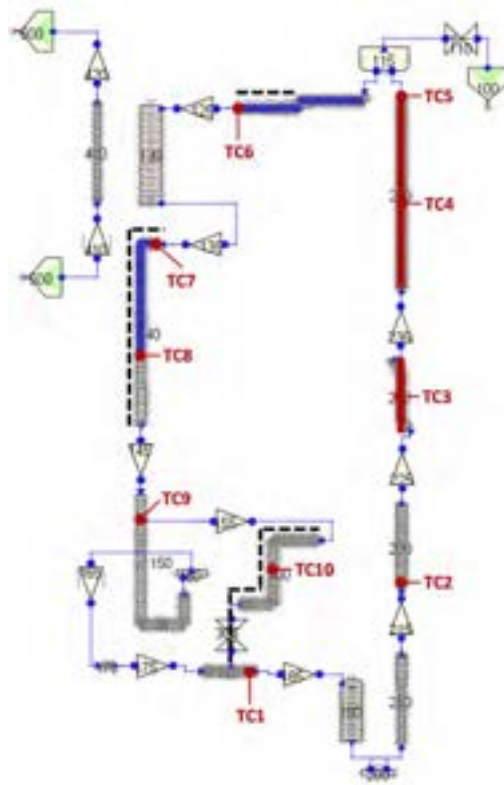


Figura 6 – Calibrazione modello di HELIOS per RELAP5.

4.4. Il modello di HELIOS per CATHARE

Tra le future attività di sviluppo del codice CATHARE, uno dei principali desiderata è sicuramente l'implementazione delle proprietà termodinamiche di 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.

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, la zona di scambio coincide con il tratto in giallo di Figura 7. Per sfruttare le informazioni fornite dai risultati delle simulazioni RELAP5, la meshatura della regione di scambio è stata resa comparabile a quella del modello RELAP5 e sulla struttura termica di scambio è stato imposto un salto entalpico derivato dalle simulazioni RELAP5. In questo caso, l'ambiente esterno fa le veci del circuito secondario, non simulabile con CATHARE.

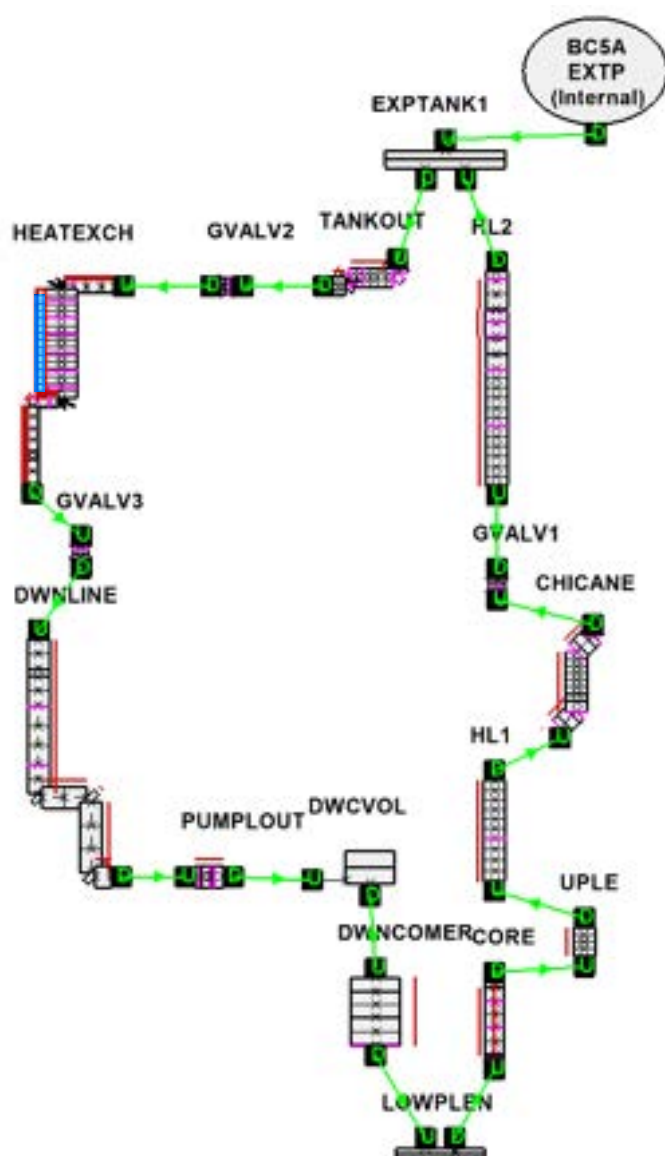


Figura 7 – Schema della nuova nodalizzazione di HELIOS in circolazione naturale.

Nella Figura 7 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 DWNLINE e PUMPLOUT che chiude il circuito.

La calibrazione del modello ha richiesto gli stessi passaggi descritti per il modello RELAP5, in particolare per quanto riguarda la calibrazione dei salti termici lungo il loop. Per quanto riguarda la calibrazione della portata in circolazione naturale, a differenza di RELAP5, non è stato necessario procedere alla modifica delle perdite di carico. Questo fatto suggerisce un supplemento di analisi al modello RELAP5. Infine, come già spiegato, lo scambio termico nell'HX avviene attraverso una perdita di calore derivata dalle simulazioni RELAP5.

4.5. Risultati

Il processo di calibrazione eseguito sui due modelli per RELAP5 e CATHARE, condotti con riferimento al test in circolazione naturale a potenza a 15 kW, ha portato ai risultati riassunti nella seguente Tabella 3. Il confronto riguarda lo stato stazionario raggiunto nel Case-I di Tabella 1 e qui di seguito riassunto:

	Core power (kW)	Primary side mass flow rate (kg/s)	Secondary side oil	
			Inlet temperature (°C)	Mass flow rate (kg/s)
Case-I	15	2.39	113.6	0.29

Nella tabella, i valori delle potenze sono state determinate attraverso bilanci termici a partire dai dati sperimentali. Dall'analisi dei bilanci termici sperimentali è possibile notare come circa 2.5 kW di potenza siano perduti lungo il loop, ad esclusione della sezione di primario dello scambiatore termico. Concentrando l'attenzione sul bilancio termico nello scambiatore, si nota come la potenza ceduta dal lato primario (12332 W) non è bilanciata dalla potenza estratta dal secondario (9260 W). L'unica giustificazione per questo è che la differenza di potenza sia una perdita di calore verso l'ambiente (3072 W) localizzata nello scambiatore, dal lato primario in cui l'LBE fluisce nel lato mantello.

A questo punto, per quanto riguarda la simulazione RELAP5, si è dovuto procedere alla calibrazione della perdita di calore attraverso il lato mantello dello scambiatore e contemporaneamente alla regolazione di un fouling factor da applicare nello scambiatore lato secondario per limitare il salto termico dell'olio. Un coefficiente di 0.92 è stato sufficiente per ottenere un ottimo stato stazionario nella simulazione RELAP5. Nel caso di CATHARE, data la semplificazione necessaria per la simulazione dello scambiatore, non si è reso necessario alcun particolare intervento se non sulla regolazione della potenza ceduta dal primario verso l'ambiente. Anche in questo caso si è ottenuto un ottimo stato stazionario, con errori inferiori all'1% in tutti principali parametri di interesse (colonna Error C2).

Tabella 3 – Confronto dei risultati ottenuti nel test a 15 kW.

		EXPERIMENT	RELAP5	CATHARE	Error C2
CORE	TC1	249.5	249.9	249.2	-0.13%
	TC2	292.4	292.8	292.2	-0.04%
	TC3	292.5	292.8	292.2	-0.09%
	TC4	294.5	294.7	294.2	-0.09%
	TC5	295.5	295.8	295.5	-0.02%
HX	TC6	289.0	289.3	288.9	-0.05%
	TC7	253.8	254.1	253.5	-0.14%
	TC8	251.1	251.5	250.9	-0.11%
	TC9	251.3	251.6	250.9	-0.16%
	TC10	251.2	251.6	250.9	-0.15%
	DT_HX	35.2	35.2	35.4	0.62%
	DT_OIL	16.6	17.1	NA	
	PUMP flow		0.0	NA	
	BYPASS flow	2.394	2.392	2.382	-0.49%
	OIL flow	0.29	0.29	NA	
	P_HX_pri	-12332	-12269	-12349	0.14%
	P_core	15000	15000	15000	0.00%
	P_HX_sec	9260	9362	NA	
	Heatloss Mantello	3072	3209.82	NA	
	sec+heatloss mantello	12332	12572.1	NA	
	heatloss loop	2668	2427.9	2651	-0.63%

In Figura 8 è stato riportato il confronto delle temperature sperimentali, RELAP5 e CATHARE con riferimento al numero di termocoppia.

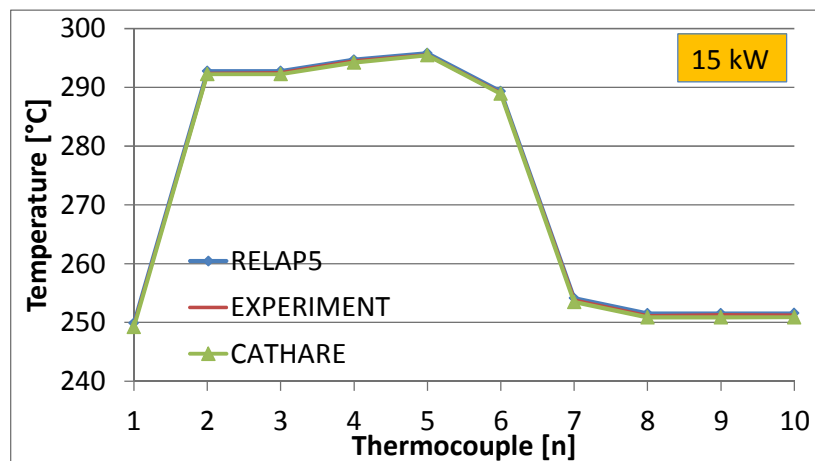


Figura 8 – Confronto delle temperature lungo il loop HELIOS nel test a 15 kW.

La calibrazione condotta per il prova a 15 kW è stata quindi testata con la prova a 9.8 kW qui di seguito riassunta:

	Core power (kW)	Primary side mass flow rate (kg/s)	Secondary side oil		
			Inlet temperature (°C)	Outlet temperature (°C)	Mass flow rate (kg/s)
Case-II	9.8	2.1	143.5	169.1	0.12

In questo caso, se si fossero imposte solo le boundary conditions di potenza, portata del secondario e temperatura di ingresso dell'olio nel modello RELAP5, senza nessun altro intervento, si sarebbe

fortemente sottostimato l'andamento delle temperature del circuito primario. Questo a causa di una sostanziale differenza, rispetto al caso precedente, nelle perdite di calore del lato mantello dello scambiatore che passano dal 25% della potenza scambiata dall'HX lato primario nel caso a 15 kW, al 30% nel caso a 9.8 kW. Si è proceduto quindi a una ricalibrazione delle perdite verso l'esterno nello scambiatore di RELAP5, lasciando invariato il fouling factor lato olio a 0.92. Senza quest'ultima calibrazione, si ottiene una certa sovrastima del salto termico lato olio per RELAP5 (29.2°C contro 25.6°C dei dati sperimentali), come evidenziato in Tabella 4 in cui sono riportati i risultati ottenuti nelle simulazioni a 9.8 kW. La sovrastima della potenza rimossa dal lato secondario comporta quindi una riduzione della potenza scambiata sul lato mantello (1764 W) nel tentativo di conservare la potenza totale rimossa nello scambiatore di calore. Nessuna ricalibrazione è stata fatta sul modello CATHARE, sempre a causa della semplificazione sull'HX del modello.

Tabella 4 – Confronto dei risultati ottenuti nel test a 9.8 kW.

	time = 20000 s	EXPERIMENT	RELAP5	CATHARE	Error
CORE	TC1	257.4	257.2	259.2	0.71%
	TC2	288.0	289.7	291.6	1.24%
	TC3	289.6	289.7	291.6	0.69%
	TC4	292.4	291.9	293.9	0.50%
	TC5	293.9	293.2	295.3	0.46%
HX	TC6	288.0	289.5	291.4	1.21%
	TC7	260.0	260.7	261.8	0.69%
	TC8	257.4	258.6	260.2	1.09%
	TC9	259.5	258.6	260.2	0.28%
	TC10	258.5	258.6	260.2	0.65%
	DT_HX_pri	28.0	28.7	29.7	6.08%
	DT_OIL	25.6	29.2	NA	
	PUMP flow		0.0		
	BYPASS flow	2.100	2.062	2.070	-1.44%
	OIL flow	0.12	0.12	NA	
	P_HX_pri	-8952	-8641	-8985	0.37%
	P_core	9800	9800	9800	0.00%
	P_HX_sec	6224	7044	NA	
	Heatloss Mantello	2728	1764	NA	
	sec+heatloss mantello	8952	8808	NA	
	heatloss loop	848	992	816	-3.82%

L'andamento delle temperature lungo il loop primario con riferimento al numero di termocoppia è riportato in Figura 9. Dalla tabella dei risultati si ha un sostanziale accordo con i dati sperimentali. La portata di circolazione naturale calcolata da CATHARE è sottostimata di circa l' 1.5%.

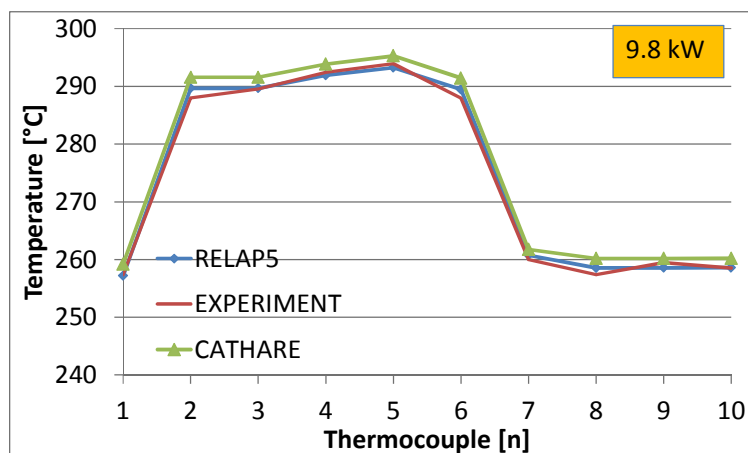


Figura 9 – Confronto delle temperature lungo il loop HELIOS nel test a 9.8 kW.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 18	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Le carenze mostrate dai dati sperimentali sin qui esaminati, cioè la differenza di circa il 30% tra la potenza ceduta dal primario e quella assorbita dal secondario, nonché le differenze riscontrate nelle perdite di calore tra i due test, sono stati oggetto di discussione anche all'interno del benchmark. I colleghi coreani si sono impegnati per la produzione di nuovi dati sperimentali alle stesse potenze e cercando di conservare la portata del circuito secondario, allo scopo di limitare le incertezze sui dati sperimentali.

Per quanto riguarda il confronto tra le simulazioni RELAP5 e CATHARE si può sottolineare come nel caso di CATHARE non si sia resa necessaria una revisione delle perdite di pressione allo scopo di riprodurre la corretta portata in circolazione naturale di entrambe i test. Tuttavia, rimane il limite dettato dall'impossibilità di simulare correttamente il circuito secondario in CATHARE.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 19	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

5. VALIDAZIONE CON DATI 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 [20]. 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 GEC (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.

5.1. Descrizione della facility NACIE

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 10, mentre i principali dati geometrici che caratterizzano l'impianto NACIE sono riassunti nella Tabella 5.

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.

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 6.

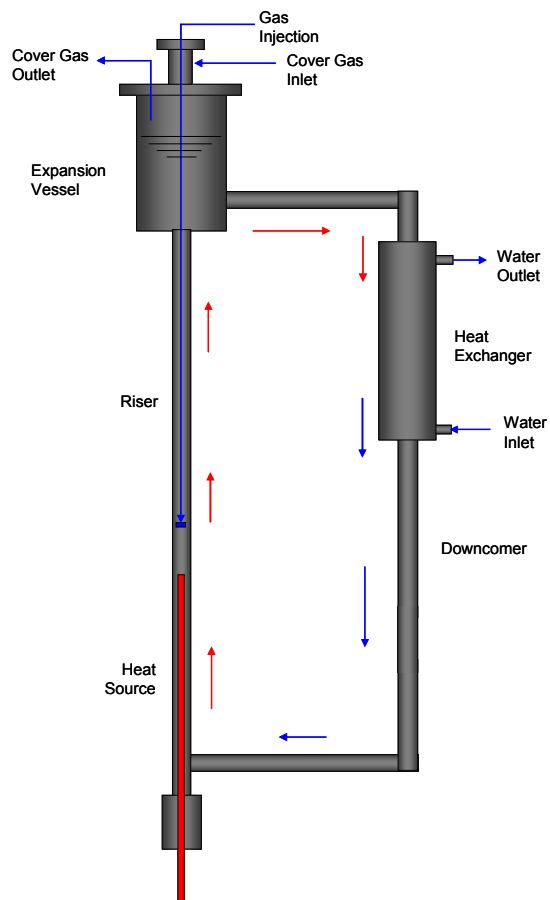


Figura 10 – Configurazione loop NACIE.

Tabella 5 – 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	854	[mm]

Tabella 6 – Caratteristiche delle barre scaldanti di NACIE.

Numero di pin attivi	2	
Diametro	8.2	[mm]
Lunghezza Attiva	854	[mm]
Lunghezza Totale	1400	[mm]
Massimo Flusso Termico	100	[W/cm ²]
Distribuzione di Flusso Assiale	Uniforme	
Massima Potenza Termica (cad)	22	[kW]
Numero di pin dummy (supporto)	2	
Diametro dummy	8.2	[mm]

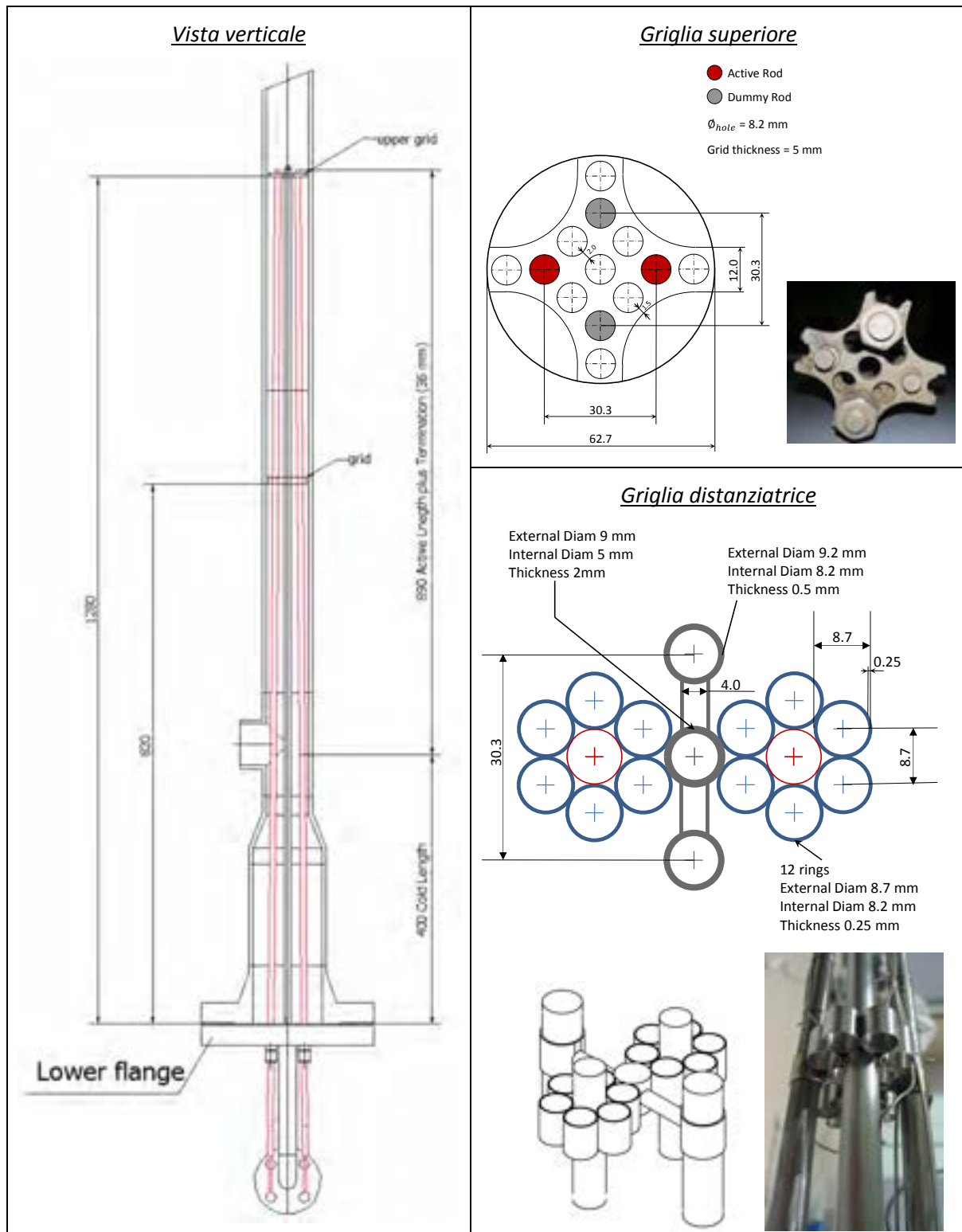


Figura 11 – Schema della regione scaldante di NACIE.

La potenza totale installata è circa 45 kW, anche durante i test solo una risulta attiva a causa del limite massimo di potenza rimovibile dallo scambiatore di calore adottato. In Figura 11 viene riportato uno schema della sezione scaldante. Nella sezione mediana e terminale della lunghezza attiva sono state installate due griglie spaziatrici di differente tipologia. Queste hanno il compito di permettere l'espansione assiale delle barre, mantenendo inalterata l'area di passaggio del canale che altrimenti potrebbe essere modificata dall'incurvamento delle stesse barre.

In Figura 11 è riportato anche uno schema della griglia distanziatrice posta nella regione mediana del bundle e la griglia superiore, nonché uno schema 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 con cavi del diametro di 1 mm.

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 7 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 7 – 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 [21] [22] [23] [7]. 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 8. Il piombo-bismuto scorre verso il basso nel tubo interno, mentre l'acqua scorre verso l'alto, nella regione anulare più esterna (vedi Figura 12).

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.

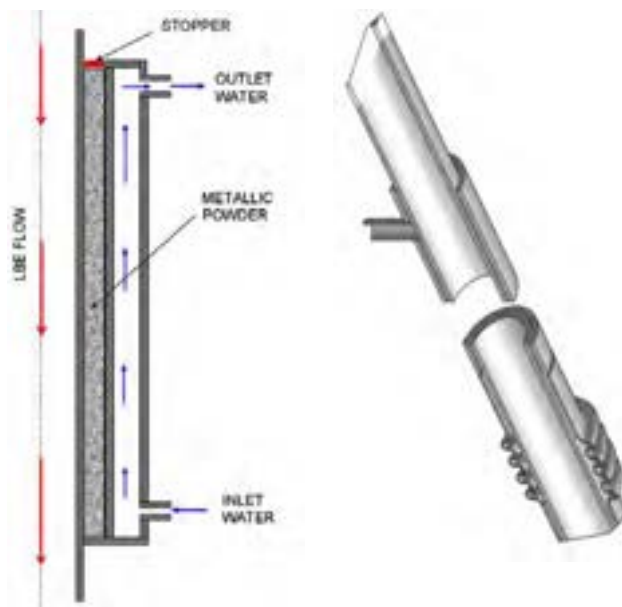


Figura 12 – Schema dello scambiatore di calore e vista del giunto ad espansione.

Tabella 8 – 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. La rugosità dei materiali è pari a 3.2×10^{-5} m.

5.2. La campagna sperimentale NACIE

La campagna sperimentale svolta sull'impianto NACIE comprende vari test condotti sia in circolazione naturale (NC) sia in circolazione forzata attraverso l'iniezione di Argon al fine di promuovere una maggiore circolazione o tecnica del gas-lifting (GEC). Ogni prova è stata effettuata con un solo pin attivo all'interno della sezione di prova, con una potenza nominale che può raggiungere i 22.5 kW.

La campagna sperimentale aveva lo scopo di testare un nuovo flussimetro a induzione per la misurazione non intrusiva delle portate di LBE, sviluppato in collaborazione con HZDR (Dresda, Germania), progettato e costruito da SAAS GmbH. Il flussimetro è stato installato in NACIE nel Luglio

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 24	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

2012, dopodiché è stato calibrato. Un immagine e uno schema del flussimetro a induzione sono riportati in Figura 13.

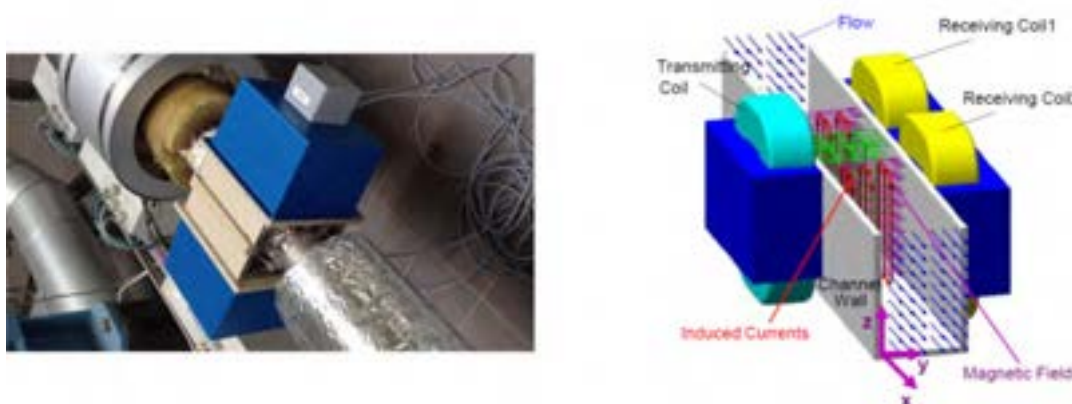


Figura 13 – Schema del flussimetro a induzione MP101 installato nel circuito primario di NACIE.

A causa dell'assenza di valvole nel circuito, la procedura di calibrazione è stata ripetuta alcune volte al fine di determinare correttamente lo zero dello strumento. Per la calibrazione è stato adottato come riferimento delle portate il bilancio termico eseguito attraverso la sezione scaldante, con la relazione:

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \Delta T}$$

Dove ΔT è l'incremento di temperatura attraverso il bundle, Q è la potenza fornita dal bundle e c_p è il calore specifico dell'LBE. La portata valutata dalla suddetta formula fornisce un dato corretto quando il sistema si trova in condizioni stazionarie.

Senza valvole disponibili, si è determinato che il modo migliore per eseguire una calibrazione a due punti è la seguente:

Il loop viene riempito di LBE e tenuto a temperatura costante di 300°C dai cavi scaldanti presenti lungo il circuito;

- ❖ I cavi scaldanti vengono spenti;
- ❖ Il bundle viene acceso con una rampa di potenza fino a 20 kW in 5 minuti;
- ❖ Il secondario viene riempito di acqua, la pompa e il dispositivo di raffreddamento ad aria del secondario vengono attivati;
- ❖ Ha inizio il transitorio e dopo poche ore il sistema raggiunge lo stato di equilibrio termo-fluidodinamico;
- ❖ In questa condizione di circolazione naturale, la portata di equilibrio può essere calcolata con il bilancio termico, e questa portata dell'ordine di 5 kg/s rappresenta il primo punto di calibrazione fissato nello strumento;
- ❖ Si fa partire la circolazione assistita con iniezione di Argon alla portata di 20 NI/min e si raggiunge un nuovo stato di equilibrio nel circuito;
- ❖ In questa condizione di circolazione forzata, la portata può ancora essere stimata attraverso il bilancio termico riportato sopra (dove ora il ΔT sarà minore); la nuova portata sarà dell'ordine di 18 kg/s che rappresenta il secondo punto di calibrazione fissato nello strumento.

Nella seguente Tabella 9 è riportata la matrice di prova, che evidenzia il regime di flusso indagato, la portata di iniezione del gas nel caso di GEC (Glift), la potenza totale fornita al sistema attraverso la

sezione scaldante e la rampa di tempo imposta al sistema di alimentazione per ottenere i valori scelti, infine, la temperatura media del LBE nel loop (T_{av}). Diverse T_{av} si ottengono imponendo diverse condizioni al contorno sul lato secondario dello scambiatore di calore, in termini di portata d'acqua e temperatura di ingresso dell'acqua. La gamma di temperature medie di LBE considerato nella campagna sperimentale è 200-360 °C. Il tempo richiesto per un singolo test è di poche ore.

Tabella 9 – Matrice di prova della campagna sperimentale sulla facility NACIE.

ID	T_{av} [°C]	Power %	Power [kW]	Ramp t [min]	Heat Sink	Glift [NI/min]	Transition NC to GLC	Transition GLC to NC
201	200-250	50	9.5	5	YES	0	NO	NO
203	200-250	50	9.5	5	YES	5	NO	YES
204	200-250	50	9.5	5	YES	2,4,5,6,8, 10,6,5,4,2	YES	NO
206	200-250	0	0	-	NO	2,4,5,6,8, 10,6,5,4,3	NO	NO
301	300-350	100	21.5	5	YES	0	NO	NO
303	300-350	100	21.5	5	YES	5	NO	YES
304	300-350	100	21.5	5	YES	2,4,5,6,8, 10,6,5,4,2	YES	NO
305	300-350	50	9.5	5	YES	0	NO	NO
306	300-350	0	0	-	NO	2,4,5,6,8, 10,6,5,4,2	NO	NO
406	350-360	25	3.5	5	NO	2,4,5,6,8, 10,6,5,4,2	NO	NO

Ricordando che la portata misurata dal nuovo flussimetro induttivo MP101 può essere confrontata con il bilancio termico attraverso la sezione di prova solo quando viene raggiunto l'equilibrio termo-fluidodinamico, i principali risultati ottenuti con la campagna sperimentale sono i seguenti:

- ❖ il flussimetro a induzione fornisce dati sufficientemente precisi per alte portate in massa, 5-20 kg/s;
- ❖ L'incertezza della misura è dell'ordine di 1 kg/s, e quindi può diventare rilevante alle basse portate che si hanno in circolazione naturale, meno nel range fra 5-20 kg/s;
- ❖ Le ragioni di tale incertezza sono chiare e sono legate al diametro del tubo (2.5") in cui si misura l'effetto di induzione;
- ❖ A partire da questa esperienza, un nuovo misuratore di portata ad induzione sarà montato su un tubo più piccolo (di 20 mm di diametro) per aumentare la precisione nel range 0-5 kg/s e sarà montato sulla facility chiamata NACIE-UP, un aggiornamento in corso d'opera;
- ❖ Un altro punto debole è la procedura di calibrazione, e questo punto sarà affrontato con l'installazione di valvole a sfera in NACIE-UP che permettono di impostare il punto zero in modo più accurato.

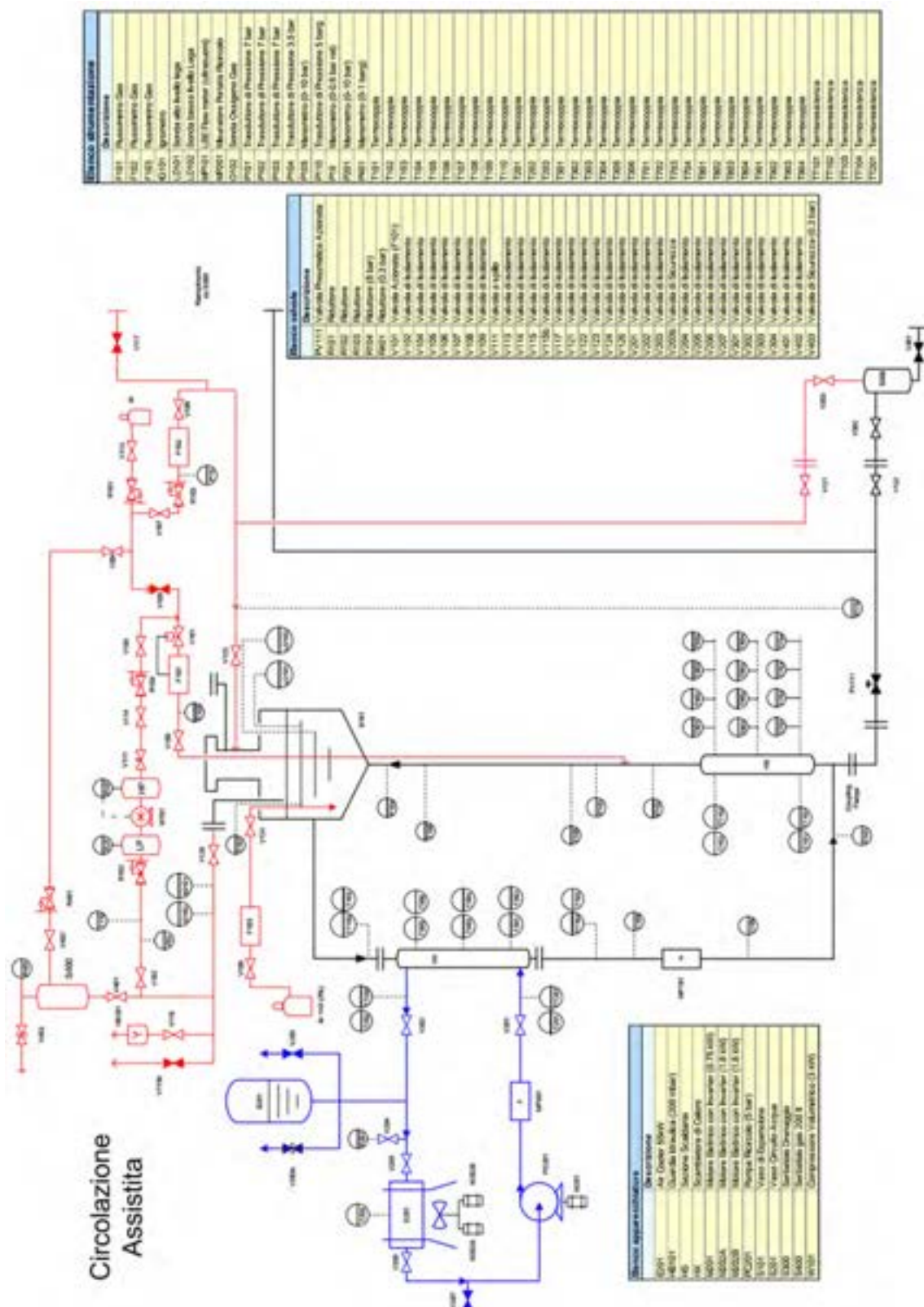


Figura 15 – P&I della facility NACIE.

Grazie a misurazioni effettuate sul bundle, si è potuto determinare la corretta posizione della sezione attiva delle barre che, in congiunzione con i documenti di progetto, hanno portato ad una determinazione precisa delle sezioni geometriche principali in cui può essere suddivisa la facility (vedi schema in Figura 16). In Figura 17 un particolare della posizione della regione attiva del bundle e la tabella di verifica delle elevazioni dell'impianto.

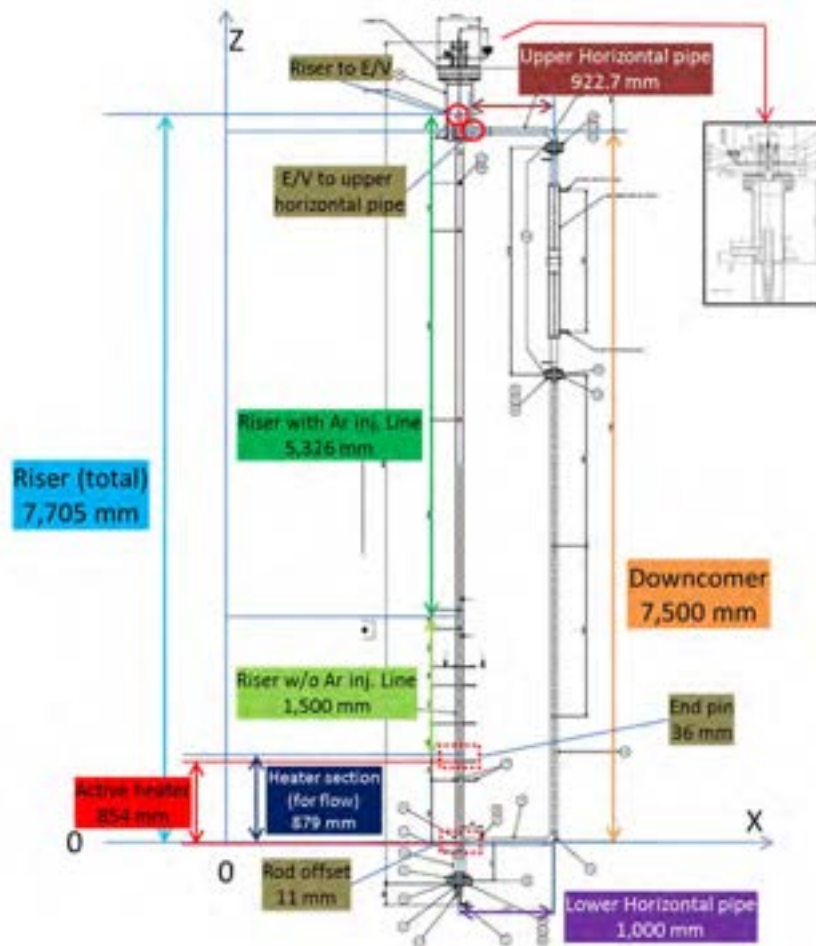


Figura 16 – Schema delle sezioni principali di NACIE (con dettaglio del vaso di espansione).

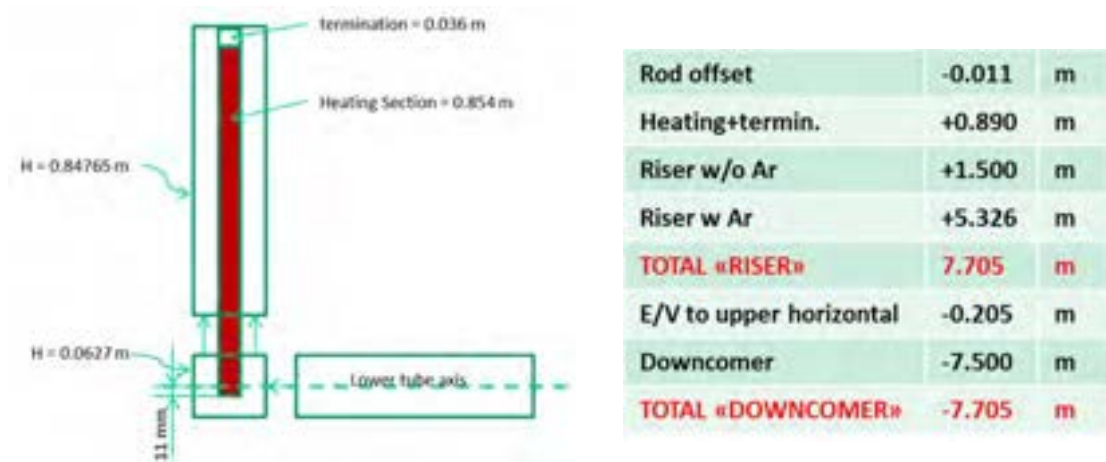


Figura 17 – Schema della posizione della regione attiva del bundle e la tabella delle elevazioni.

Test 301

Questo test è svolto in pura circolazione naturale. La potenza erogata attraverso la sezione di riscaldamento è 21.5 kW. Nella seguente Figura 18 e Figura 19, sono raccolti i principali dati sperimentali:

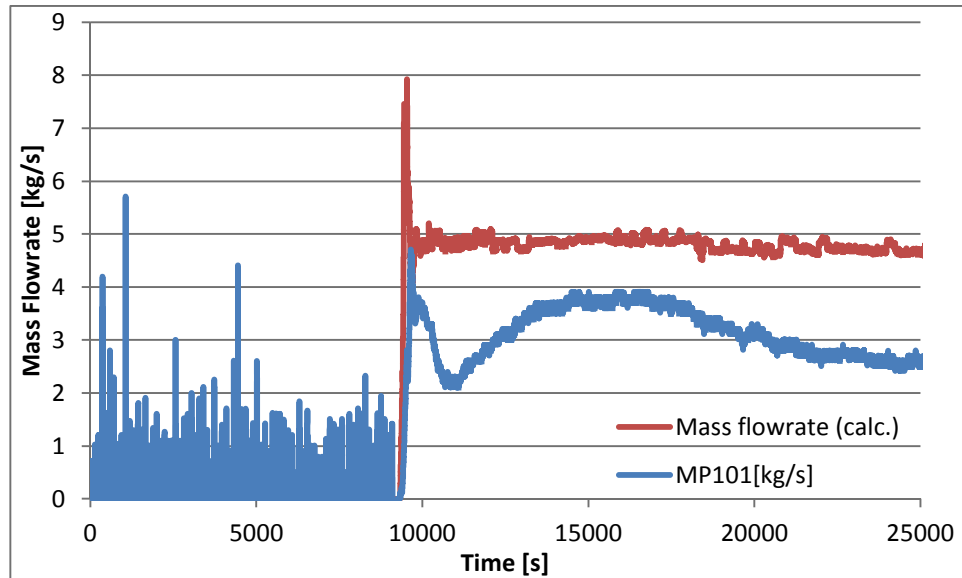


Figura 18 – Test 301: portata di LBE misurata (MP101) e stimata con bilancio termico.

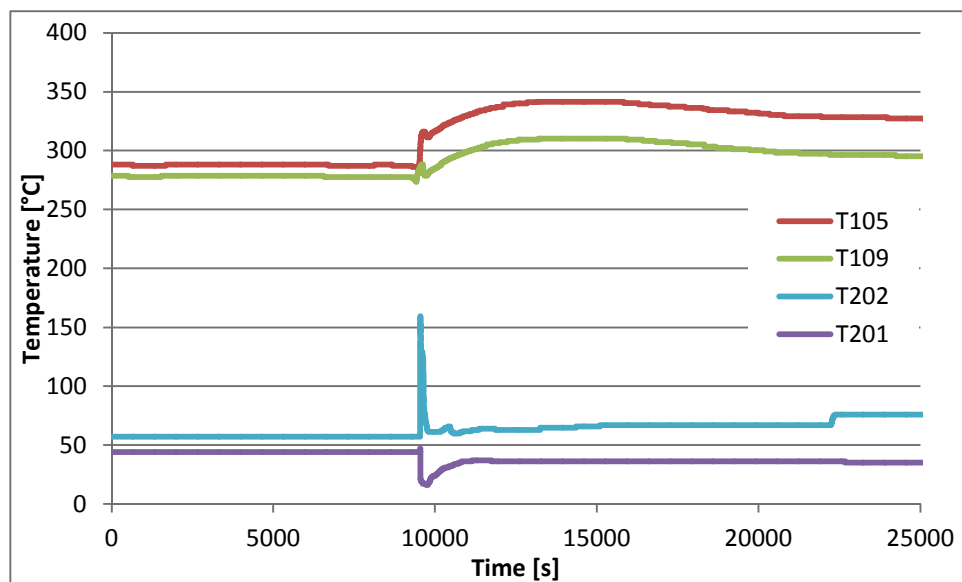


Figura 19 – Test 301: temperature di LBE e acqua.

Nella seguente Tabella 10 sono raccolti i principali dati sperimentali per il Test 301 in circolazione naturale svolto sulla facility NACIE. I dati fotografano lo stato stazionario raggiunto nell'intorno dei 25000 s dall'inizio del test.

Tabella 10 – Test 301: principali dati sperimentali mediati in 1 ora di stazionario.

Parametro (test 301)	Unità	Valore	Note
Potenza	[kW]	21.798	
Iniezione di gas	[NI/min]	-	
Portata LBE	[kg/s]	4.712	da bilancio termico
Portata acqua	[m ³ /h]	0.47	
Temperatura T102	[°C]	327.7	
Temperatura T103	[°C]	324.3	HX inlet
Temperatura T104	[°C]	297.1	HX outlet
Temperatura T105	[°C]	326.9	Core outlet
Temperatura T106	[°C]	326.4	
Temperatura T107	[°C]	326.6	Vaso di espansione
Temperatura T109	[°C]	295.1	Core inlet
Temperatura ingresso acqua	[°C]	35.1	T201
Temperatura uscita acqua	[°C]	75.8	T202

Nel benchmark LACANES i partecipanti hanno dovuto simulare la condizione di stato stazionario media raggiunta tra i 23400 e 27000 s di prova (1 ora di stazionario), così da determinare la portata di LBE in circolazione naturale. Non essendo presenti misure di pressione o differenza di pressione nell'impianto, queste sono state confrontate con un approccio codice a codice. Nella precedente annualità del presente accordo di programma ENEA/MSE è stato seguito lo stesso approccio per la validazione delle perdite di carico valutate da CATHARE attraverso il confronto con i risultati in stazionario ottenuti con RELAP5. Nel presente documento ci si soffermerà sulla simulazione dinamica del transitorio, preceduta da una revisione del modello per CATHARE.

5.3. Il modello NACIE per CATHARE

Il modello monodimensionale di NACIE sviluppato per il codice di sistema CATHARE2 è riportato in Figura 28. Nel confronto con la vista isometrica della facility e la nodalizzazione RELAP5 di Figura 19 è semplice riconoscere le varie sezioni in cui è stata discretizzata la facility per conservare il percorso del flusso di LBE. Le strutture termiche del Fuel Pin Simulator, la barra non scaldante, le due barre dummy, e i tubi, sono state tutte simulate e sono evidenziate in rosso nella figura. In particolare i tubi in acciaio AISI304 sono stati anche circondati da uno spessore 3.8 cm di lana di roccia per isolamento termico. La struttura di scambio dell'HX (in giallo) è composta da una parete multistrato composta dalla parete del tubo interno (lato primario), dallo strato di polvere d'acciaio, e dalla parete interna del lato secondario. Le pareti esterne scambiano calore con l'ambiente esterno mantenuto a una temperatura di 20 °C.

Le perdite di carico distribuite sono calcolate dal codice CATHARE. Recenti attività effettuate con il codice hanno dimostrato che il calcolo delle perdite distribuite non è funzione del regime di flusso (laminare o turbolento) e neanche della rugosità delle pareti che, nonostante possa essere modificata attraverso l'input-deck, viene comunque fissata al valore di default di 1 µm. Una leggera sovrastima delle portate in circolazione naturale sarà quindi attesa nelle simulazioni che verranno effettuate nei confronti delle simulazioni RELAP5.

Le perdite di carico concentrate oggetto di revisione sono valutate con l'ausilio dell'Handbook Idelchik [19] e la loro valutazione è trattata di seguito.

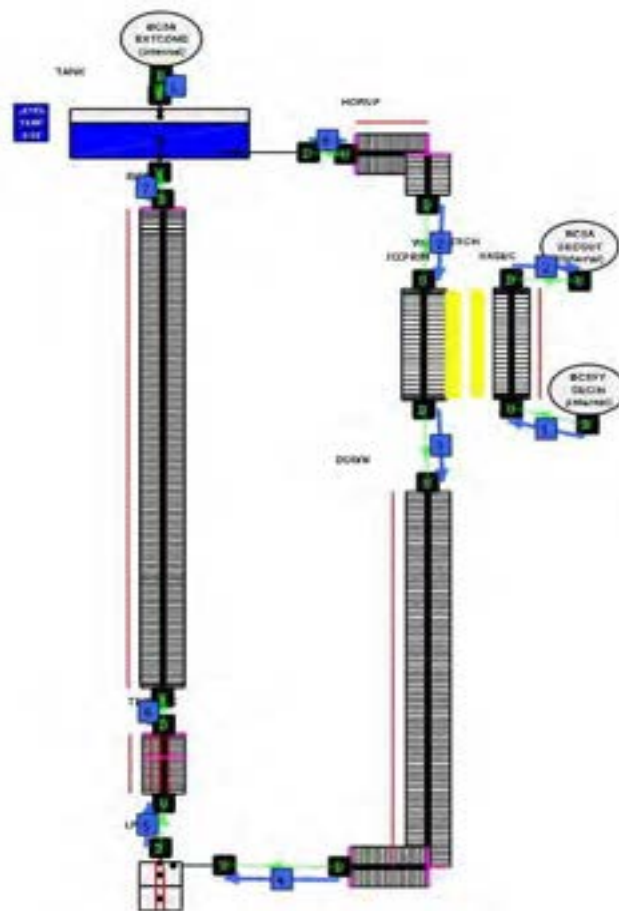


Figura 20 – Nodalizzazione di NACIE per CATHARE.

La descrizione del circuito secondario ad acqua si limita allo scambiatore di calore, guidato da condizioni al contorno per quanto riguarda le portate, le temperature e la pressione di esercizio. In particolare, per la boundary condition in ingresso (SECIN) si è optato per un modello di boundary BC5YY che permette di comandare le temperature di liquido e vapore, grado di vuoto e portata totale con tabelle temporali indipendenti.

L'intera nodalizzazione è composta da più di 300 mesh di lunghezza variabile da 5 a 10 cm.

Le proprietà termodinamiche della lega piombo-bismuto implementate in CATHARE si riferiscono alle correlazioni dell'Handbook [2]. Per quanto riguarda le correlazioni di scambio termico convettivo adottate, nel circuito primario a LBE si usa la correlazione di Seban-Shimazaki, implementata in CATHARE come correlazione di default per i refrigeranti piombo e LBE:

$$Nu = 5.0 + 0.025 Pe^{0.8}$$

dove Nu è il numero di Nusselt, Pe è il numero di Peclet, mentre per il circuito secondario si impiega la correlazione standard Dittus-Boelter:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

Dove Re è il numero di Reynolds e Pr è il numero Prandtl.

La conducibilità termica della polvere di acciaio posta nell'intercapedine tra primario e secondario dello scambiatore, ha lo scopo di abbattere gli elevati flussi termici provenienti dal lato primario. Dato che non esistono dati sperimentali affidabili delle caratteristiche termiche di questo materiale, esse rappresentano un grado di libertà per ottenere adeguate simulazioni. Il valore di conducibilità

ENEA Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 32	di 46
---------------------------------------	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

termica, calibrata al 12.5% nelle simulazioni RELAP5, non si è dimostrato un buon valore iniziale anche per le simulazioni CATHARE2 che si è dovuto ricalibrare al 10.5% della conducibilità dell'acciaio AISI304.

Valutazione delle perdite di carico

Griglia spaziatrice

La griglia spaziatrice posta a circa metà altezza del bundle, schematizzata in Figura 21, è formata da una serie di anelli in acciaio a formare una struttura esagonale intorno alle pin attive, queste sono poi collegate a un anello centrale più spesso che a sua volta è collegato, tramite setti, a due anelli di acciaio dove sono alloggiati le due barre dummy con funzione di supporto dell'intero bundle. Le dimensioni riportate sono state misurate direttamente sulla struttura smontata.

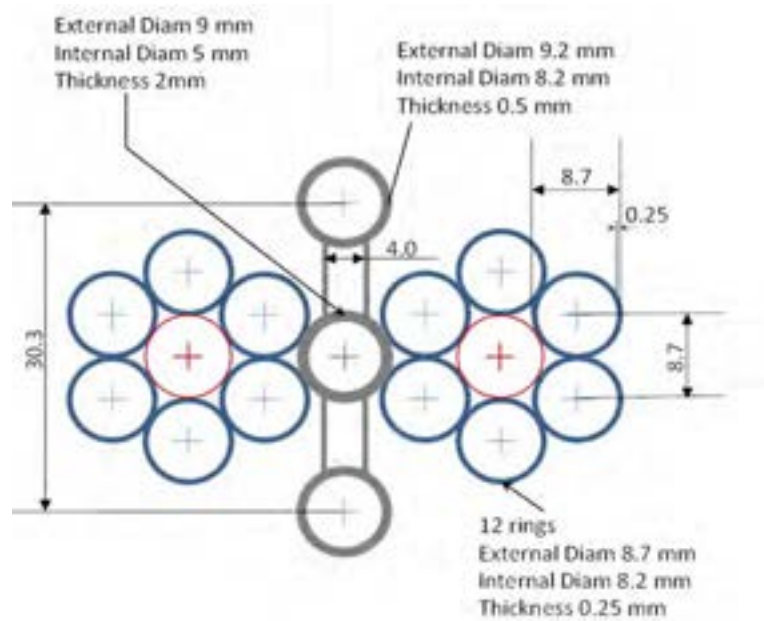


Figura 21 – Schema della griglia spaziatrice.

La perdita di carico che si riferisce a questa griglia prototipica è stata valutata con l'uso della correlazione di Rehme [24]:

$$K = C_v \left(\frac{A}{A_0} \right)^2, \quad C_v = -7.65 \log_{10} Re + 49.0$$

considerando:

- ❖ Area indisturbata (A_s) 2.8666e-3 m²
- ❖ Area della griglia (A_v) 1.9935e-4 m²
- ❖ Numero di Reynolds di riferimento 50000
- ❖ C_v 13.05

Dove per area indisturbata si intende l'area del tubo da 2.5", sottratta dall'area occupata dalle 4 barre formati il bundle e sottratta dall'area occupata da 10 cavi per termocoppie presenti nella sezione a monte della griglia. L'area della griglia è quella che si ottiene sommando i 12 ring blu di Figura 21, i 3 ring grigi e due setti. Il numero di Reynolds considerato fa riferimento a portate nel primario di circa 5 kg/s.

Risulta una perdita di carico concentrata: **$k_{\text{spacer}} = 0.06313$**

ENEA Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 33	di 46
---------------------------------------	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Griglia superiore

Lo schema di massima della griglia superiore è mostrato in Figura 22. Dato che la geometria della griglia non è provvista di un progetto tecnico, l'area occupata dalla griglia può solo essere stimata grossolanamente.

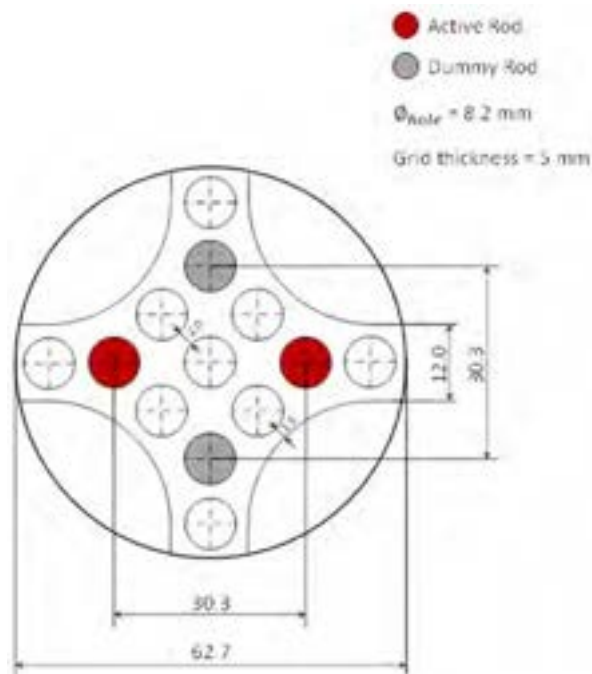


Figura 22 – Schema della griglia superiore.

Nel caso della griglia superiore si è provveduto a valutare la perdita di carico con due procedimenti differenti, con la correlazione di Rehme usata per la griglia spaziatrice e con correlazioni presenti sull'handbook Idelchik.

Con l'uso di Rehme, considerando:

- ❖ Area indisturbata (A_s) $2.8744e-3 \text{ m}^2$
- ❖ Area della griglia (A_v) $1.29053e-3 \text{ m}^2$
- ❖ Numero di Reynolds di riferimento 50000

Dove l'area indisturbata corrisponde all'area del tubo sottratta dell'area delle 4 barre del bundle, l'area della griglia è determinata dall'area del canale sottratta di 13 fori e dei 4 settori ovali in periferia.

Con Rehme risulta una perdita di carico concentrata: $k_{\text{grid}} = 2.6311$

Con l'uso della correlazione presente in Idelchik, valida per piastre forate (Eq. 4.5), dove:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\rho w_2^2 / 2} = \left[\xi' + \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right) + \xi_{\text{fr}} \right] \left(\frac{F_2}{F_0} \right)^2$$

si ottiene una perdita di carico concentrata: $k_{\text{grid}} = 1.2829$

Si è scelto di prendere in considerazione quest'ultimo valore, principalmente poiché è quello che maggiormente si avvicina a quanto stimato dagli altri partecipanti al benchmark LACANES. Va detto che tutti i codici del benchmark sovrastimano la portata in circolazione naturale determinata tramite

bilancio termico in condizioni stazionarie ma simulazioni condotte con codici CFD affermano che la perdita alla griglia è sostanzialmente compatibile con il valore adottato.

Ingresso al tubo orizzontale dal vaso di espansione

Anche in questo caso, la valutazione del coefficiente di perdita concentrata può essere valutata con diverse metodologie in base a considerazioni sul suo layout (vedi Figura 23).

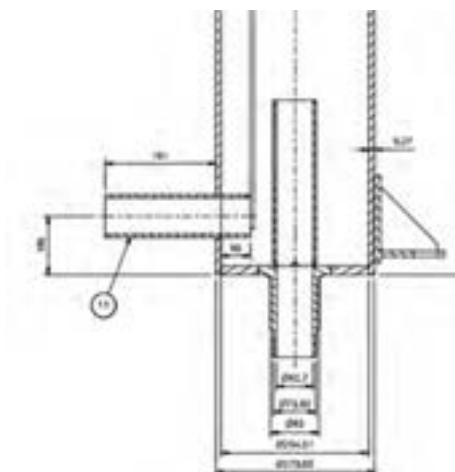


Figura 23 – Sezione del vaso di espansione.

Se si considera la brusca contrazione della sezione di passaggio, sapendo che:

- ❖ Area vaso di espansione regione anulare (A1) 4.6689e-2 m²
- ❖ Area tubo orizzontale (A0) 3.0857e-3 m²

$$k = 0.5 * \left(1 - \frac{A0}{A1}\right) \quad \quad \quad \mathbf{k = 0.467}$$

Il secondo metodo è mutuato dall'Handbook Idelchik. Se in prima istanza si considera solo il flusso in ingresso in un tubo dritto con rientranza (Figura 24 a sinistra), dato che:

d1	5.16	mm	d1/Dh	0.082
Dh	62.7	mm	b/Dh	0.8
b	50	mm	h/Dh	0.64
h	40	mm	s1	0.12

E sapendo che se:

$$b/Dh \geq 0.5 \quad \quad \quad \mathbf{k = 0.5}$$

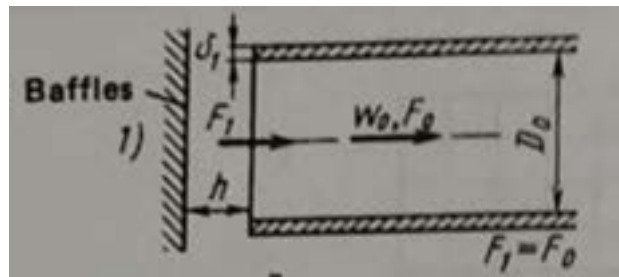
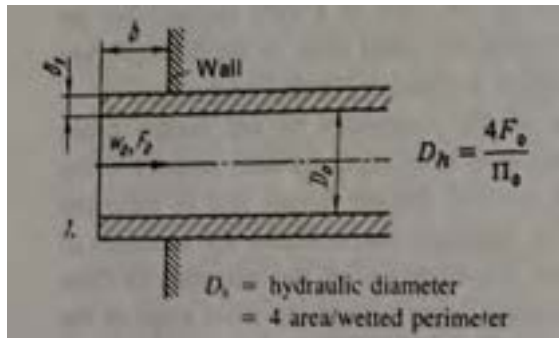


Figura 24 – Schemi Idelchik per ingresso in tubi (Diag. 3.1 e 3.8)

Se si passa a considerare che il tubo orizzontale si trova in prossimità del tubo verticale proveniente dal riser, questo può essere considerato un baffle (vedi Figura 24 a destra) anche se nella correlazione Idelchik lo si considera una parete continua, e non un tubo. Si ha:

$$k = k' + \frac{\sigma_1}{n^2}$$

Dove k' è la perdita di carico senza baffle (0.5) ed $n = 1$.

Si ottiene una perdita di carico concentrata: **$k = 0.62$** .

Con i metodi Idelchik il reale fattore di perdita di carico dovrebbe quindi essere un valore che ricade nel range 0.5 – 0.62, dato il fatto che il baffle non è in realtà una parete continua. In questo caso si è comunque optato per il valore $k = 0.467$ calcolato come brusco restringimento.

Giunzione a T in ingresso al bundle

Il fattore k di perdita di carico relativo alla giunzione in ingresso al bundle può essere considerata la somma di due contributi: uno proveniente dal restringimento dell'area di passaggio del fluido e l'altro dal cambio di direzione di flusso dovuto al T considerato con recesso, cioè un volume morto situato in corrispondenza della parte bassa del bundle.

Il primo contributo derivante dal restringimento della sezione vale, sapendo che:

- ❖ Area tubo orizzontale $3.0857e-3 \text{ m}^2$
- ❖ Area di passaggio nel bundle $2.8634e-3 \text{ m}^2$

Applicando la formula per brusco restringimento riportata sopra, risulta un fattore **$k = 0.036$** .

Considerando Idelchik (Diag. 6.7) valido per pareti con rugosità e numeri di Reynolds $\geq 10e4$:

$$k = 1.2 * k_{\Delta} * k_{Re} * C_1 * A * k_{loc}$$

dove:

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 36	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

k_{Δ}	1.255264837
k_{Re}	1.11985872
C1	1
A	1.2
k_{loc}	0.99

Il primo fattore 1.2 tiene in considerazione la presenza del recesso, k_{Δ} funzione della rugosità, k_{Re} funzione del regime di moto, C1, A e k_{loc} fattori geometrici. Risulta un valore $k = 2.004$.

La somma dei due contributi fornisce un valore di perdita concentrata: **$k_{tee} = 2.04$**

Altre perdite di carico

Le altre perdite di carico presenti nel circuito primario di NACIE, ricadono in casistiche più facilmente generalizzabili, e sono:

- ❖ Cambio di area dovuto alla presenza del tubo di iniezione di gas nel riser: $k = 0.0374$
- ❖ Brusco allargamento dal tubo del riser al vaso di espansione: $k = 0.8906$
- ❖ Curva 90° in ingresso allo scambiatore termico: $k = 0.3134$
- ❖ Curva 90° tra downcomer e tubo orizzontale in basso: $k = 0.3134$

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 37	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

5.4. Risultati della simulazione dinamica del Test 301

La validazione di CATHARE e del modello creato per la simulazione della facility NACIE, ha riguardato la verifica della capacità del codice di simulare un test integrale in circolazione naturale. Nella simulazione del Test 301, le principali fonti di incertezza nelle simulazioni riguardano la mancanza di informazioni sulle procedure di prova, la reale conducibilità della polvere di acciaio posta nell'intercapedine tra primario e secondario, e alcune incertezze riguardanti il regime di funzionamento del circuito secondario durante il test. Discende che per tentare una simulazione comparabile con le risultanze sperimentali si sono dovute effettuare alcune assunzioni.

Il transitorio consta in una prima fase in cui si ha l'accensione a piena potenza della barra scaldante fino a raggiungere i 21.5 kW, con una rampa di 5 minuti, e il contemporaneo spegnimento dei preriscaldatori e l'avvio della pompa del circuito secondario. Nella seconda fase, si ha lo spegnimento della barra scaldante e della pompa del secondario.

Lo stato stazionario iniziale è stato ottenuto a valle di una calibrazione che ha visto come variabili in gioco:

- ❖ La potenza da fornire tramite la canna scaldante per riprodurre il DT iniziale che si ha attraverso la sezione scaldante (Figura 27). Questa è dovuta alla presenza di preriscaldatori, che non sono stati simulati nel modello CATHARE. In altre parole, la barra scaldante sarà usata oltre che per la funzione originaria di sorgente di potenza durante il transitorio anche per la funzione di riscaldatore. Il livello di potenza è stato fissato al 16% della potenza massima prevista per il test (21.5 kW) corrispondente a una potenza fornita di 3.4 kW (PRODTOT di Figura 25).
- ❖ Le perdite di calore verso l'esterno sono state calibrate per compensare la potenza iniziale fornita dalla barra scaldante in modo da raggiungere la condizione di stazionarietà iniziale (PLOSS in Figura 25).
- ❖ La conducibilità della polvere di acciaio, che regola i livelli di temperatura assoluta raggiunta all'interno del primario, è stata fissata al 10.5% della conducibilità dell'acciaio AISI304.

Riguardo la curva di inserzione di potenza durante il transitorio, si è assunto che i riscaldatori forniscano ancora un certo livello di potenza quando la barra viene accesa. Perciò, nell'istante iniziale del transitorio la potenza passa dal 16% (funzione preriscaldatore) al 116% (funzione preriscaldatore più barra scaldante) per poi scendere gradualmente al 100% in 6000 s (funzione barra scaldante). Allo stesso modo, si è considerata una certa inerzia nella riaccensione dei riscaldatori a seguito dello spegnimento della barra, per cui la potenza viene fatta scendere allo 0% al termine del transitorio per poi risalire al 16% in funzione preriscaldamento che si aveva nello stazionario iniziale. La curva PRODTOT di Figura 25 mostra l'andamento della potenza inserita mediante la barra scaldante durante tutte le fasi del transitorio.

La boundary condition SECIN guida il comportamento del circuito secondario sia per quel che riguarda la portata sia la temperatura dell'acqua in ingresso. In questo caso si sono mantenuti i valori sperimentali, almeno durante il transitorio di accensione e spegnimento della barra. Infatti, nello stazionario iniziale, la condizione di potenza scambiata dal secondario nulla è raggiungibile solo ipotizzando la presenza di vapore alla pressione di 1.5 bar, imposta costante nella boundary condition SECOUT. Il picco di potenza rimossa dal secondario che si ha all'avvio del transitorio (SHXTOT) è dovuta all'improvvisa iniezione di acqua liquida (Figura 25).

Per quanto riguarda la portata di Figura 26, nello stazionario iniziale CATHARE valuta una portata di LBE pari a 1.9 kg/s dovuta all'inserzione di potenza del 16% da parte della barra scaldante, al fine di simulare l'effetto dei riscaldatori. La potenza calcolata da bilancio termico è nulla perché il bilancio è eseguito sulla potenza fornita dalla sola barra scaldante, questa si può ritenere valida solo in regime stazionario e con potenze non nulle della barra. Dopo l'accensione della barra scaldante, la portata di circolazione naturale valutata da CATHARE si attesta velocemente al valore stazionario di 5.29 kg/s,

come si può vedere da Figura 26. Nella stessa figura si può anche notare il non trascurabile errore di misurazione del flussimetro a induzione MP101 a questo livello di portate. L'errore sulla portata simulata è del +13% rispetto al valore sperimentale, ciononostante il valore è ancora in linea con quanto determinato dagli altri partecipanti al benchmark. In Tabella 11 è riportato il confronto delle portate stimate con gli altri codici di calcolo.

Tabella 11 – Portate stimate dai partecipanti al benchmark LACANES.

Dato Sperimentale	ENEA	RSE	SNU	Ansaldo	INEST	ENEA
da bilancio termico	(RELAP5)	(LEGO)	(MARS)	(RELAP5-3D)	(RELAP/SCDAPSIM/MOD4)	(CATHARE)
4.71	5.15	5.30	4.98	5.19	5.02	5.29

L'effetto dell'ipotizzata funzione di riscaldatore della barra, si può facilmente notare sulle temperature attraverso la sezione scaldante di Figura 27, in cui nello stazionario iniziale si ha una differenza di temperatura ingresso/uscita di circa 10°C.

In realtà, è stato fatto notare come questa differenza di temperatura iniziale sia dovuto principalmente ad un effetto di stratificazione della temperatura che si è tentato di riprodurre in CATHARE attivando i modelli di stratificazione per i componenti assiali. Purtroppo i suddetti modelli sembrano avere difficoltà con i metalli liquidi, cosa che richiederà un supplemento di indagine.

Una volta partito il transitorio, la salita delle temperature sia nella sezione scaldante (Figura 27) sia attraverso lo scambiatore di calore (Figura 28) seguono in modo soddisfacente i valori sperimentali, a testimoniare che l'assunzione fatta sulla curva di potenza si può ritenere corretta, almeno qualitativamente. Ovviamente i salti termici non possono che essere inferiori data la sovrastima della portata in circolazione naturale. La discrepanza iniziale sulle temperature nell'HX è probabilmente da attribuirsi alla presenza di altri riscaldatori nella regione del vaso di espansione o nel tratto orizzontale, non simulati nel presente modello.

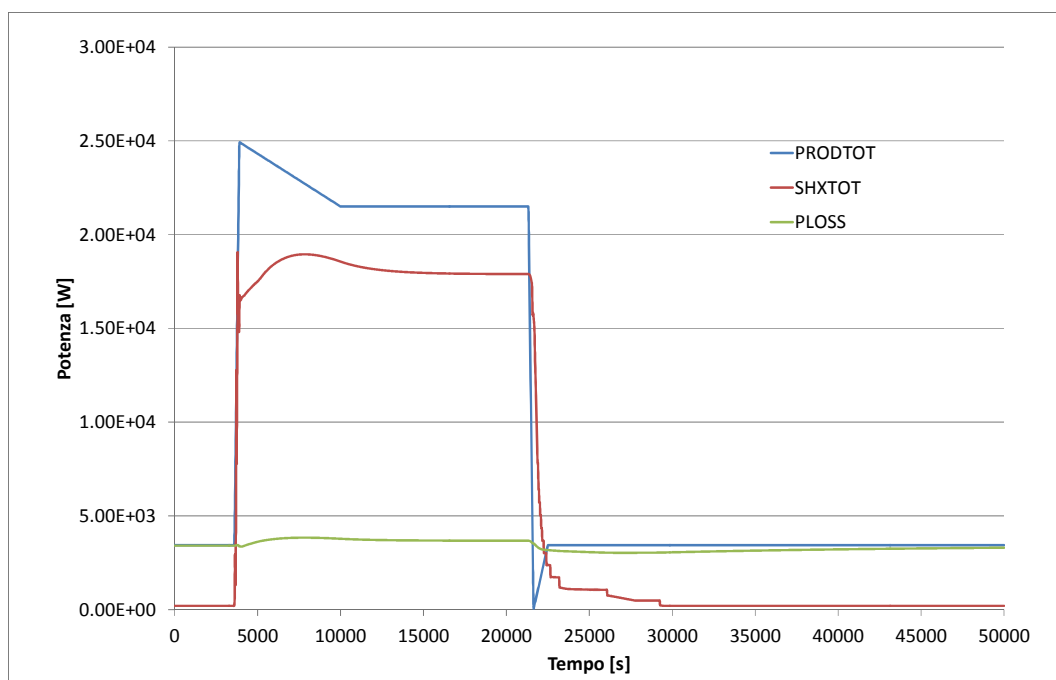


Figura 25 – Grafico delle potenze.

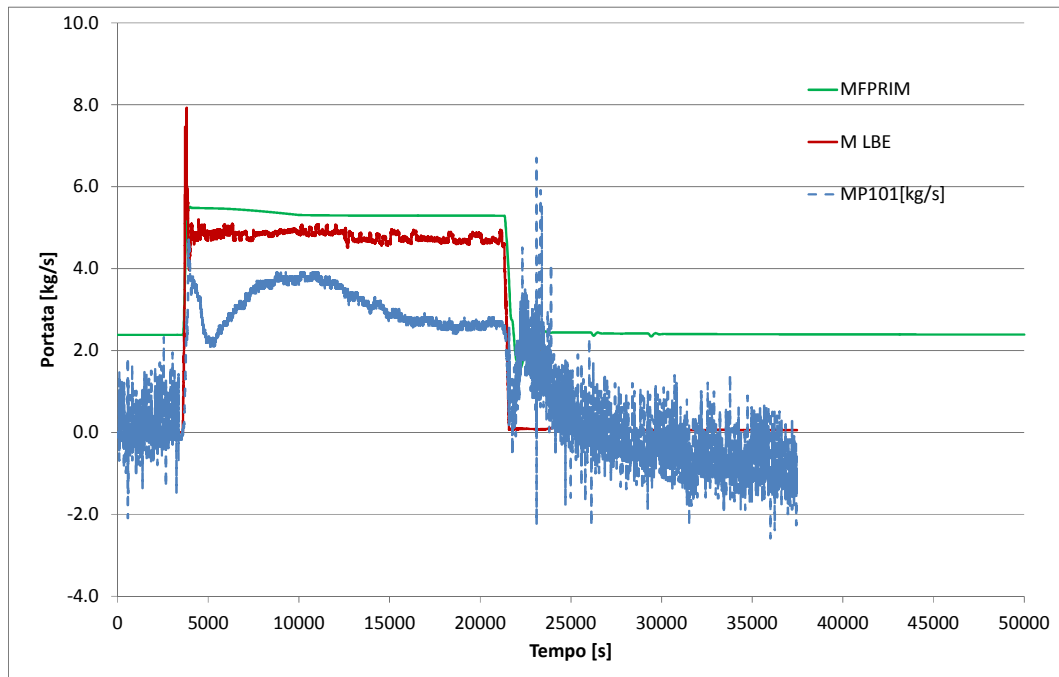


Figura 26 – Confronto delle portate di LBE.

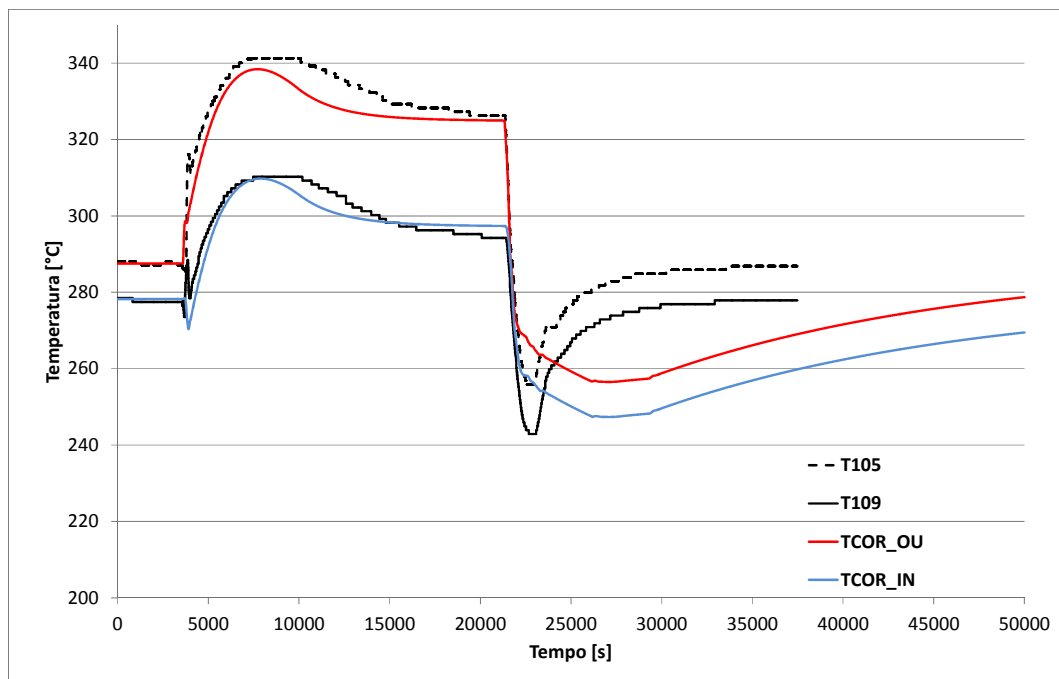


Figura 27 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita della sezione scaldante.

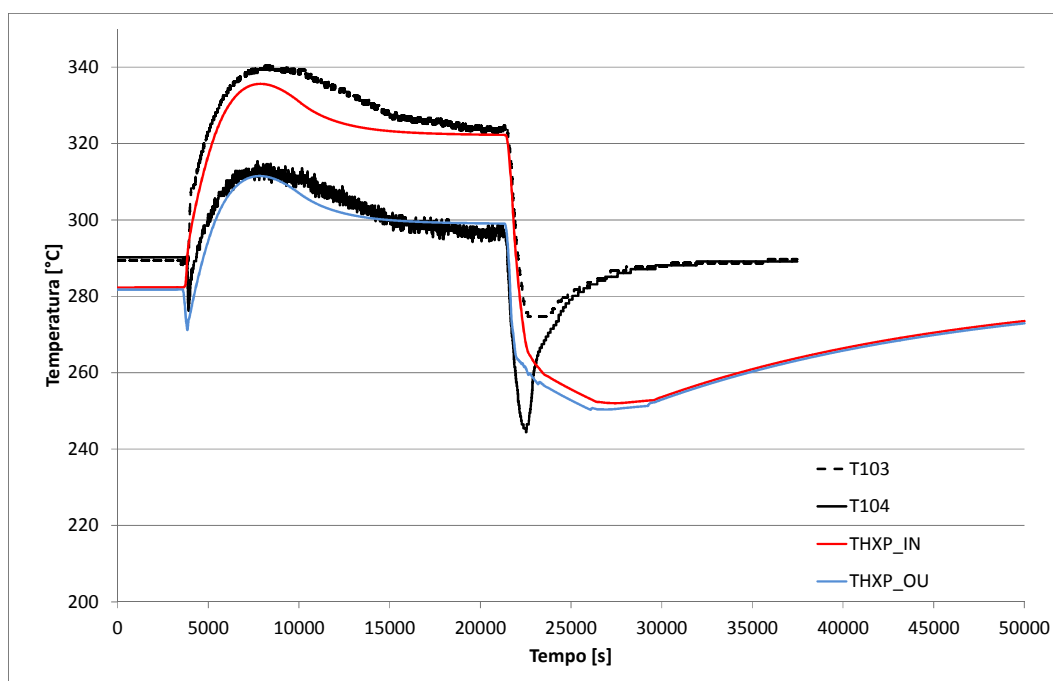


Figura 28 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita dell'HX lato primario (LBE).

Tutta la seconda fase del transitorio è profondamente affetta da incertezze sulla simulazione del circuito secondario. Nella simulazione CATHARE, un elevato livello di potenza è estratta dal secondario per un tempo più lungo (da 22000 a 30000 s di Figura 25) rispetto a quanto sembrano suggerire i dati sperimentali sulle temperature del circuito primario (Figura 27 e Figura 28). Inoltre, la stessa risalita delle temperature è molto più lenta nella simulazione che nella realtà sperimentale.

E' possibile affermare che CATHARE è in grado di approssimare sia qualitativamente che quantitativamente gli andamenti delle principali grandezze fisiche rilevate durante il transitorio e che le simulazioni hanno tratto giovamento dalle assunzioni fatte, in particolare sulla potenza fornita dai preriscaldatori. Nella fase di spegnimento della barra scaldante, non è stato possibile riprodurre un corretto scambio termico con il lato secondario ottenendo buoni risultati solo da un punto di vista qualitativo.

6. CONCLUSIONI

Nella presente annualità dell'Accordo di Programma ENEA/MSE triennale PTR 2012-2014, è proseguita l'attività di validazione di CATHARE con nuovi dati provenienti dalla facility Sudcoreana HELIOS e da una campagna sperimentale svolta sulla facility NACIE presso i laboratori ENEA Brasimone. Alcuni test della campagna sperimentale sono entrati a far parte del benchmark LACANES. Lo scopo è stato di verificare la capacità e i limiti del codice nel riprodurre test integrali, principalmente in condizioni di circolazione naturale, anche grazie al confronto con i risultati delle simulazioni RELAP5 svolte all'interno del benchmark. In particolare è stata testata l'ultima versione del codice, CATHAREv2.5_3mod2.1, la prima provvista nativamente delle proprietà termodinamiche degli HLM, rilasciata ufficialmente dal team di sviluppo.

L'attività ha riguardato in primo luogo la verifica degli stati stazionari raggiunti da CATHARE in due test di circolazione naturale a diversa potenza condotti sulla facility HELIOS, anche in confronto con il codice RELAP5. La seconda parte ha riguardato una revisione della simulazione dinamica del test 301

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 41	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

in circolazione naturale di NACIE, già simulata nella precedente annualità e confrontata con i dati sperimentali.

Il modello di HELIOS, sviluppato in precedenti attività, è stato migliorato ma a causa della mancanza dell'olio come fluido termovettore in CATHARE, il circuito secondario è stato simulato con le condizioni di scambio termico ottenute da simulazioni RELAP5. Il modello è stato calibrato con l'approccio "calorimetrico" suggerito nel benchmark. Le portate di circolazione naturale valutate a 15 kW e 9.8 kW sono risultate in buon accordo con i dati sperimentali. Alcune incongruenze nelle rilevazioni sperimentali, in particolare nei bilanci termici dello scambiatore di calore, porteranno entro breve a nuovi dati sperimentali, anche in vista della chiusura delle attività del benchmark LACANES.

Nella simulazione del Test 301, le principali fonti di incertezza nelle simulazioni riguardavano la mancanza di informazioni sulle procedure di prova, la conducibilità della polvere di acciaio posta nell'intercapedine tra primario e secondario, e alcune incertezze riguardanti il regime di funzionamento del circuito secondario. La revisione di alcune perdite di carico concentrate prototipiche, anche supportate da calcoli CFD all'interno del benchmark, hanno portato a una sovrastima della portata di circolazione naturale e quindi a una riduzione sui salti termici nel core e nello scambiatore. La sovrastima della portata risulta comunque in linea con quanto ottenuti dagli altri partner e con altri codici all'interno del benchmark LACANES. Un limite di CATHARE riscontrato in queste simulazioni è l'impossibilità di impiegare l'opzione di stratificazione delle temperature all'interno dei moduli 1D (pipe); il problema potrebbe essere legato all'implementazione dei metalli liquidi e sarà oggetto di indagine. Ciononostante, CATHARE si è dimostrato capace di approssimare sia qualitativamente che in parte quantitativamente gli andamenti delle principali grandezze fisiche rilevate durante il transitorio, e le simulazioni sono state migliorate a valle di alcune assunzioni fatte sulla potenza fornita dai preriscaldatori. Solo nella fase di spegnimento della canna scaldante, non è stato possibile riprodurre un corretto scambio termico con il lato secondario ottenendo buoni risultati solo da un punto di vista qualitativo.

A conclusione dell'attività triennale, si può affermare che il codice CATHARE ha interessanti possibilità di impiego nelle simulazioni termoidrauliche dei futuri reattori di IV Generazione, e la presente attività ha permesso di mettere in luce e talvolta risolvere alcune lacune nell'implementazione dei metalli liquidi nel codice di sistema. Tuttavia, sia per limiti intrinseci al codice, cioè la mancanza fluidi tecnici abbastanza comuni come gli oli e l'impossibilità di simulare il gas-lifting (non-condensabili immersi in una matrice di metallo liquido), sia per un evidente carenza di dati sperimentali adeguati alla validazione di codici di sistema, la validazione del codice CATHARE sin qui condotta non si può definire conclusiva. Nuove attività con lo stesso oggetto sono già in atto e in previsione sia nell'ambito della collaborazione tra ENEA e CEA, sia in progetti finanziati dalla Comunità Europea.

.....

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 42	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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] OECD/NEA, "Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-Hydraulics and Technology," *NEA No. 7268*, 2015.
- [4] 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.
- [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] A. Cervone, S. Manservigi, M. Polidori, and P. Meloni, "Valutazione e modifica del codice termoidraulico di sistema CATHARE applicato a metalli liquidi pesanti e ai dati sperimentali del benchmark LACANES," Bologna, CIRTEN-UNIBO RL 1303/2010, 2010.
- [7] Tarantino M., "Gas Enhanced Circulation Experiments On Heavy Liquid Metal System," *Report ENEA HS-F-R-001*, 2007.
- [8] CEA, "CATHARE2 V2.5_1 : User's Guidelines," *DER/SSTH/LDAS/EM/2005-034* , Febbraio 2006.
- [9] CEA, "CATHARE 2 V2.5_2mod5.1: Dictionary of Directives and Operator ," *DEN/CAD/DER/SSTH/LDLD/EM/NT/2010-024/A* , Maggio 2010.
- [10] M. Polidori, S. Manservigi, and R. Scardovelli, "Sviluppo e validazione del codice di calcolo per la termoidraulica di sistema CATHARE-2 per reattori refrigerati a metallo liquido pesante," *Accordo di Programma ENEA/MSE, PAR2011*, Rapporto Tecnico NNFISS – LP3 - 017, 2011.
- [11] CEA, "GUITHARE User's Dictionary Guide," *DTS/OCC/OC2D07043/003/V0M2*.
- [12] M. Polidori, "Progressi nella validazione del codice T/H CATHARE2 attraverso il benchmark LACANES," *Rapporto Tecnico ENEA ADPFISS–LP2–043*, Report.RdS/PAR2013/046, 2014.
- [13] S.H. Jeong, "Development of an Integral Test Loop, HELIOS and Investigation of Natural Circulation Ability for PEACER," *Nuclear Engineering Department*, Seoul National University, Seoul 2006.
- [14] Task Force on Lead-Alloy-Cooled Advanced Nuclear Energy Systems, "Benchmarking of thermalhydraulic loop models for lead-alloy-cooled advanced nuclear energy systems - Phase I: Isothermal forced convection case," *OECD/NEA, NEA/NSC/WPFC/DOC(2012)17*, June 2012.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] S. H. Jeong et al., "Operation Experience of LBE loop: HELIOS," *Proceeding of ICAPP06* 2006.
- [18] J. Lim et al., "Progresses in the Operation of Large Scale LBE Loop HELIOS," *Proceeding of ICAPP07*, Nice, France 2007.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 43	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

- [19] I.E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd ed.: Jaico Publishing House, 2003.
- [20] 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*.
- [21] W. Ambrosini, G. Forasassi, N. Forgione, 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.
- [22] W. Ambrosini, G. Forasassi, N. Forgione, 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.
- [23] 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.
- [24] K. Rehme, "Pressure drop correlations for fuel element spacers," *Nuclear Technology Review*, vol. 17, January 1973.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 44	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 – GUITARE, interfaccia grafica di CATHARE.....	5
Figura 2 – Schema 3D di HELIOS con posizionamento della strumentazione.....	9
Figura 3 – Perdite di pressione cumulate con portata di 13.57 e 3.27 kg/s di LBE.....	10
Figura 4 – Schema del modello di HELIOS per RELAP5.....	12
Figura 5 – Differenza tra capacità termiche THT e Dowtherm RP.	12
Figura 6 – Calibrazione modello di HELIOS per RELAP5.	13
Figura 7 – Schema della nuova nodalizzazione di HELIOS in circolazione naturale.	14
Figura 8 – Confronto delle temperature lungo il loop HELIOS nel test a 15 kW.....	16
Figura 9 – Confronto delle temperature lungo il loop HELIOS nel test a 9.8 kW.....	17
Figura 10 – Configurazione loop NACIE.....	20
Figura 11 – Schema della regione scaldante di NACIE.	21
Figura 12 – Schema dello scambiatore di calore e vista del giunto ad espansione.	23
Figura 13 – Schema del flussimetro a induzione MP101 installato nel circuito primario di NACIE.	24
Figura 14 – Sinottico della facility NACIE.....	26
Figura 15 – P&I della facility NACIE.	27
Figura 16 – Schema delle sezioni principali di NACIE (con dettaglio del vaso di espansione.	28
Figura 17 – Schema della posizione della regione attiva del bundle e la tabella delle elevazioni.	28
Figura 18 – Test 301: portata di LBE misurata (MP101) e stimata con bilancio termico.....	29
Figura 19 – Test 301: temperature di LBE e acqua.....	29
Figura 20 – Nodalizzazione di NACIE per CATHARE.....	31
Figura 21 – Schema della griglia spaziatrice.....	32
Figura 22 – Schema della griglia superiore.....	33
Figura 23 – Sezione del vaso di espansione.	34
Figura 24 – Schemi Idelchik per ingresso in tubi (Diag. 3.1 e 3.8).....	35
Figura 25 – Grafico delle potenze.....	38
Figura 26 – Confronto delle portate di LBE.	39
Figura 27 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita della sezione scaldante.....	39
Figura 28 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita dell’HX lato primario (LBE).	40

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 45	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 – Dati sperimentali test LACANES in circolazione naturale.	11
Tabella 2 – Temperature sperimentali test LACANES in circolazione naturale.....	11
Tabella 3 – Confronto dei risultati ottenuti nel test a 15 kW.....	16
Tabella 4 – Confronto dei risultati ottenuti nel test a 9.8 kW.....	17
Tabella 5 – Principali dati geometrici di NACIE.	20
Tabella 6 – Caratteristiche delle barre scaldanti di NACIE.	20
Tabella 7 – Altezza e posizione azimutale delle termocoppie installate nella regione attiva.....	22
Tabella 8 – Dimensioni dei tubi dello scambiatore NACIE.	23
Tabella 9 – Matrice di prova della campagna sperimentale sulla facility NACIE.	25
Tabella 10 – Test 301: principali dati sperimentali mediati in 1 ora di stazionario.	30
Tabella 11 – Portate stimate dai partecipanti al benchmark LACANES.	38

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 46	di 46
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

LISTA DEGLI ACRONIMI

ADS	Accelerator Driven System
AREVA-NP	(ex FRAMATOME)
CATHARE	Code for Analysis of Thermalhydraulics during an Accident of Reactor and safety Evaluation
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIRCE	CIRColazione Eutettico
CIRTEN	Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare
DIENCA	Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale
EDF	Électricité de France
ENEA	Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
FPS	Fuel Pin Simulator
GEC	Gas Enhanced Circulation (circolazione forzata promossa da iniezione di gas)
GUITHARE	Graphic User Interface of CATHARE
HELIOS	Heavy Eutectic liquid metal Loop for Integral test of Operability and Safety of PEACER
HLM	Heavy Liquid Metal
HX	Heat eXchanger
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
ICE	Integral Circulation Experiment
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
LACANES	Lead-Alloy Cooled Advanced Nuclear Energy System
LBE	Lead-Bismuth Eutectic
LFR	Lead Fast Reactor
LWR	Light Water Reactor
MSE	Ministero dello Sviluppo Economico
NACIE	NAtural Circolation Experiment
NC	Natural Circulation
OECD/NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development/ Nuclear Energy Agency
PEACER	Proliferation-resistant Environment-friendly Accident-tolerant Continuable and Economical Reactor
SAAS GmbH	Systemanalyse & Automatisierungsservice Gesellschaft mit beschränkter Haftung
STC	Specific Topic of Cooperation