ENEA Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 043	L	1	45

Titolo

Progressi nella validazione del codice T/H CATHARE2 attraverso il benchmark LACANES

Descrittori

Tipologia del documento:

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 seconda annualità dell'Accordo di Programma tra ENEA e Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito 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 si prosegue l'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 da una campagna sperimentale svolta sulla facility NACIE, entrati a far parte del benchmark internazionale LACANES, ed è stata verificata la capacità del codice nel riprodurre test integrali in circolazione naturale, anche in confronto con simulazioni RELAP5.

Note

Autore: M. Polidori (ENEA)

Copia n. **In carico a:**

REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE
2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	15/09/2014	NOME	Massimiliano Polidori	Felice De Rosa	Mariano Tarantino
			FIRMA			

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 (rivedere volumi con pelo libero) 5
3. LA FACILITY NACIE 7
3.1. Descrizione della facility NACIE 7
3.2. La campagna sperimentale NACIE 11
4. ATTIVITA' RELATIVE AL BENCHMARK LACANES 19
4.1. Il benchmark LACANES 19
4.2. Il modello RELAP5 di NACIE 20
4.2.1. Descrizione del modello 20
4.2.2. Valutazione delle perdite di carico 22
4.3. Descrizione dei Test simulati 27
4.3.1. Test 301 27
4.3.2. Test 206 28
5. RISULTATI DELLA VALIDAZIONE 30
5.1. Il modello NACIE per CATHARE 30
5.2. Determinazione delle perdite di carico 32
5.3. Risultati 33
5.3.1. Verifica delle perdite di carico 33
5.3.2. Simulazione dinamica del Test 301 36
6. CONCLUSIONI 40
BIBLIOGRAFIA 41
LISTA DELLE FIGURE 43
LISTA DELLE TABELLE 44
LISTA DEGLI ACRONIMI 45

1. INTRODUZIONE

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

Nell'ambito della seconda annualità dell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA (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 un metallo liquido come 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 liduidi [2]. Questa metodologia lascia spazio a futuri aggiornamenti delle stesse correlazioni, quando maggiori evidenze sperimentali saranno disponibili. Per quanto riguarda il dettaglio delle modifiche apportate al si rimanda al riferimento [3].

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 provenienti dalla facility Sudcoreana HELIOS [4], forniti all'interno del benchmark internazionale LACANES a cui ENEA partecipa con il codice RELAP5 [5], e dalla facility italiana NACIE presso i laboratori ENEA Brasimone [6]. Durante queste attività, 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 presente annualità dell'Accordo di Programma ENEA/MSE (seconda annualità del PTR 2012-2014), proseguirà l'attività di validazione di CATHARE con nuovi dati provenienti da una recente campagna sperimentale svolta sulla facility NACIE al fine di testare un nuovo misuratore di flusso (flowmeter) a induzione per metalli liquidi. Alcuni test della campagna sperimentale sono entrati a far parte del benchmark LACANES. Lo scopo sarà di verificare la capacità e i limiti del codice nel riprodurre test integrali su impianti sperimentali, principalmente in condizioni di circolazione naturale, anche in confronto con i risultati delle simulazioni RELAP5 svolte all'interno del benchmark. In particolare sarà testata 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.

2. IL CODICE TERMOIDRAULICO DI SISTEMA CATHARE

2.1. Generalità

CATHARE (Code for Analysis of THermalhydraulics during an Accident of Reactor and safety Evaluation) [7] 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] [3], 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. [7] [8].

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 [9].

Per la costruzione di modelli di simulazione, l'editing e il post-processing è disponibile anche un'interfaccia grafica chiamata GUITHARE [10] che permette una visualizzazione interattiva dei risultati nel corso dei calcoli (vedi Figura 1).

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

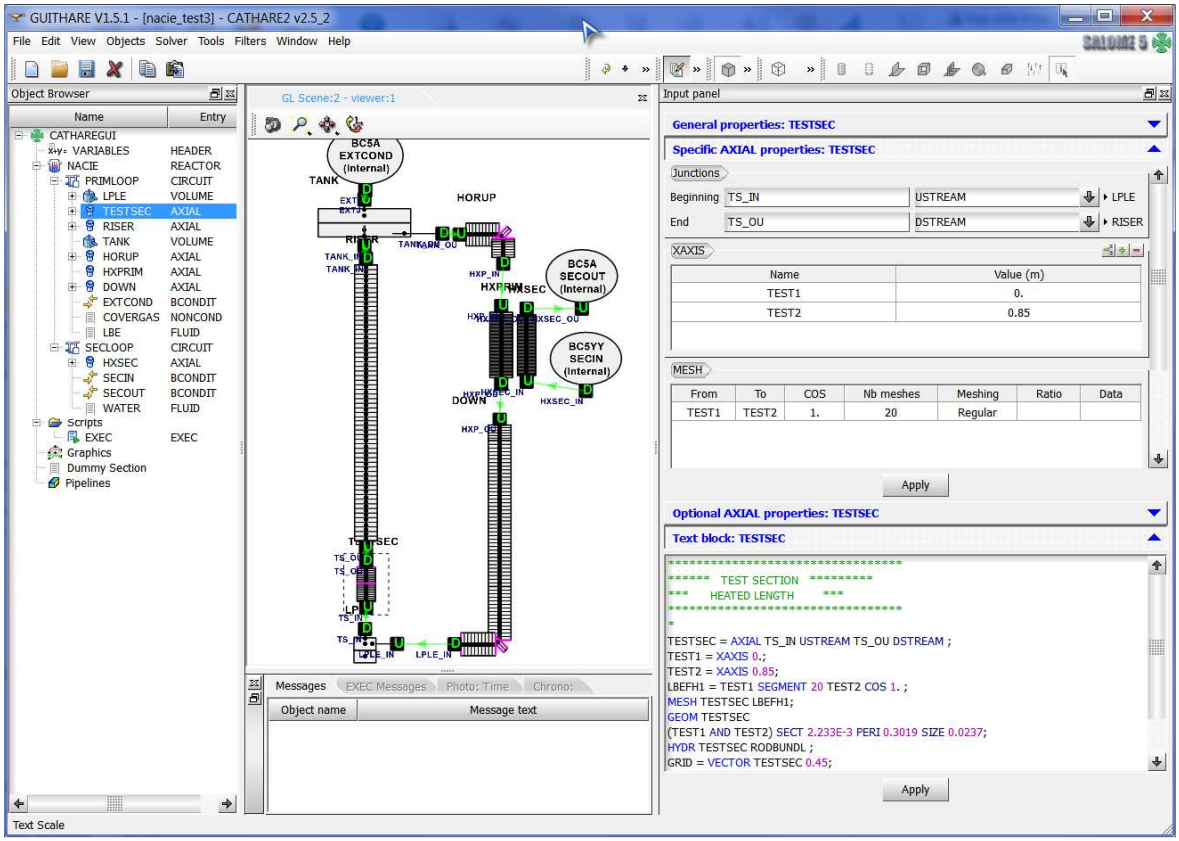


Figura 1 – GUITARE, interfaccia grafica di CATHARE.

2.2. Stato del processo di validazione di CATHARE (rivedere volumi con pelo libero)

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

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

L'inizio di una vera e propria fase di validazione è stata discussa in [4], dove i dati provenienti da una campagna sperimentale sull'impianto a piombo-bismuto HELIOS (South Korea) sono stati impiegati per verificare le capacità di CATHARE di simulare il comportamento integrale della facility in

condizioni stazionarie. I dati erano stati forniti nell'ambito della partecipazione ENEA al benchmark internazionale LACANES con una versione del codice RELAP5 anch'essa modificata per metalli liquidi pesanti. L'attività aveva sostanzialmente riguardato la valutazione delle perdite di carico lungo il circuito in regime di circolazione forzata in condizioni isoterme stazionarie ad alta (13.57 kg/s) e bassa portata (3.27 kg/s). Alcune simulazioni preliminari in regime di circolazione naturale erano state effettuate ma i dati sperimentali non erano ancora disponibili.

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

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

$Lev = 8.54e5 + 1. \bullet T$ J/kg

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

3. LA FACILITY 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 [11]. 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.

3.1. 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 2, mentre i principali dati geometrici che caratterizzano l'impianto NACIE sono riassunti nella Tabella 1.

Nella parte inferiore del riser si trova la sorgente di calore installata tramite una flangia, mentre nella parte superiore del downcomer è collegato uno scambiatore di calore.

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

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

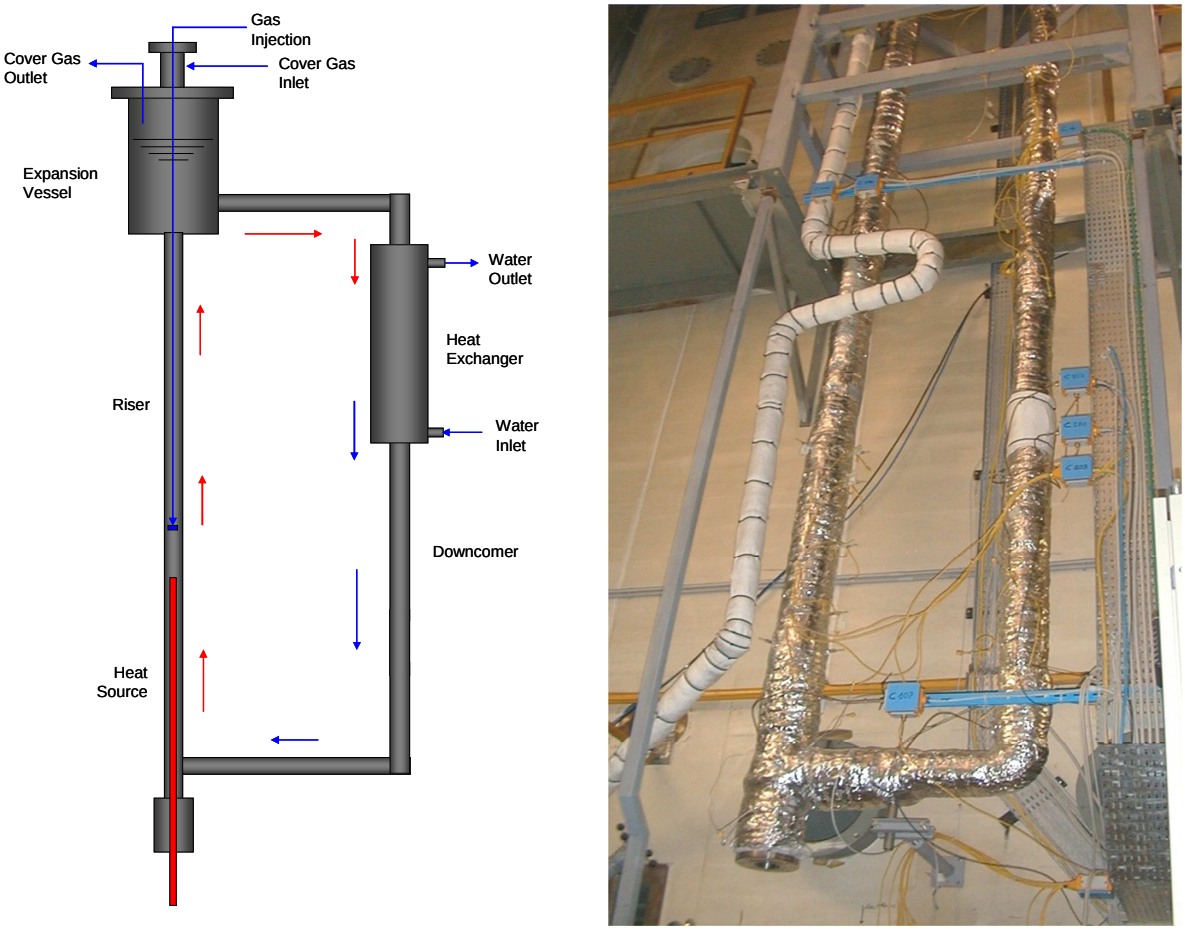


Figura 2 – Configurazione loop NACIE.

Tabella 1 – Principali dati geometrici di NACIE.

Altezza Totale	9231	[mm]
Larghezza	1000	[mm]
Diametro Interno Tubi	62.7	[mm]
Spessore Tubi	5.16	[mm]
Altezza Vaso di Espansione	765	[mm]
Diametro Vaso di Espansione	254.5	[mm]
Lunghezza Scambiatore di Calore	1500	[mm]
Lunghezza Attiva Sorgente di Calore	854	[mm]

Tabella 2 – 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]

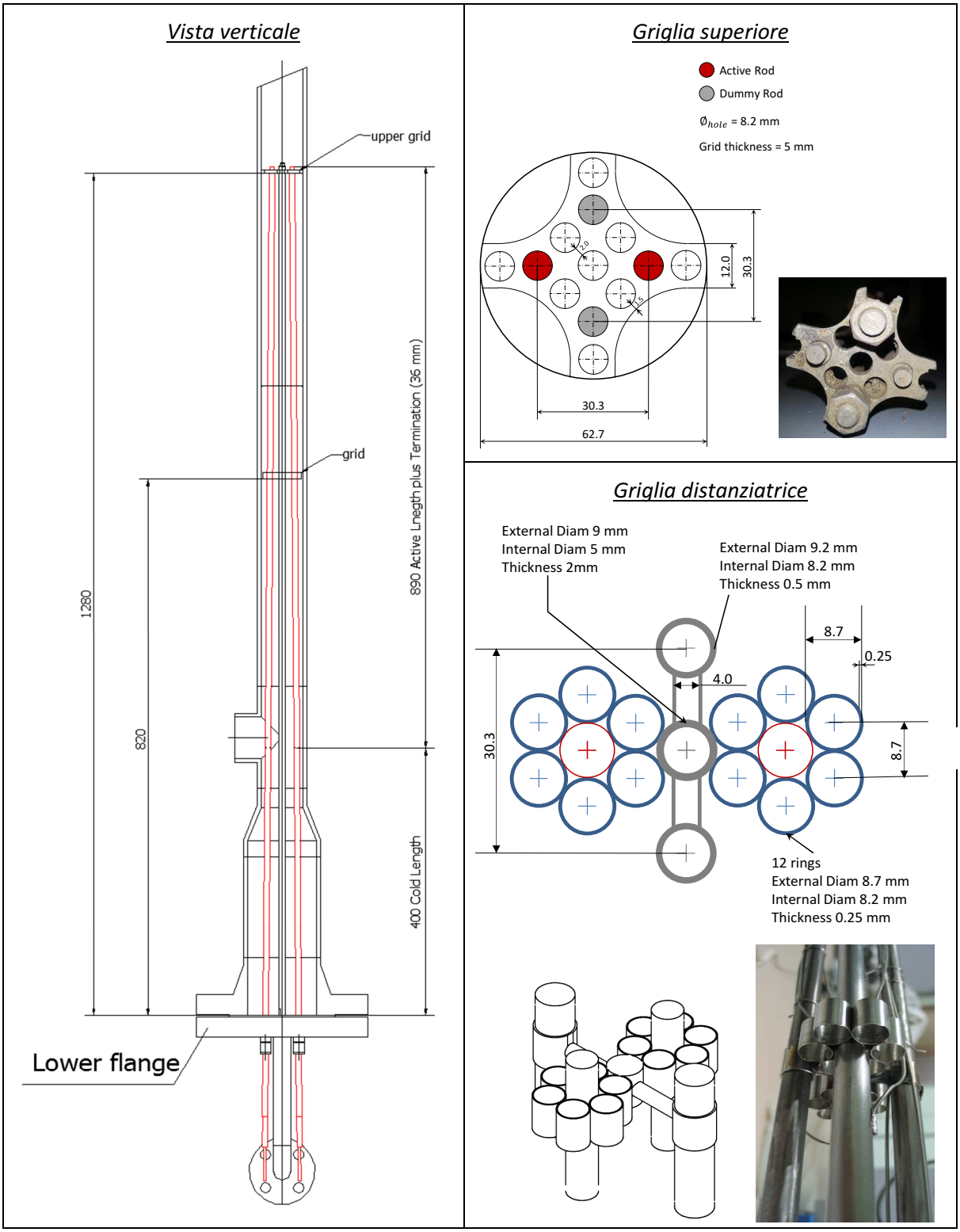


Figura 3 – Schema della regione scaldante di NACIE.

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

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

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

Per favorire la circolazione di LBE nel loop è stato adottata una tecnica di gas lifting [12] [13] [14] [6]. 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 Nl/min con una pressione di iniezione massima di 5.5 bar.

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

La regione anulare creata tra il tubo interno e quello centrale è riempito 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.

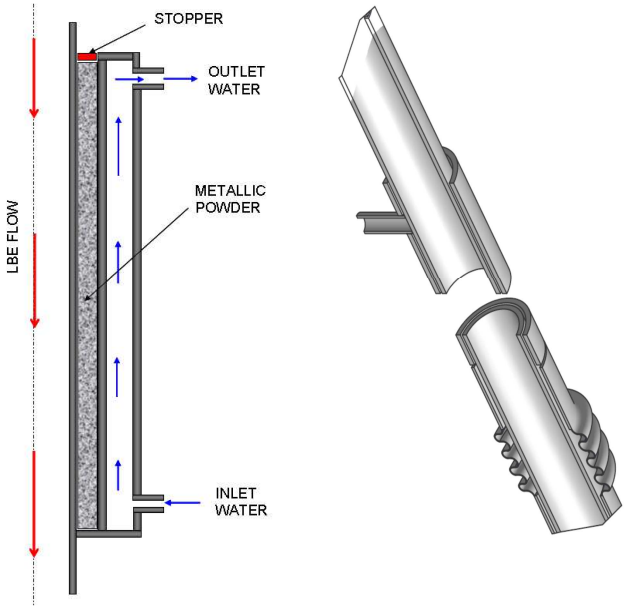


Figura 4 – Schema dello scambiatore di calore e vista del giunto ad espansione.

Tabella 4 – Dimensioni dei tubi dello scambiatore NACIE.

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

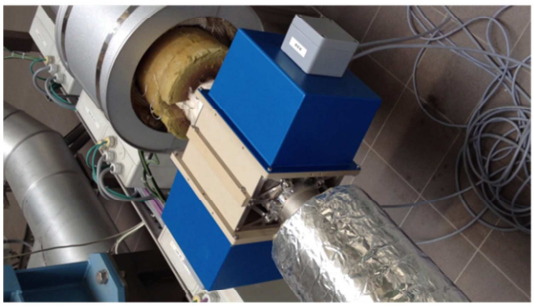
La zona anulare contenente la polvere è chiusa nella parte superiore da un “tappo” in grafite al fine di evitare la dispersione della polvere. Infine, sul tubo esterno un giunto assiale è installato per compensare l'espansione assiale differenziale tra il tubo centrale ed esterno. Inoltre, il gap creato dalla polvere tra il lato primario e secondario dello scambiatore permette di ridurre il gradiente termico attraverso lo spessore dei tubi, infatti, la sua resistenza termica è di circa il 30 ÷ 50% del totale. La rugosità dei materiale è pari a 3.2e-5 m.

3.2. 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

2012, dopodiché è stato calibrato. Un immagine e uno schema del flussimetro a induzione sono riportati in Figura 5.



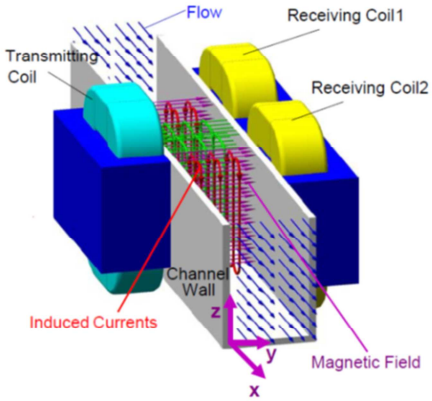


Figura 5 – Schema del flussimetro a induzione MP101 installato nel circuito primario di NACIE.

A causa dell'assenza di valvole nel circuito, la procedura di calibrazione è stata ripetuta alcune volteal 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 Nl/min e si raggiunge un nuovo stato di equilibro 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 5 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 (Tav). Diverse Tav 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 5 – Matrice di prova della campagna sperimentale sulla facility NACIE.

ID	***T_{av} [°C]***	***Power %***	***Power [kW]***	***Ramp t [min]***	***Heat Sink***	***Glift [Nl/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.

Nella seguente Figura 6 viene riportata una vista del sinottico della facility NACIE da dove si può apprezzare una vista generale della facility, dei sistemi ausiliari e la posizione di massima della strumentazione. Un più dettagliato schema P&I è riportato in Figura 7.

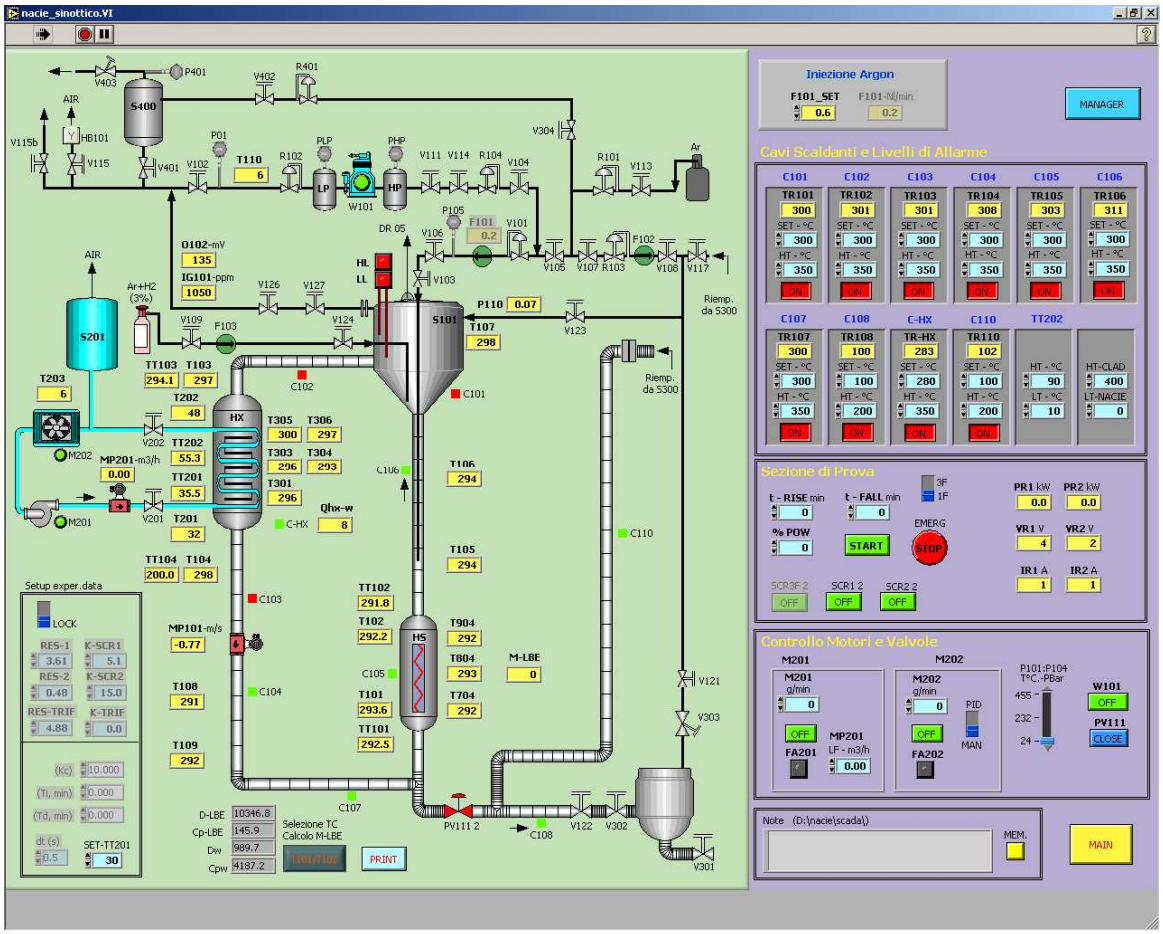


Figura 6 – Sinottico della facility NACIE.

I dati resi disponibili per la presenta campagna sperimentale, con riferimento alla relativa strumentazione, sono:

- F101 portata di Argon in GEC [Nl/min]
- IR2 corrente fornita al bundle [A]
- M201 velocità della pompa sul lato secondario [rpm]
- M202 velocità dell'air cooler [rpm]
- MP101 portata in massa di LBE [kg/s]
- MP102 portata in massa di acqua (circuito secondario) [kg/s]
- PR2 potenza del bundle [kW]
- T101 to T109 temperature lungo il circuito primario (vedi P&I)
- T110 temperatura dell'Argon
- T201 temperatura in ingresso all'HX
- T202 temperatura in uscita dall'HX
- VR2 tensione del rod bundle [V]

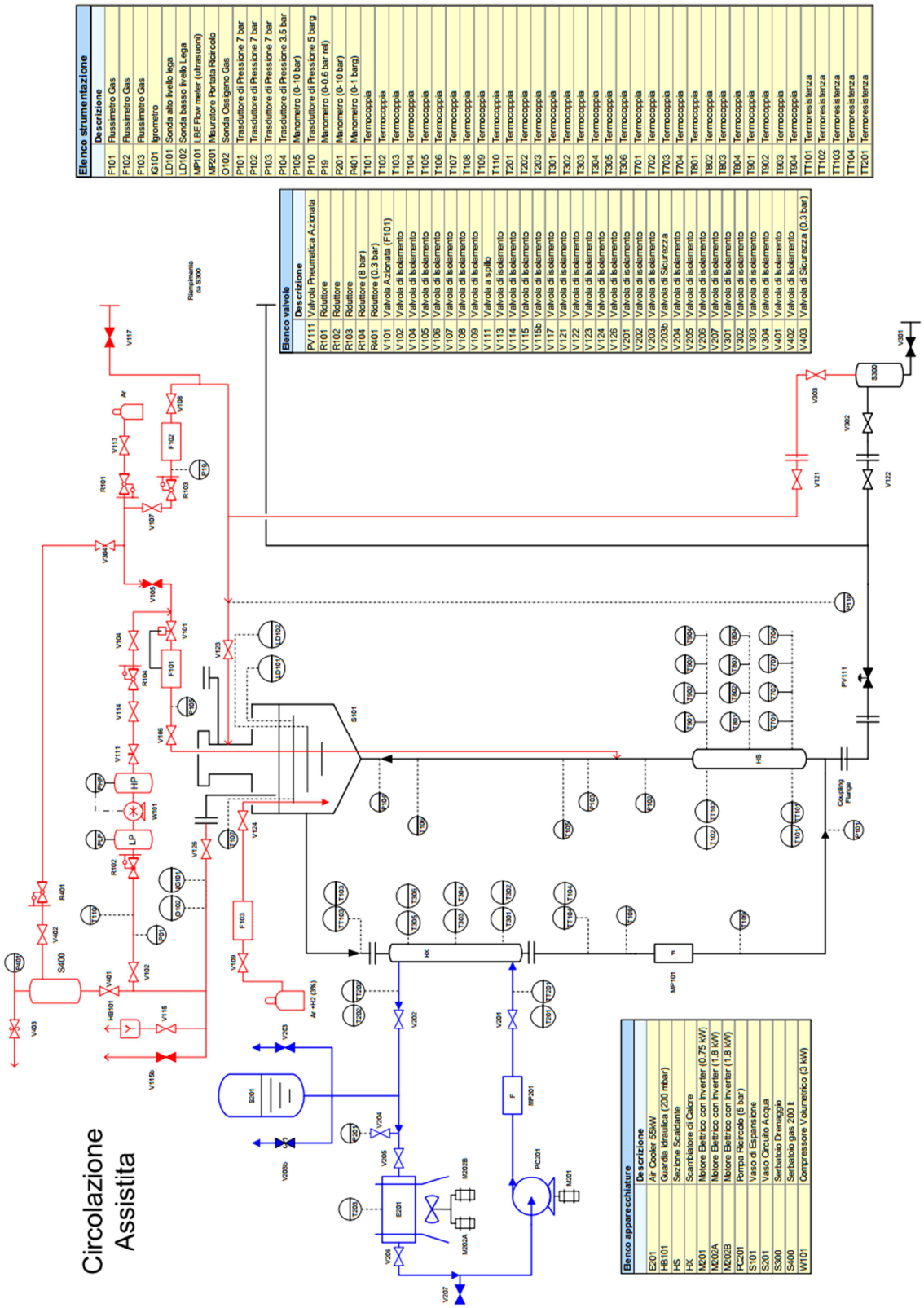


Figura 7 – P&I della facility NACIE.

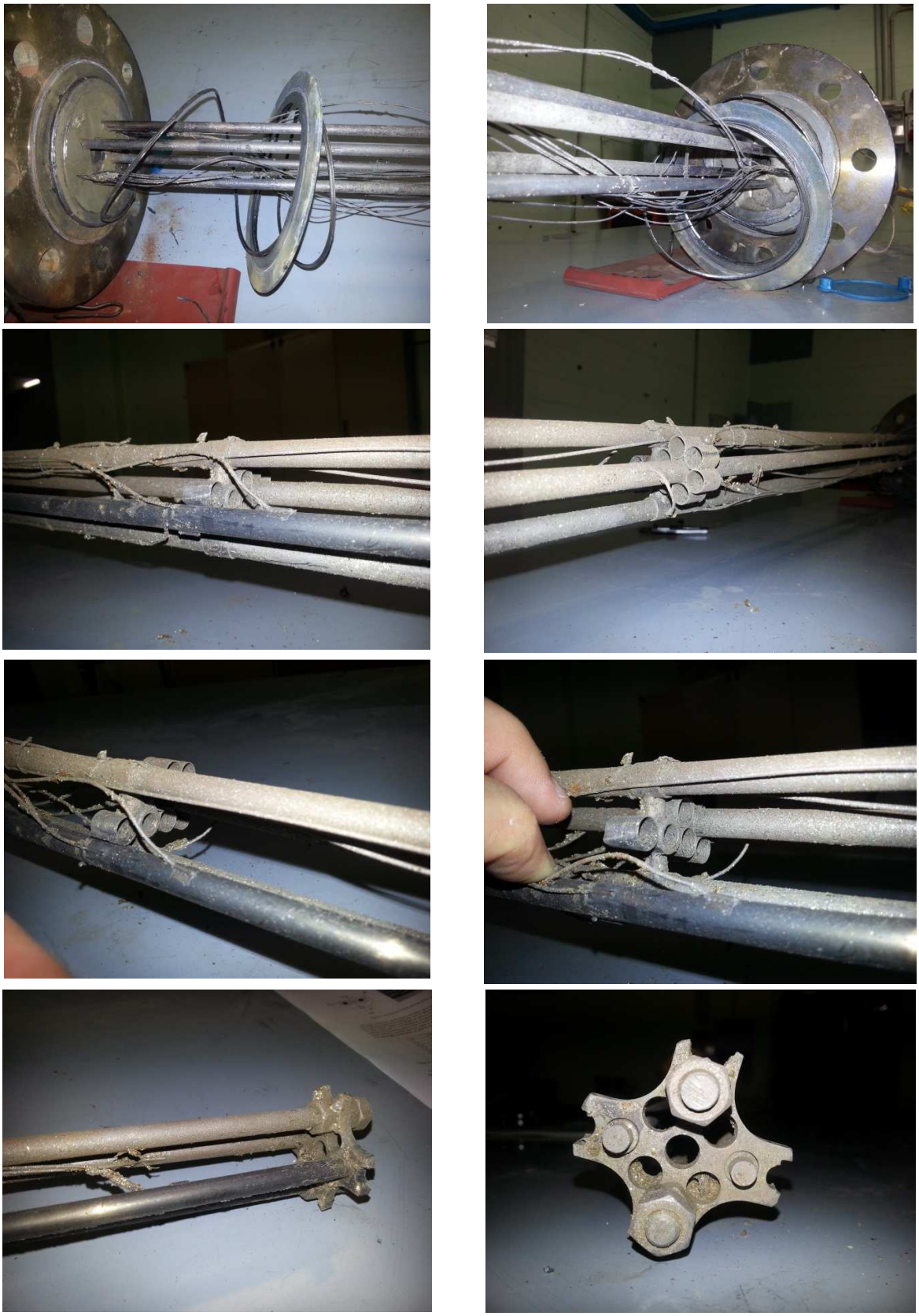


Figura 8 – Foto del rod bundle smontato a valle della campagna sperimentale.

Nella raccolta di immagini di Figura 8 si può vedere il rod bundle dopo che è stato smontato alla fine della campagna sperimentale e in previsione della revisione e upgrade generale a cui sarà sottoposto NACIE. Le misure rilevate hanno permesso di chiarire alcune incertezze relative principalmente alla forma delle griglie (vedi Figura 3), fondamentale per la determinazione delle perdite di carico.

Grazie alle misurazioni effettuate sul bundle, si è anche 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 9). In Figura 10 un particolare della posizione della regione attiva del bundle e la tabella di verifica delle elevazioni dell'impianto.

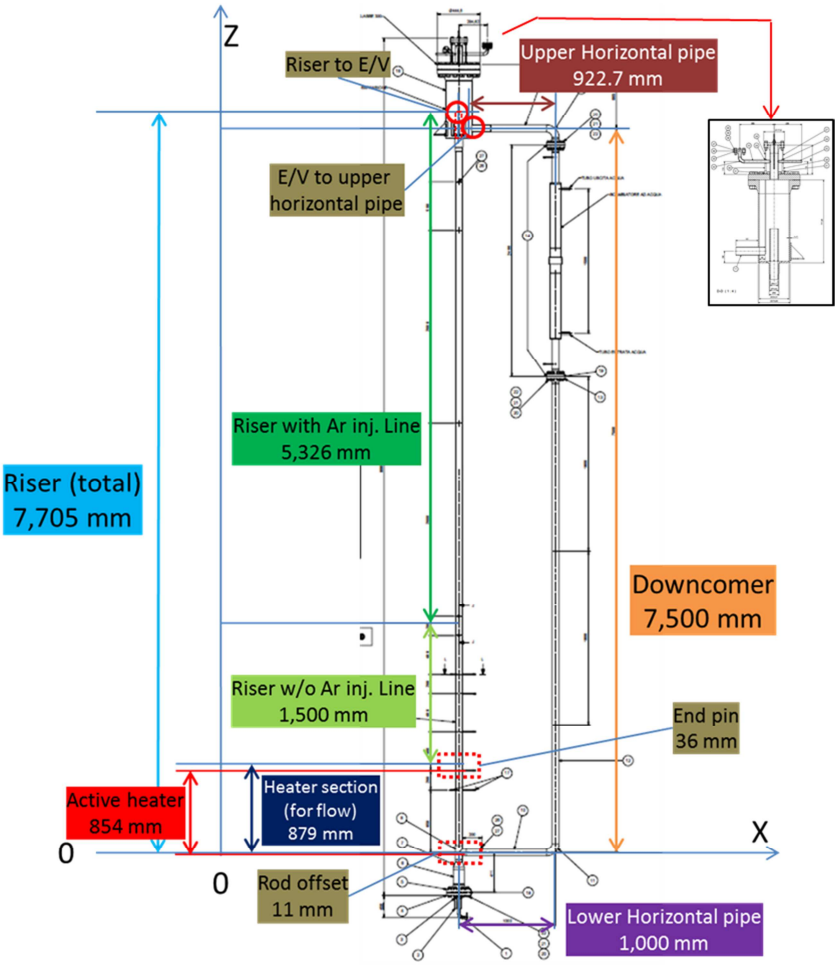
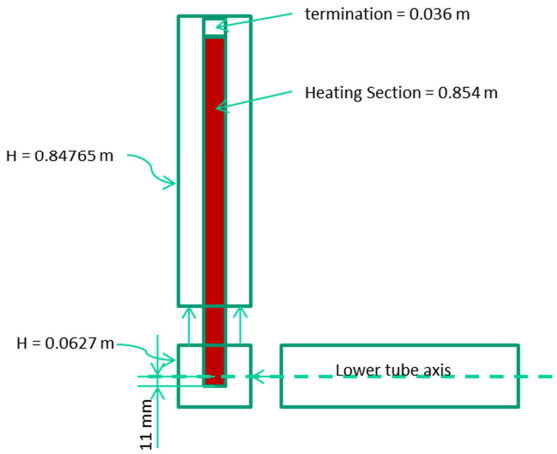


Figura 9 – Schema delle sezioni principali di NACIE (con dettaglio del vaso di espansione.



Rod offset	-0.011	m
Heating+termin.	+0.890	m
Riser w/o Ar	+1.500	m
Riser w Ar	+5.326	m
TOTAL «RISER»	7.705	m
E/V to upper horizontal	-0.205	m
Downcomer	-7.500	m
TOTAL «DOWNCOMER»	-7.705	m

Figura 10 – Schema della posizione della regione attiva del bundle e la tabella delle elevazioni.

4. ATTIVITA' RELATIVE AL BENCHMARK LACANES

4.1. 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 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 alto 12 metri costruito alla Seoul National University nel 2005 [15]. 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 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 [16].

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 discrepanza 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.

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 [4].

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 lato, 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 sta cercando 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 a circolazione forzata (gas enhanced circulation) e 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 5 sono:

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

4.2. Il modello RELAP5 di NACIE

4.2.1. Descrizione del modello

Il modello monodimensionale di NACIE sviluppato per il codice di sistema RELAP5 è riportato in Figura 11. Nel confronto con la vista isometrica della facility è semplice riconoscere le varie sezioni in

cui è stata discretizzata per conservare il percorso del flusso di LBE. Le strutture termiche sono tutte simulate (FPS, HX, tubi) e considerate adiabatiche in prima approssimazione (assunzione avallata dai dati sperimentali). Le perdite di carico distribuite sono calcolate dal codice (Colebrook-White con approssimazione di Zigrang-Sylvester). Le perdite di carico concentrate sono valutate con l'ausilio dell'Handbook Idelchik [17]. 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.

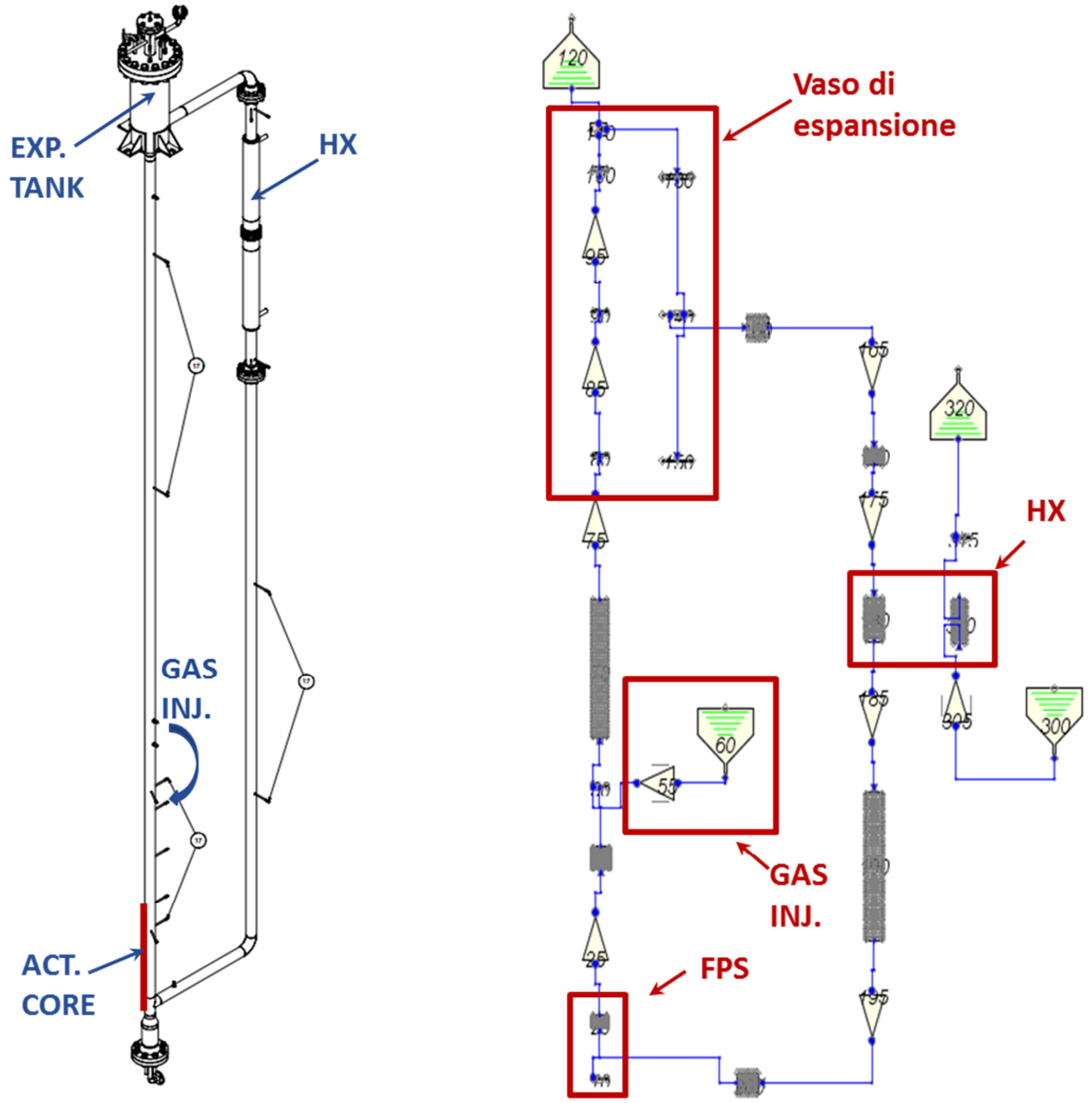


Figura 11 – Vista isometrica di NACIE e schema della nodalizzazione per RELAP5.

Le proprietà termodinamiche della lega piombo-bismuto implementate in RELAP5 sono derivate dal Soft-Sphere Model [18]. Per quanto riguarda le correlazioni di scambio termico convettivo adottate, nel circuito primario a LBE si usa la correlazione di Seban-Shimazaki:

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

dove Nu è il numero di Nusselt, Pe è il numero di Peclet, mentre per il circuito secondario si impiega la correlazione standard di RELAP5, Dittus-Boelter:

$$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$$

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, che ha lo scopo di abbattere gli elevati flussi termici provenienti dal lato primario, rappresenta un grado di libertà (non esiste un valore sperimentale) per ottenere adeguate simulazioni ed è stato calibrato al 12.5% della conducibilità dell'acciaio AISI304.

I risultati ottenuti con il modello RELAP5 saranno oggetto di confronto con i risultati di CATHARE presentati nel Cap. 4.3.

4.2.2. Valutazione delle perdite di carico

Griglia spaziatrice

La griglia spaziatrice posta a circa metà altezza del bundle, schematizzata in Figura 12 e fotografata in Figura 8, 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 alloggiate le due barre dummy con funzione di supporto dell'intero bundle. Le dimensioni riportate sono state misurate direttamente sulla struttura smontata.

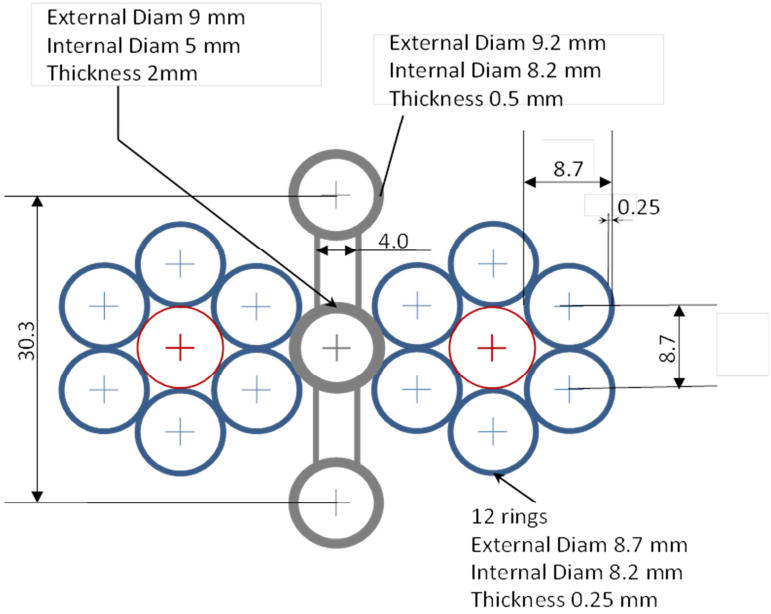


Figura 12 – Schema della griglia spaziatrice.

La perdita di carico che si riferisce a questa griglia prototipica è stata valutata con l'uso della correlazione di Rehme [19]:

$$K = C_v \left(\frac{A_s}{A_v} \right)^2 , \; C_v = -7.65 \log_{10} Re + 49.0$$

considerando:

- Area indisturbata (As) 2.8666e-3 m^2
- Area della griglia (Av) 1.9935e-4 m^2
- Numero di Reynolds di riferimento 50000
- Cv 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 i ottiene sommando i 12 ring blu di Figura 12, 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_{spacer} = 0.06313**

Griglia superiore

Lo schema di massima della griglia superiore è mostrato in Figura 13. Dato che la geometria della griglia non è provvista di un progetto tecnico, l'area occupata dalla griglia può solo essere stimata grossolanamente.

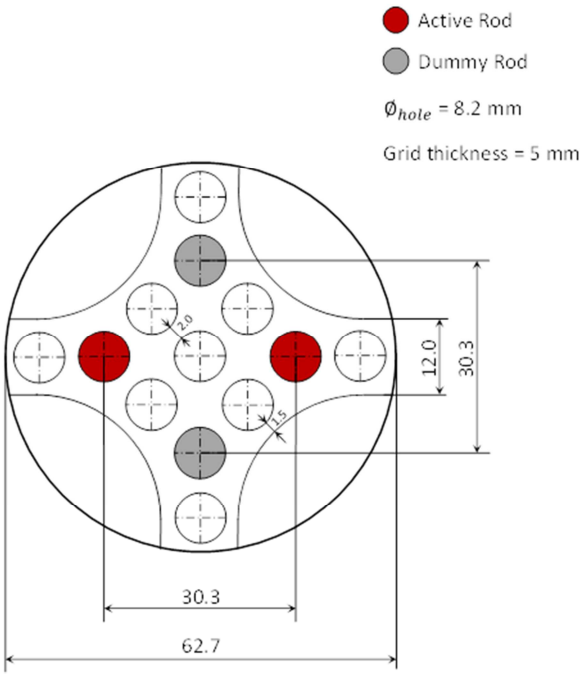


Figura 13 – Schema della griglia superiore.

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

Con l'uso di Rehme, considerando:

- Area indisturbata (As) 2.8744e-3 m^2
- Area della griglia (Av) 1.29053e-3 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: $\mathbf{k_{grid} = 2.6311}$

Con l'uso della correlazione presente in Idelchik, valida per piastre forate (Diag. 3.12), dove:

- Area di flusso alla griglia 1.58389e-3 m^2
- $f = A_{flusso\ alla\ griglia} / As$ 0.551

Determinata dall'area di 9 fori liberi più l'area 4 settori ovali in periferia. Dalla seguente relazione:

$$k = (1.707 - f)^2 \frac{1}{f^2}$$

Si ottiene una perdita di carico concentrata: $\mathbf{k_{grid} = 4.4}$

Si è optato per prendere in considerazione quest'ultimo valore, principalmente per il fatto che tutti i codici di sistema usati nel benchmark LACANES sovrastimano la portata in circolazione naturale determinata tramite bilancio termico in condizioni stazionarie. Per questo, a meno di perdite di carico non note nel loop (impedimenti al flusso di LBE), si è preferito adottare la stima più conservativa, anche se simulazioni condotte con codici CFD affermano che la perdita alla griglia è sostanzialmente inferiore e prossima al valore stimato ottenuto con la correlazione di Rehme.

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 14).

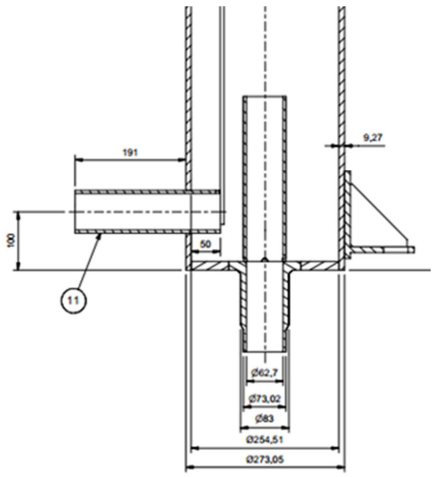


Figura 14 – Sezione del vaso di espansione.

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

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

$k = 0.5 * \left(1 - \frac{A0}{A1}\right)$ **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 15 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 ≥ 0.5 **k = 0.5**

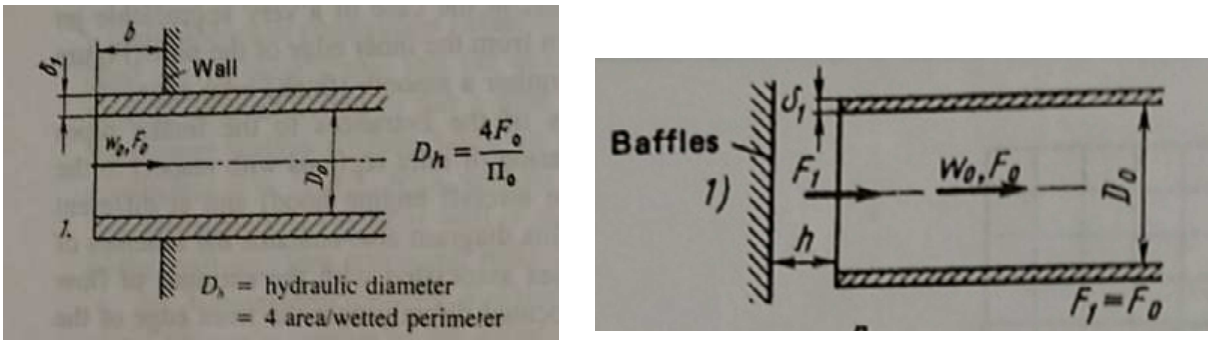


Figura 15 – Schemi Idelchik per ingresso in tubi (Diag. 3.1 e 3.8)

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 15 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 blundle.

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

- Area tubo orizzontale 3.0857e-3 m^2
- Area di passaggio nel bundle 2.8634e-3 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 ≥ 10e4:

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

dove:

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

4.3. Descrizione dei Test simulati

4.3.1. 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 16 e Figura 17, sono raccolti i principali dati sperimentali:

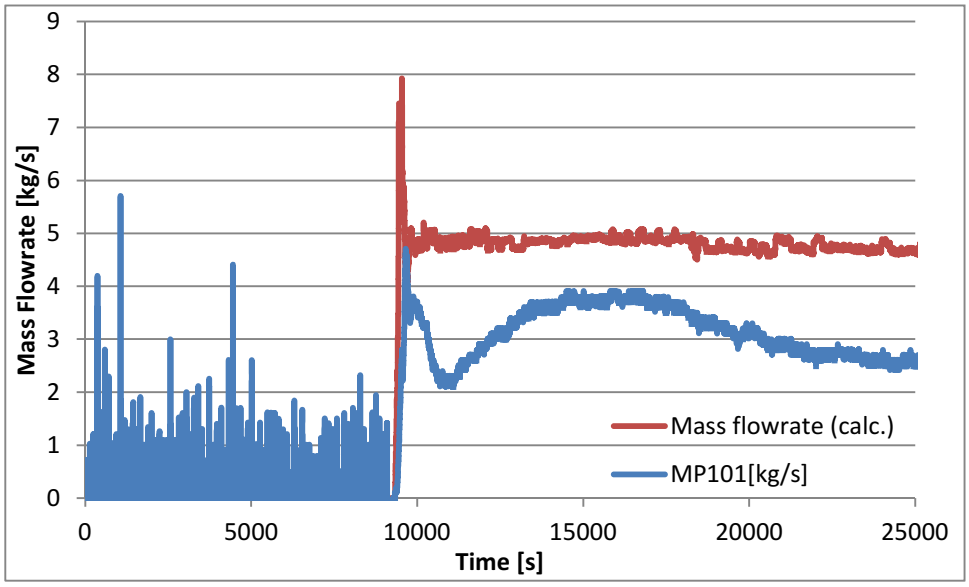


Figura 16 – Test 301: portata di LBE misurata (MP101) and stimata con bilancio termico.

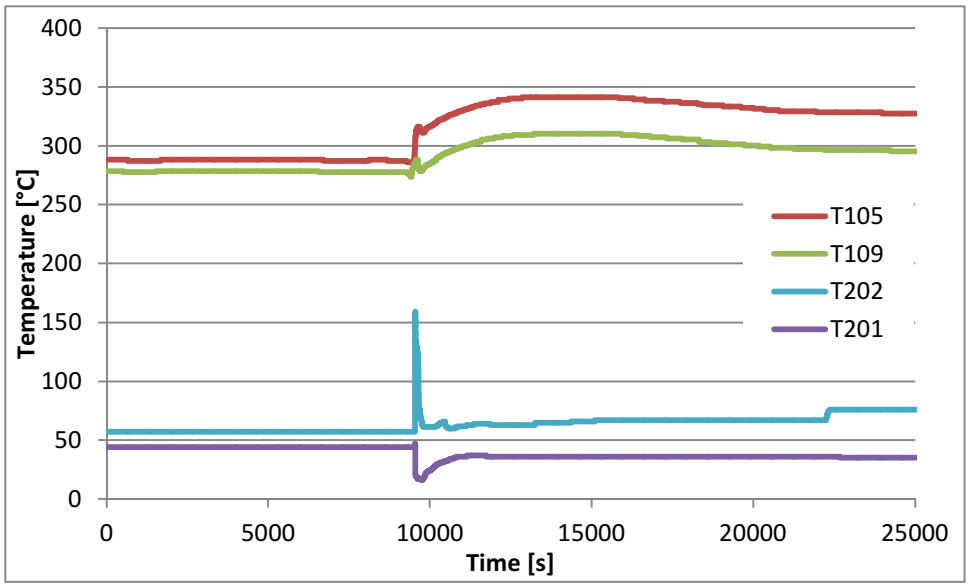


Figura 17 – Test 301: temperature di LBE e acqua.

Nella seguente Tabella 6 sono raccolti i principali dati sperimentali per il Test 301 in circolazione naturale svolto sulla facility NACIE. I dati fotografano lo stato stazionario raggiunto a 25000 s dall'inizio del test.

Tabella 6 – Test 301: principali dati sperimentali (25000 s).

Parametro (test 301)	Unità	Valore	Note
Potenza	[kW]	21.5	
Iniezione di gas	[Nl/min]	-	
Portata LBE	[kg/s]	4.65	da bilancio termico
Temperatura hot-leg LBE	[°C]	326	mediato sulla sezione calda
Temperatura cold-leg LBE	[°C]	295	mediato sulla sezione fredda
Portata acqua	[m^3/h]	0.47	
Temperatura ingresso acqua	[°C]	35.1	T201
Temperatura uscita acqua	[°C]	75.9	T202

Nel benchmark LACANES i partecipanti hanno dovuto simulare la condizione di stato stazionario raggiunto a 25000 s, 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. Nel seguito, lo stesso approccio sarà seguito per la validazione delle perdite di carico valutate da CATHARE, e i suoi risultati in stazionario saranno messi a confronto con quelli ottenuti con RELAP5.

4.3.2. Test 206

Questo test è stato condotto in circolazione forzata attraverso l'iniezione di gas incondensabile Argon in 6 step di portata crescente. La portata di LBE è misurata con il nuovo flussimetro a induzione. Nessuna alimentazione è fornita attraverso la sezione di riscaldamento. Nella seguente Figura 18 e Figura 19, sono raccolti i principali dati sperimentali:

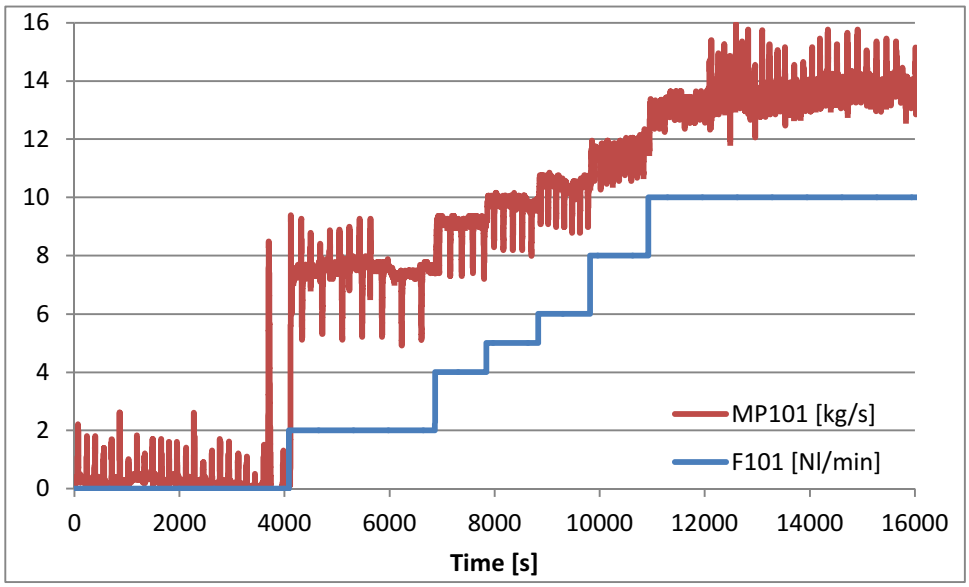


Figura 18 – Test 206: Portata di Argon (F101) e LBE misurate (MP101).

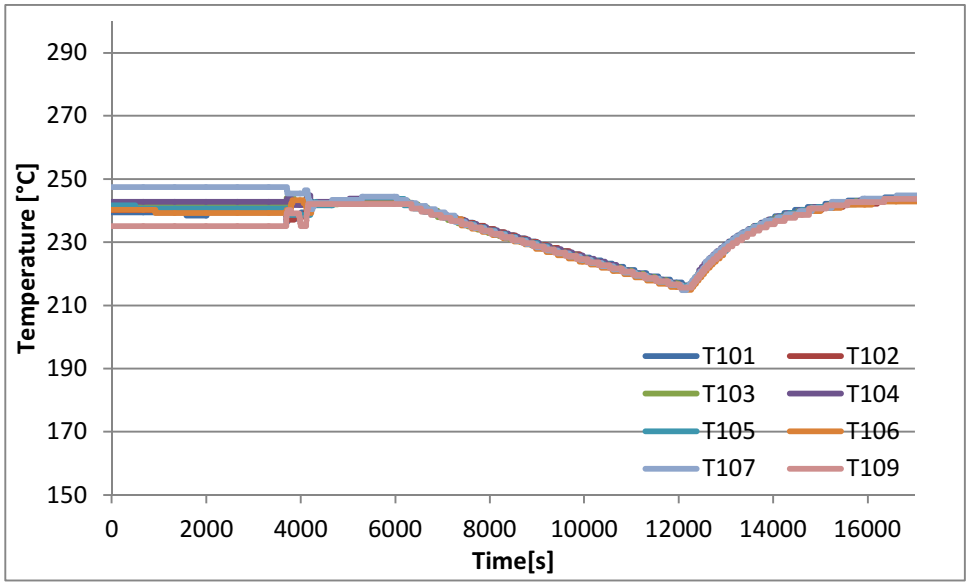


Figura 19 – Test 206: temperature di LBE.

Nella seguente

Parametro (test 206)	Unità	Valore	Note
Potenza	[kW]	-	
Iniezione di gas	[Nl/min]	10	
Portata LBE	[kg/s]	13.7	Flussimetro MP101
Temperatura hot-leg LBE	[°C]	244	Mediato da T101->T109
Temperatura cold-leg LBE	[°C]	244	Mediato da T101->T109
Portata acqua	[m^3/h]	-	
Temperatura ingresso acqua	[°C]	-	
Temperatura uscita acqua	[°C]	-	

sono raccolti i principali dati sperimentali per il Test 206 in circolazione forzata svolto sulla facility NACIE. I dati fotografano lo stato stazionario raggiunto a 17000 s dall'inizio del test con un portata di argon di 10 Nl/min.

Tabella 7 – Test 206: principali dati sperimentali (17000 s).

Parametro (test 206)	Unità	Valore	Note
Potenza	[kW]	-	
Iniezione di gas	[Nl/min]	10	
Portata LBE	[kg/s]	13.7	Flussimetro MP101
Temperatura hot-leg LBE	[°C]	244	Mediato da T101->T109
Temperatura cold-leg LBE	[°C]	244	Mediato da T101->T109
Portata acqua	[m^3/h]	-	
Temperatura ingresso acqua	[°C]	-	
Temperatura uscita acqua	[°C]	-	

Nel benchmark LACANES i partecipanti hanno dovuto simulare la condizione di stato stazionario raggiunto a 17000 s, così da determinare la portata di LBE in circolazione forzata con un'iniezione di gas a 10 Nl/min a cui corrisponde una portata di LBE di circa 13.7 kg/s misurata dal flussimetro MP101. Nella presente attività, questo test sarà utilizzato per verificare le perdite di pressione

valutate da CATHARE in confronto con quanto ottenuto con RELAP5, ad un livello di portata sensibilmente superiore rispetto a quella in circolazione naturale.

L'unico ostacolo è che in CATHARE non è possibile iniettare un gas incondensabile nel fluido, questo per problemi intrinseci alla soluzione numerica implementata in CATHARE. Questo problema sarà risolto con la prossima versione del codice, CATHARE 3.

Nel seguito, allo scopo di confronto e validazione delle perdite di carico calcolate da CATHARE con quelle simulate da RELAP5, sarà imposta una portata di LBE nel circuito primario pari a quella valutata da RELAP5 con l'iniezione di incondensabile, cioè 13.47 kg/s, attraverso una pompa elettromagnetica. Il confronto sarà effettuato allo stazionario raggiunto a 17000 s.

5. RISULTATI DELLA VALIDAZIONE

5.1. Il modello NACIE per CATHARE

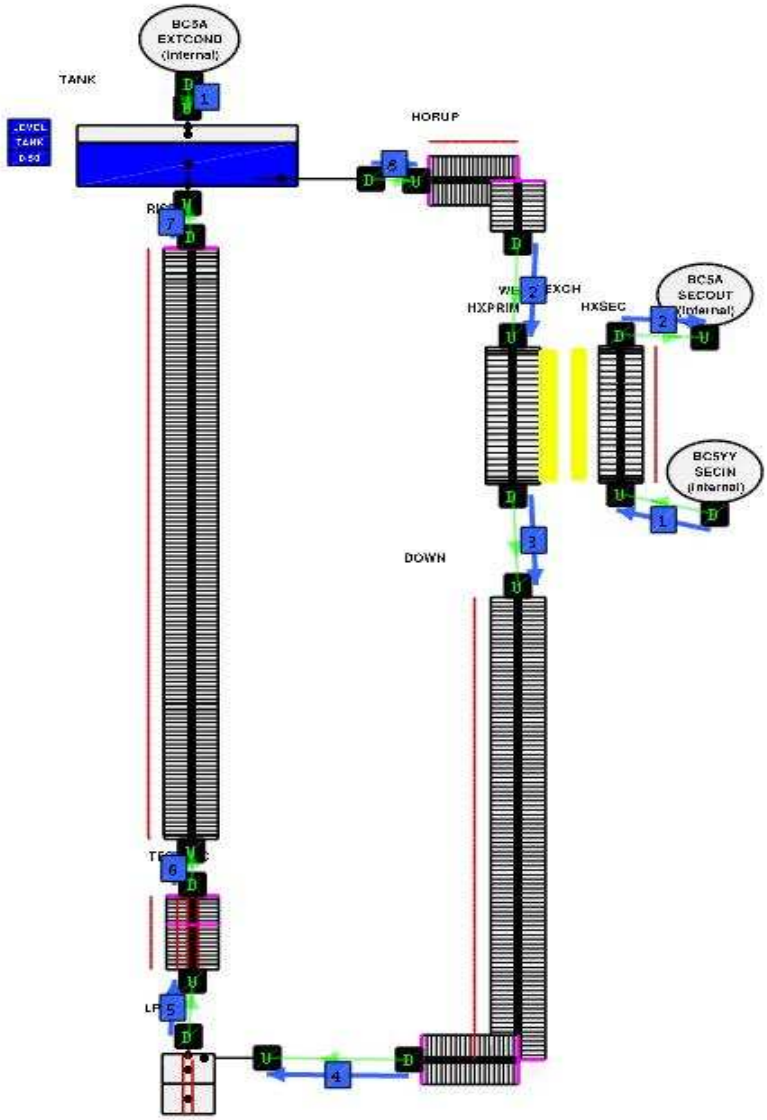


Figura 20 – Nodalizzazione di NACIE per CATHARE.

Il modello monodimensionale di NACIE sviluppato per il codice di sistema CATHARE2 è riportato in Figura 20. Nel confronto con la vista isometrica della facility e la nodalizzazione RELAP5 di Figura 11 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 um. 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 sono valutate con l'ausilio dell'Handbook Idelchik [17] e sono le medesime calcolate per il codice RELAP5 al §4.2.2.

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, così come per RELAP5, nel circuito primario a LBE si usa la correlazione di Seban-Shimazaki, implementata anche in CATHARE come correlazione di default per i refrigeranti piombo e lega piombo-bismuto:

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

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:

$$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$$

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 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.

5.2. Determinazione delle perdite di carico

Per completezza di informazione, di seguito viene presentata la trattazione delle perdite di carico da parte dei due codici RELAP5 e CATHARE.

In generale, la perdita di carico totale ΔP_{totale} di un circuito è determinata dalla somma dei contributi derivanti da ciascun componente o sezione i-esima, in base alla relazione:

$$\Delta P_{totale} = \frac{1}{2}\ \rho \sum_i \bar{v}_i^2 \left(\mathrm{f}\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{D}} + \mathrm{K}\right)_i$$

Dove ρ è la densità, $\bar{v}_i$ è la velocità media nella sezione, f coefficiente di frizione, L lunghezza della sezione, D diametro idraulico o dimensione caratteristica, K coefficiente di perdita concentrata. Il termine $\left(\mathrm{f}\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{D}} + \mathrm{K}\right)$ rappresenta il coefficiente di perdita di carico, dove il primo termine $\mathrm{f}\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{D}}$ tiene in considerazione le perdite di carico distribuite e il secondo K considera le perdite di carico concentrate e solitamente sono determinati con correlazioni empiriche presenti in letteratura, e.g. [17], così come visto al §4.2.2.

In RELAP5, il coefficiente di frizione in regime turbolento (Re > 3000) è determinato attraverso l'approssimazione di Zygrang-Sylvester applicata alla correlazione di Colebrook-White. Questa approssimazione ha il vantaggio di fornire una relazione esplicita per la determinazione del fattore di frizione, mentre la semplice Colebrook-White è una funzione trascendentale che richiederebbe iterazioni numeriche per il calcolo del fattore f.

$$\frac{1}{\sqrt{f_T}} = -2log_{10}\left\{\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re}\left[1.14 - 2log_{10}\left(\frac{\epsilon}{D} + \frac{21.25}{Re^{0.9}}\right)\right]\right\}$$

Dove f_T è il fattore di frizione, ϵ è la rugosità assoluta, D la dimensione caratteristica del tubo, Re numero di Reynolds.

In CATHARE, all'interno dell'equazione della quantità di moto, il termine:

$$-\chi C_K \rho_K \frac{|V_K|V_K}{2}$$

rappresenta l'effetto della frizione tra parete e fluido, dove con K si indica la fase considerata (liquido, vapore). C_K è un fattore di frizione adimensionale che può essere scritto come:

$$C_K = c_K \cdot f_K$$

Dove f_k viene estrapolato direttamente dal caso monofase e c_k è un fattore per tenere in considerazione la presenza di due fasi. Il fattore f_k viene calcolato in CATHARE come:

$$f_K = max\left\{\frac{16}{Re_k}, \frac{0.079}{Re_k^{0.25}}, 0.003\right\} \qquad \text{con:} \quad Re_k = \frac{\alpha_K \rho_K |V_K| D_H}{\mu_K}$$

Per la trattazione sulla determinazione del fattore c_k si rimanda a [4]. Come si può notare, la perdita di pressione distribuita in CATHARE non è correlata con la rugosità delle pareti dei tubi.

5.3. Risultati

5.3.1. Verifica delle perdite di carico

La prima parte della validazione di CATHARE e del modello creato per la simulazione della facility NACIE, ha riguardato la verifica delle perdite di carico a diversi regimi di funzionamento. NACIE non offre dati sperimentali di pressione o caduta di pressione (DP) per cui è stato necessario adottare un approccio che metta in confronto i risultati dei due codici termoidraulici RELAP5 e CATHARE. La geometria di NACIE, le elevazioni e le perdite di carico concentrate valutate in precedenza, sono perfettamente comparabili.

Nella seguente Tabella 8 è riportato il confronto tra le perdite di carico valutate nel Test 301 in circolazione naturale e una potenza fornita alla canna scaldante di 21.5 kW.

La portata di circolazione naturale in stato stazionario valutata da CATHARE è di 4.91 kg/s, contro il 4.81 kg/s di RELAP5, cioè +2%, a parità di fattori come la geometria.

Continuando ad analizzare la tabella, un'importante differenza riguarda la rugosità delle pareti che, come già detto, non è presa in considerazione da CATHARE (vedi §5.2) e quindi è assunto il valore di default 1um, nonostante il codice permetta di introdurre un valore diverso di rugosità. Una richiesta di chiarimento al team di sviluppo è già stata inoltrata. Un'altra importante differenza riguarda il termine $f\frac{L}{D}$ che tiene in considerazione le perdite di carico distribuite. In CATHARE questo termine è pari a circa il 25% del valore determinato da RELAP5 con la correlazione di Colebrook-White, ciononostante le perdite di carico valutate nei vari tratti di impianto sono tutte superiori a quelle valutate da RELAP5. Mentre attraverso le perdite di carico concentrate, e.g. griglie, curve, le cadute di pressione sono confrontabili. La perdita di pressione totale valutata da RELAP5 è circa 2.15 kPa contro i 2.57 kPa di CATHARE, con un +20% valutati da quest'ultimo.

Questa differenza sulla perdita di carico dell'intero impianto è solo parzialmente giustificabile dalla maggiore portata stimata da CATHARE. Infatti, essendo la portata funzione della velocità e la perdita di carico funzione del quadrato della velocità, questo significa che solo una differenza del 4% è attesa sulle DP a causa della maggiore portata.

Parte del problema è riconducibile alla differenza sulle densità del piombo-bismuto in funzione della temperatura implementate nei due codici, quindi alle proprietà termodinamiche provenienti dal Soft-Sphere Model per RELAP5 e dall'Handbook per CATHARE. In particolare, nel range di temperature dei test, la densità di RELAP5 è sempre inferiore a quella di CATHARE ma soprattutto la curva di densità in CATHARE ha una pendenza superiore, così come mostrato in Figura 21. Questo comporta che a parità di temperature in gioco tra gamba calda e gamba fredda, CATHARE valuta una superiore driving-force dovuta al peso delle due colonne termiche. Da qui segue la maggior portata di CATHARE e parte della differenza sui DP.

Nonostante queste considerazioni sulle perdite di carico, le portate in circolazione naturale valutate da CATHARE (4.91 kg/s) e da RELAP5 (4.81 kg/s) sono molto prossime alla stima di portata reale valutata con un bilancio termico (4.65 kg/s).

Questo comportamento è riscontrabile anche nel Test 206, i cui risultati sono riportati in Tabella 9, sebbene qui la portata di CATHARE sia stata imposta con l'ausilio di una pompa elettromagnetica per essere uguale a quella stimata da RELAP5 con l'iniezione di gas incondensabile.

NACIE #301	Geometria					Coeff. DP			RELAP5			CATHARE		
Componente	Area (m2)	Dh (m)	Lunghezza (m)	Rugosità RELAP5 (μm)	Rugosità CATHARE (μm)	f*(L/D) RELAP5	f*(L/D) CATHARE	K	Portata LBE (kg/s)	Velocità (m/s)	Perdita di carico (Pa)	Portata LBE (kg/s)	Velocità (m/s)	Perdita di carico (Pa)
Sezione scaldante	0.002863	0.033301	0.854	32	1	0.6051	0.1525		4.81	0.1628	767.4	4.91	0.1658	930.7
Griglia spaziatrice								0.0631		0.1630	13.7		0.1658	5.5
Griglia superiore								4.4		0.1628	640.5		0.1660	631.5
Riser senza iniettore Ar	0.003086	0.06268	1.500			0.5322	0.1230			0.1516	60.6		0.1541	105.9
Riduzione area dovuta all'iniettore di Ar	0.002938	0.04553						0.0374		0.1639	2.7		0.1541	4.2
Riser con iniettore Ar	0.002855	0.04553	5.326			2.6715	0.6017			0.1639	347.5		0.1541	369.3
Riser -> Vaso espansione	0.002855	0.04553						0.8906		0.1639	191.2		0.1541	286.8
Vaso espansione -> tubo orizzontale	0.003086	0.18151						0.4670		0.1516			0.1540	
Tubo orizzontale sup.	0.003086	0.06268	0.923			0.3274	0.0757			0.1516	42.4		0.1540	35.2
Curva 90° sup.	0.003086	0.06268						0.3134		0.1516	43.0		0.1540	39.6
Downcomer	0.003086	0.06268	7.5			2.6609	0.6150			0.1516	305.8		0.1535	535.4
Curva 90° inf.	0.003086	0.06268						0.3134		0.1511	43.6		0.1535	39.5
Tubo orizzontale inf.	0.003086	0.06268	1.000			0.3548	0.0820			0.1511	37.9		0.1535	38.6
Tee ingresso alla sez. scaldante	0.003086	0.06268						2.0400		0.1511	307.0		0.1535	193.4

Tabella 8 – Confronto delle perdite di carico valutate da RELAP5 e CATHARE nel Test 301.

NACIE #206	Geometria					Coeff. DP			RELAP5			CATHARE		
Componente	Area (m2)	Dh (m)	Lunghezza (m)	Rugosità RELAP5 (µm)	Rugosità CATHARE (µm)	f*(L/D) RELAP5	f*(L/D) CATHARE	K	Portata LBE (kg/s)	Velocità (m/s)	Perdita di carico (Pa)	Portata LBE (kg/s)	Velocità (m/s)	Perdita di carico (Pa)
Sezione scaldante	0.002863	0.033301	0.854	32	1	0.5503	0.4389		13.11	0.4510	5351.0	13.11 (imposto)	0.4411	5967.5
Griglia spaziatrice								0.0631		0.4497	95.1		0.4411	30.3
Griglia superiore								4.4		0.4495	4472.3		0.4411	4469.0
Riser senza iniettore Ar	0.003086	0.06268	1.500			0.4699	0.4075			0.4187	414.5		0.4093	375.6
Riduzione area dovuta all'iniettore di Ar	0.002938	0.04553						0.0374		0.4187	997.6		0.4093	-13960.5
Riser con iniettore Ar	0.002855	0.04553	5.326			2.3935	1.9963			0.4704	-13451.7		0.4093	1363.5
Riser -> Vaso espansione	0.002855	0.04553						0.8906		0.4704	1317.2		0.4093	2064.8
Vaso espansione -> tubo orizzontale	0.003086	0.18151						0.4670		0.4187			0.4094	
Tubo orizzontale sup.	0.003086	0.06268	0.923			0.2891	0.2507			0.4187	290.0		0.4094	200.6
Curva 90° sup.	0.003086	0.06268						0.3134		0.4187	299.5		0.4094	283.6
Downcomer	0.003086	0.06268	7.5			2.3497	2.0375			0.4187	2119.9		0.4094	1947.1
Curva 90° inf.	0.003086	0.06268						0.3134		0.4187	304.2		0.4093	283.5
Tubo orizzontale inf.	0.003086	0.06268	1.000			0.3133	0.2717			0.4187	257.2		0.4093	217.4
Tee ingresso alla sez. scaldante	0.003086	0.06268						2.0400		0.4187	2156.1		0.4093	1724.2

Tabella 9 – Confronto delle perdite di carico valutate da RELAP5 e CATHARE nel Test 206.

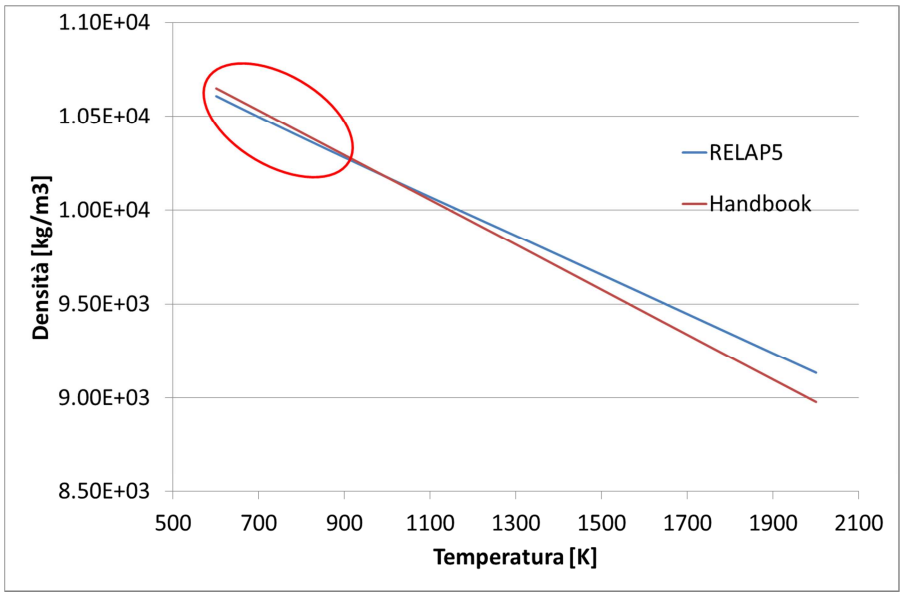


Figura 21 – Confronto tra le curve di densità implementate in RELAP5 e CATHARE (Handbook).

Le perdite di carico valutate dai due codici nel Test 206 non sono perfettamente comparabili a causa della differente modalità di esecuzione del transitorio. In RELAP5, l'iniezione di gas genera una prevalenza che, sommata algebricamente alla perdita di carico distribuita lungo il riser, fornisce una prevalenza netta di 13.45 kPa di, mentre in CATHARE, dove è stata posta una pompa elettromagnetica nel nodo corrispondente al punto di iniezione, la sola prevalenza della pompa equivale a 13.96 kPa. Si può affermare che anche in questo caso le perdite di carico distribuite sono sovrastimate da CATHARE ma con una discrepanza inferiore rispetto a quanto visto per il Test 301.

5.3.2. Simulazione dinamica del Test 301

La seconda parte della 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 riguardavano la mancanza di informazioni sulle procedure di prova, la conducibilità della polvere di acciaio posta nell'intercapedine tra primario e secondario, la posizione dei riscaldatori lungo il loop e il loro tempo di funzionamento, 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, che potranno essere verificate a posteriori.

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:

- Una potenza da fornire tramite la canna scaldante per riprodurre il DT iniziale che si ha attraverso la sezione scaldante (Figura 24). 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 22).

- 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 22).
- 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 22 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 22).

Per quanto riguarda la portata di Figura 23, 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 4.91 kg/s, come si può vedere da Figura 23. Nella stessa figura si può anche notare il non trascurabile errore di misurazione del flussimetro a induzione MP101 a questo livello di portate.

L'effetto dell'ipotizzata funzione di riscaldatore della barra, si può facilmente notare sulle temperature attraverso la sezione scaldante di Figura 24, in cui nello stazionario iniziale si ha una differenza di temperatura ingresso/uscita di circa 10°C. Una volta partito il transitorio, la salita delle temperature sia nella sezione scaldante (Figura 24) sia attraverso lo scambiatore di calore (Figura 25) seguono in modo soddisfacente i valori sperimentali, a testimoniare che l'assunzione fatta sulla curva di potenza si può ritenere corretta, almeno qualitativamente. 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.

La temperatura dell'acqua misurata all'uscita dell'HX, mostrata in Figura 26, è l'unica grandezza che attualmente non si è in grado di riprodurre adeguatamente, soprattutto negli stazionari iniziale e finale in cui la temperatura si porta al valore di saturazione di 118 °C a 1.5 bar. Le temperature sperimentali in uscita dal secondario suggeriscono che la pressione possa variare fino a raggiungere i 10 bar, a cui corrisponde una temperatura di saturazione di 180 °C, esattamente il valore del secondo picco della curva T202, a seguito del quale il sistema di sicurezza o l'operatore potrebbe essere intervenuto per non raggiungere condizioni dannose per l'impianto, e.g. apertura di valvole di sfogo.

Tutta la seconda fase del transitorio è profondamente affetta da queste 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 22) rispetto a quanto sembrano suggerire i dati sperimentali sulle temperature del circuito primario (Figura 24 e Figura 25). Inoltre, la

stessa risalita delle temperature è molto più lenta nella simulazione che nella realtà sperimentale. A seguito di alcuni test, questo problema non sembra essere dovuto ad un eccesso di capacità termica implementata nel modello, che quindi è riconducibile solo alle condizioni di funzionamento del circuito secondario e dei riscaldatori disposti lungo tutto il circuito.

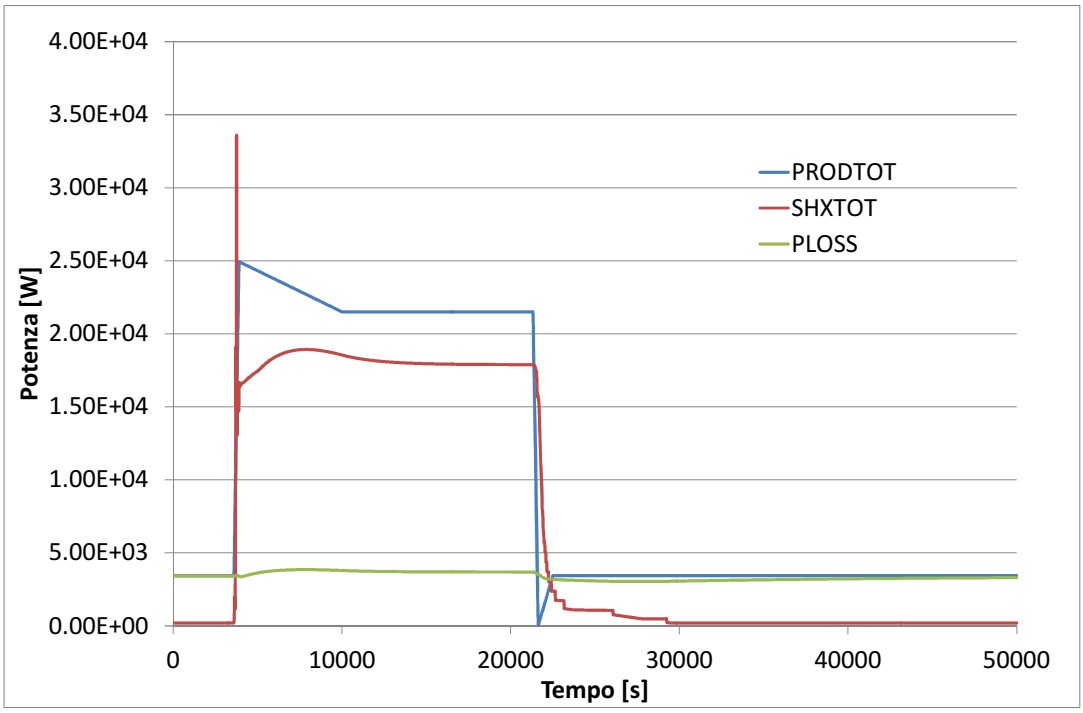


Figura 22 – Grafico delle potenze.

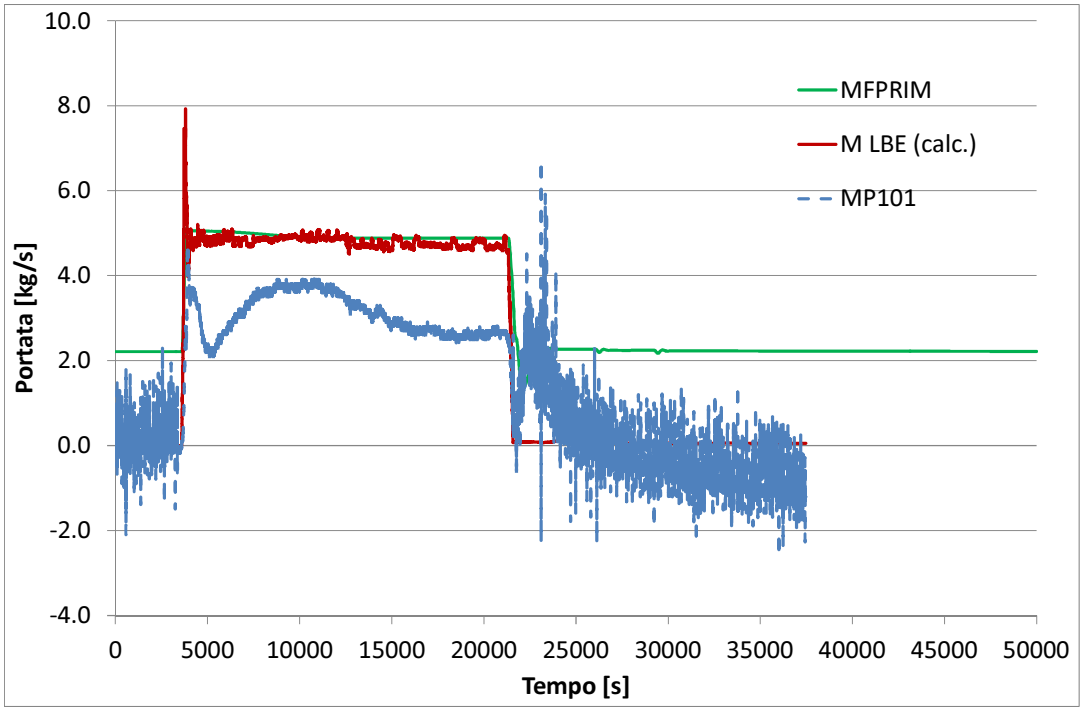


Figura 23 – Confronto delle portate di LBE.

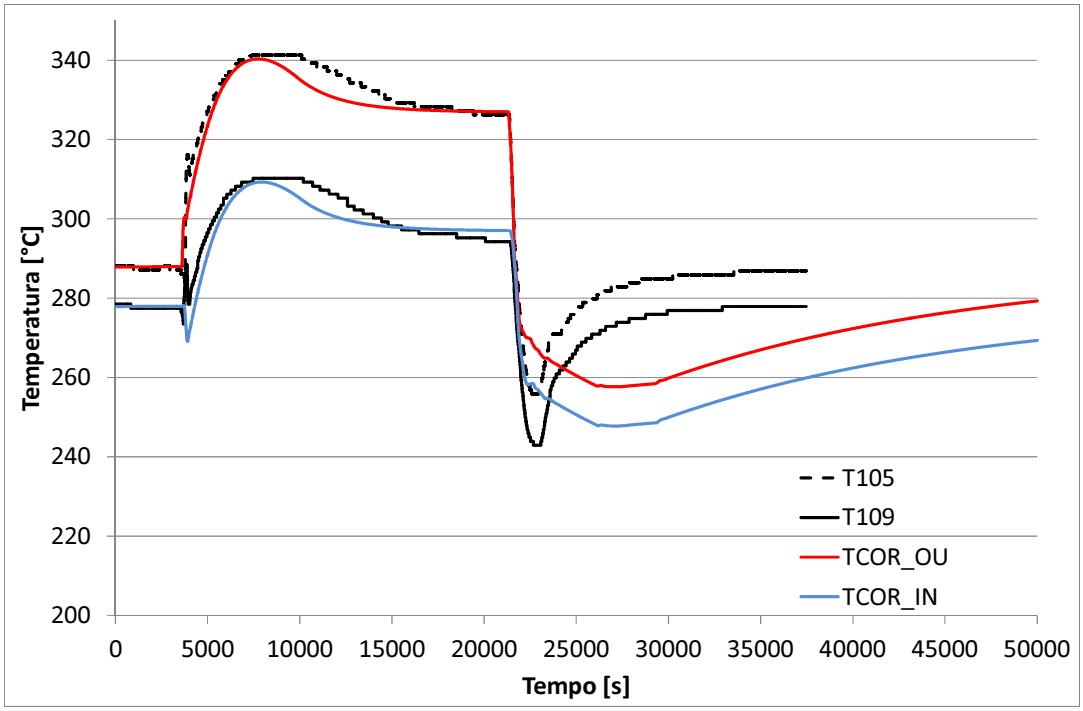


Figura 24 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita della sezione scaldante.

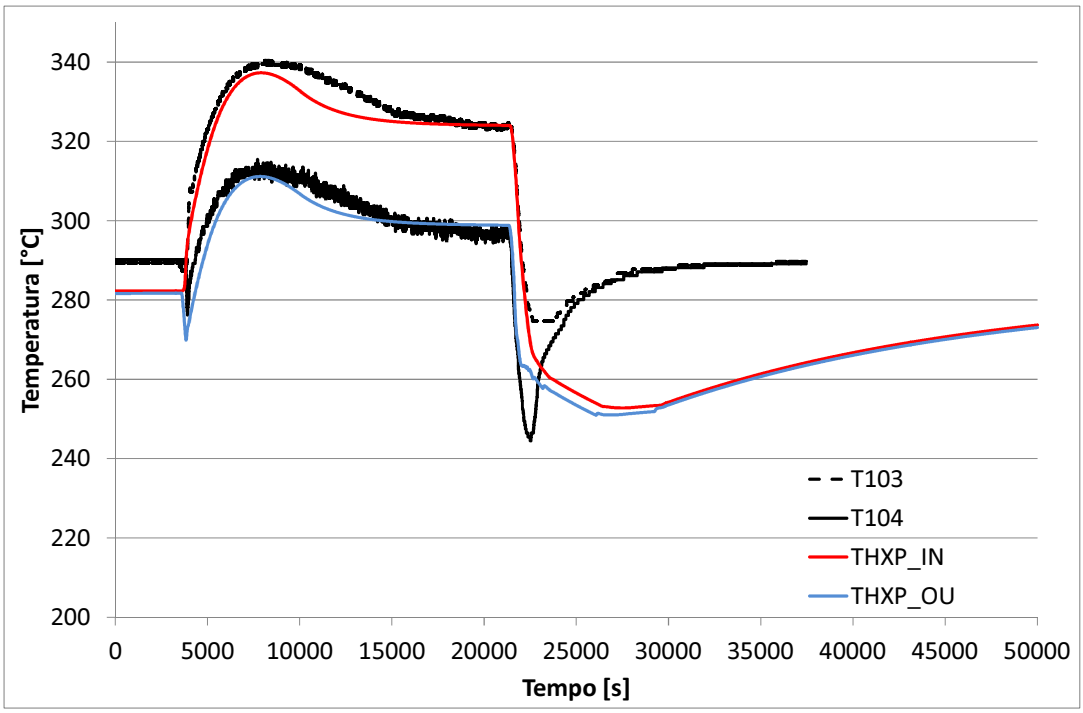


Figura 25 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita dell'HX lato primario (LBE).

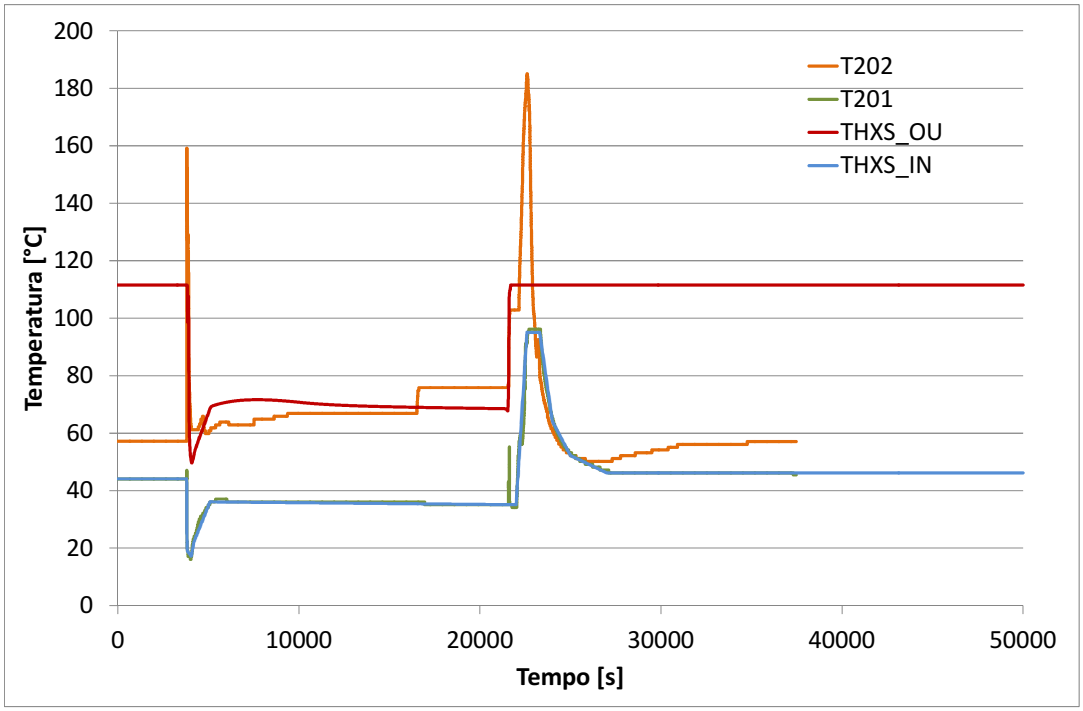


Figura 26 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita dell'HX lato secondario (H2O).

Si può quindi 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. Solo 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. Per migliorare la simulazione di questa fase sarebbe necessario un supporto aggiuntivo alla comprensione del comportamento del circuito secondario e dei riscaldatori.

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 da una recente 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 è stato suddivisa in due obiettivi; il primo ha riguardato la verifica delle perdite di carico (DP) valutate da CATHARE in confronto con RELAP5 in regime stazionario sia di circolazione naturale che forzata, il secondo ha riguardato la simulazione dinamica di un test in circolazione naturale confrontato con i dati sperimentali.

I test della matrice di prova presi in considerazione sono il Test 301 in circolazione naturale e il test 206 in circolazione forzata con la tecnica del gas-lifting, cioè per iniezione di gas incondensabile (Argon). Dato il limite intrinseco di CATHARE nel trattamento di incondensabili dispersi nella matrice

metallica già evidenziato nelle precedenti annualità, il Test 206 è stato simulato con una pompa elettromagnetica e la portata di circolazione è stata imposta pari a quella valutata da RELAP5.

Il confronto delle perdite di carico ha dimostrato una generale sovrastima delle perdite di carico simulate da CATHARE, fino a +20% in circolazione naturale rispetto a RELAP5 nel Test 301, solo parzialmente giustificabile dalla maggiore portata di circolazione (+2%). Causa della discrepanza è da ricercare sia nella diversa implementazione delle proprietà termodinamiche dell'LBE, in particolare la densità in funzione della temperatura, sia nel diverso modo di calcolare le perdite di carico. Nel range di temperature dei test, la densità di RELAP5 (Soft-Sphere Model) è sempre inferiore a quella di CATHARE (Handbook) ma soprattutto la curva di densità in CATHARE ha una pendenza superiore. Questo comporta che a parità di temperature in gioco tra gamba calda e gamba fredda, CATHARE valuta una superiore driving-force dovuta a una differenza di peso superiore delle due colonne termiche, quindi una maggiore portata e di conseguenza maggiori perdite di carico. Ciononostante, anche nel Test 206 in circolazione forzata, in cui le portate sono state imposte uguali, CATHARE ha dimostrato di sovrastimare le perdite di carico distribuite anche se in misura inferiore rispetto al test in circolazione naturale. Nonostante queste considerazioni sulle perdite di carico, le portate in circolazione naturale valutate da CATHARE (4.91 kg/s) e da RELAP5 (4.81 kg/s) sono molto prossime alla stima di portata reale valutata con un bilancio termico (4.65 kg/s).

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, la posizione dei riscaldatori lungo il loop e il loro tempo di funzionamento, e alcune incertezze riguardanti il regime di funzionamento del circuito secondario. CATHARE si è dimostrato capace di approssimare sia qualitativamente che 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. Per migliorare la simulazione di questa fase sarebbe necessario un supporto aggiuntivo alla comprensione del comportamento del circuito secondario. Ciononostante, si può affermare che CATHARE si è dimostrato capace di simulare in modo soddisfacente il transitorio di circolazione naturale della facility integrale NACIE.

BIBLIOGRAFIA

[1] G. Geffraye et al., "CATHARE 2 V2.5_2 : a Single Version for Various Applications," *Proceeding of NURETH-13, Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, Sept 27th-Oct 2nd*, 2009.

[2] OECD/NEA, *"Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-Hydraulics and Technology"*. ISBN 978-92-64-99002-9, 2007.

[3] M. Polidori, "Implementation of Thermo-Physical Properties and Thermal-Hydraulic Characteristics of Lead-Bismuth Eutectic and Lead on CATHARE Code," *Rapporto Tecnico ENEA, NNFISS – LP1 - 001*, 2010.

[4] A. Cervone, S. Manservisi, 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.

[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] Tarantino M., "Gas Enhanced Circulation Experiments On Heavy Liquid Metal System," *Report ENEA HS-F-R-001*, 2007.

[7] CEA, "CATHARE2 V2.5_1 : User's Guidelines," *DER/SSTH/LDAS/EM/2005-034* , Febbraio 2006.

[8] CEA, "CATHARE 2 V2.5_2mod5.1: Dictionary of Directives and Operator ," *DEN/CAD/DER/SSTH/LDLD/EM/NT/2010-024/A* , Maggio 2010.

[9] M. Polidori, S. Manservisi, 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, Raporto Tecnico NNFISS – LP3 - 017, 2011.

[10] CEA, "GUITHARE User's Dictionary Guide," *DTS/OCC/OC2D07043/003/V0M2*.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] I.E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd ed.: Jaico Publishing House, 2003.

[18] D. A. Young, "A Soft Sphere Model for Liquid Metals," *Lawrence Livermore Laboratory*, UCRL-52352, November 8, 1977.

[19] K. Rehme, "Pressure drop correlations for fuel element spacers," *Nuclear Technology Review*, vol. 17, January 1973.

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 – GUITARE, interfaccia grafica di CATHARE. 5
Figura 2 – Configurazione loop NACIE. 8
Figura 3 – Schema della regione scaldante di NACIE. 9
Figura 4 – Schema dello scambiatore di calore e vista del giunto ad espansione. 11
Figura 5 – Schema del flussimetro a induzione MP101 installato nel circuito primario di NACIE. 12
Figura 6 – Sinottico della facility NACIE. 14
Figura 7 – P&I della facility NACIE. 15
Figura 8 – Foto del rod bundle smontato a valle della campagna sperimentale. 16
Figura 9 – Schema delle sezioni principali di NACIE (con dettaglio del vaso di espansione. 17
Figura 10 – Schema della posizione della regione attiva del bundle e la tabella delle elevazioni. 18
Figura 11 – Vista isometrica di NACIE e schema della nodalizzazione per RELAP5. 21
Figura 12 – Schema della griglia spaziatrice. 22
Figura 13 – Schema della griglia superiore. 23
Figura 14 – Sezione del vaso di espansione. 24
Figura 15 – Schemi Idelchik per ingresso in tubi (Diag. 3.1 e 3.8). 25
Figura 16 – Test 301: portata di LBE misurata (MP101) and stimata con bilancio termico. 27
Figura 17 – Test 301: temperature di LBE e acqua. 27
Figura 18 – Test 206: Portata di Argon (F101) e LBE misurate (MP101). 28
Figura 19 – Test 206: temperature di LBE. 29
Figura 20 – Nodalizzazione di NACIE per CATHARE. 30
Figura 21 – Confronto tra le curve di densità implementate in RELAP5 e CATHARE (Handbook). 36
Figura 22 – Grafico delle potenze. 38
Figura 23 – Confronto delle portate di LBE. 38
Figura 24 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita della sezione scaldante. 39
Figura 25 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita dell'HX lato primario (LBE). 39
Figura 26 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita dell'HX lato secondario (H2O). 40

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 – Principali dati geometrici di NACIE. 8
Tabella 2 – Caratteristiche delle barre scaldanti di NACIE. 8
Tabella 3 – Altezza e posizione azimutale delle termocoppie installate nella regione attiva..... 10
Tabella 4 – Dimensioni dei tubi dello scambiatore NACIE. 11
Tabella 5 – Matrice di prova della campagna sperimentale sulla facility NACIE. 13
Tabella 6 – Test 301: principali dati sperimentali (25000 s)..... 28
Tabella 7 – Test 206: principali dati sperimentali (17000 s)..... 29
Tabella 8 – Confronto delle perdite di carico valutate da RELAP5 e CATHARE nel Test 301. 34
Tabella 9 – Confronto delle perdite di carico valutate da RELAP5 e CATHARE nel Test 206. 35

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