

**ENEA**

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



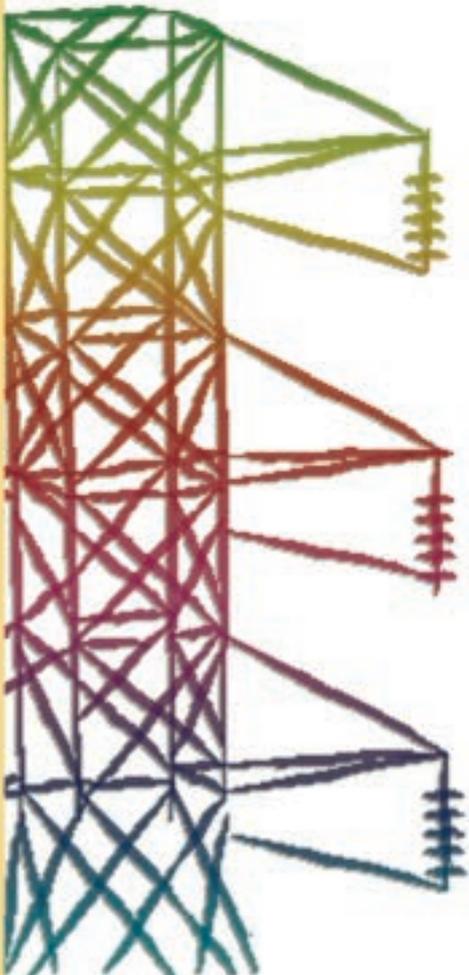
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

# **Esecuzione di calcoli di pre-test della sezione di prova W-DHR dell'impianto ENEA CIRCE**

**W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, S. Palazzo**





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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Esecuzione di calcoli di pre-test della sezione di prova W-DHR  
dell'impianto ENEA CIRCE

*W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, S. Palazzo*



ESECUZIONE DI CALCOLI DI PRE-TEST DELLA SEZIONE DI PROVA W-DHR DELL'IMPIANTO  
ENEA CIRCE

W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, S. Palazzo (CIRTEN)

Febbraio 2009

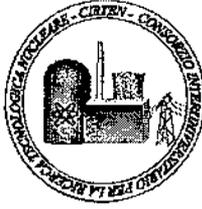
Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA



**CIRTEN**

**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO  
PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE**

**UNIVERSITA' DI PISA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA, NUCLEARE E DELLA PRODUZIONE**

**ESECUZIONE DI CALCOLI DI PRE-TEST  
DELLA SEZIONE W-DHR  
DELL'IMPIANTO ENEA CIRCE**

**W. Ambrosini, N. Forgiione, F. Oriolo, S. Palazzo**

**CIRTEN CERSE-UNIFI RL-1071/2008**

**Pisa, Dicembre 2008**

*Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP3 – punto B dell'AdP ENEA MSE del 21/06/07,*

*Tema 5.2.5.8 – “Nuovo Nucleare da Fissione”*

## Sommario

Nel presente lavoro viene analizzato il comportamento termoidraulico della sezione di prova ICE dell'impianto sperimentale CIRCE, mediante il codice di calcolo RELAP5/mod.3.3. In particolare, il circuito ICE verrà utilizzato per studiare lo scambiatore di calore W-DHR (Water-Decay Heat Removal) per la rimozione del calore residuo nel reattore ELSY.

Per lo sviluppo della nodalizzazione RELAP del circuito ICE è stato necessario implementare nel codice una nuova correlazione di scambio termico convettivo in "bundles" e nuove funzioni per il calcolo delle proprietà della lega eutettica Pb-Bi, in accordo i dati recentemente pubblicati sull'handbook dell'OECD/NEA.

Mediante la suddetta nodalizzazione sono state analizzati tre differenti transitori, previsti nella matrice delle prove sperimentali, in cui viene investigato l'accoppiamento tra il circuito primario ed il nuovo scambiatore di calore W-DHR.

Il transitorio relativo al test A ha avuto come obiettivo quello di verificare il raggiungimento dello stazionario, considerando tre differenti valori della pressione sul collettore di ingresso dell'acqua nel circuito secondario dello scambiatore di calore ed indagando l'effetto conseguente all'implementazione nel codice RELAP della nuova correlazione di scambio termico convettivo. Nel passaggio dall'uso della vecchia correlazione a quella nuova emerge una maggiore capacità di refrigerazione delle barrette scaldanti da parte dell'eutettico.

I transitori B e C sono relativi, rispettivamente, a condizioni di blocco della circolazione assistita mediante iniezione di gas nel primario e di perdita del pozzo freddo. Dai risultati ottenuti per questi due transitori emerge che l'apparecchiatura può essere gestita in sicurezza attraverso l'intervento degli attuali sistemi automatici di emergenza presenti e/o degli operatori.

# Indice

## Sommario

<b>1. Descrizione dell'apparecchiatura .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Nodalizzazione di ICE mediante il codice RELAP.....</b>	<b>5</b>
2.1 Nuovi modelli implementati nel codice.....	5
2.2 Nodalizzazione della sezione di prova .....	6
2.2.1 Nodalizzazione del circuito primario di ICE.....	6
2.2.2 Nodalizzazione dello scambiatore di calore <i>W-DHR</i> .....	8
2.3 Transitori analizzati.....	10
<b>3. Risultati ottenuti .....</b>	<b>12</b>
3.1 Test A.....	12
3.2 Test B.....	23
3.2 Test C.....	27
<b>4. Conclusioni.....</b>	<b>30</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>31</b>

## 1. Descrizione dell'apparecchiatura

Nel presente lavoro viene analizzato il circuito ICE (Integral Circulation Experiment) dell'apparecchiatura sperimentale CIRCE (CIRcuito Circolazione Eutettico) presente presso il Centro di Ricerca ENEA del Brasimone [1-2].

I principali obiettivi degli esperimenti da realizzare su ICE sono:

- simulazione del comportamento termoidraulico di un nocciolo di un reattore ADS;
- analisi termofluidodinamiche dell'accoppiamento di una sorgente di calore con uno scambiatore di calore, del tipo W-DHR, previsto in ELSY, in configurazione a piscina.

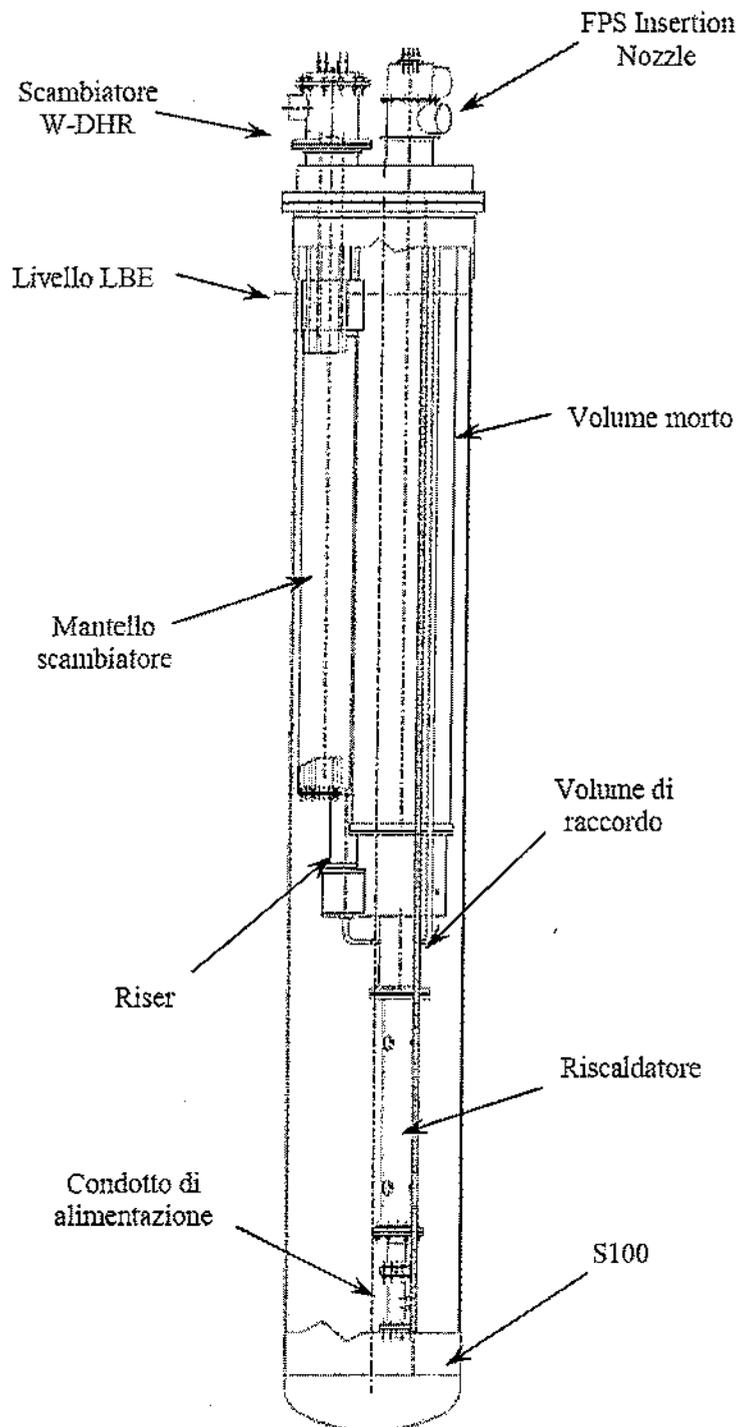
I principali componenti del circuito ICE sono: il riser, il riscaldatore, il vaso di espansione e lo scambiatore di calore (v. figura 1.1).

*RISER*: Si tratta di un tubo con diametro di 202.7 mm, alto 3854 mm. Esso riproduce perfettamente uno dei 22 riser previsti per l'impianto XADS. Contiene al suo interno un piccolo condotto per l'iniezione di argon che termina in basso con un ugello rivolto verso l'alto. Il gas viene iniettato attraverso un apposito sistema. Il punto più in basso del riser è immerso nel volume di raccordo, mentre la parte superiore sfocia nel vaso di espansione, nel quale il gas si separa dal flusso del refrigerante e va ad occupare il duomo della struttura.

*TUBO E UGELLO DI INIEZIONE DEL GAS*: E' costituito da un tubo di 2 pollici e da un raccordo di 1 pollice su cui è montato un ugello di uscita del gas di diametro interno di 6 mm. L'argon iniettato viene poi separato nel duomo e riciclato attraverso un circuito esterno.

*VOLUME DI RACCORDO*: Il volume rappresenta il plenum superiore del nocciolo dell'impianto di riferimento. Esso consente la connessione idraulica tra il riser ed il condotto di alimentazione.

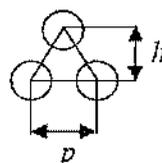
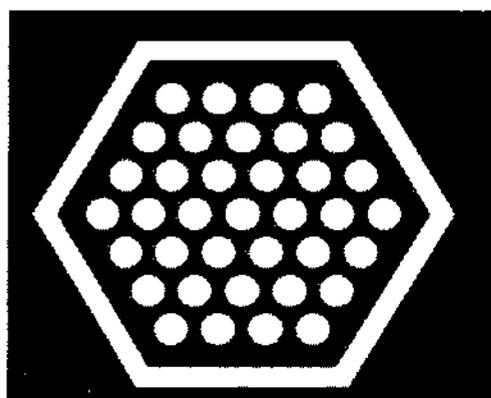
*CONDOTTO DI ALIMENTAZIONE*: Posizionato al di sotto del volume di raccordo, esso è costituito da un tubo di diametro pari a 202.7 mm e lungo 3.2 m analogo al riser. E' composto da un primo tronchetto di regolazione del flusso, da un Venturi-Boccaglio per la misurazione della portata della lega piombo-bismuto, da un secondo tronchetto, da un accoppiamento flangiato, che contiene un orifizio tarato per la variazione delle perdite di carico (in modo da riprodurre un valore abbastanza simile a quello che ci attendiamo dall'impianto di riferimento), e da un ultimo tronchetto per la regolarizzazione del flusso. Il condotto simula l'idraulica del circuito primario che va dall'ingresso dello scambiatore intermedio all'uscita del nocciolo.



*Figura 1.1: Componenti principali della sezione di prova.*

**IL RISCALDATORE:** Il riscaldatore è un prototipo idraulico dell'elemento di combustibile di un nocciolo di un reattore di tipo XADS. Come si può vedere dalla figura 1.2, esso è composto da una scatola esagonale che ha lo scopo di delimitare il flusso di Pb-Bi, all'interno della quale sono assemblate, secondo una reticolo esagonale, 37 barre. La lunghezza attiva delle barre è di 1 m e, delle 37 presenti, soltanto 31 sono barrette scaldanti, per una potenza complessiva di 800 KW.

Sono presenti grigliette stanziatrici disposte lungo il canale per evitare l'insorgenza di vibrazioni.



Elemento con reticolo  
esagonale

$\Phi$  : 8.2 mm

$p/\Phi$  : 1.8

$L_{att}$  : 1000 mm

$N_h$  : 31

$N_b$  : 37

$q''$  : 100 W/cm<sup>2</sup>

$P_h$  : 26 kW

Figura 1.2: Sezione del riscaldatore e sue caratteristiche generali.

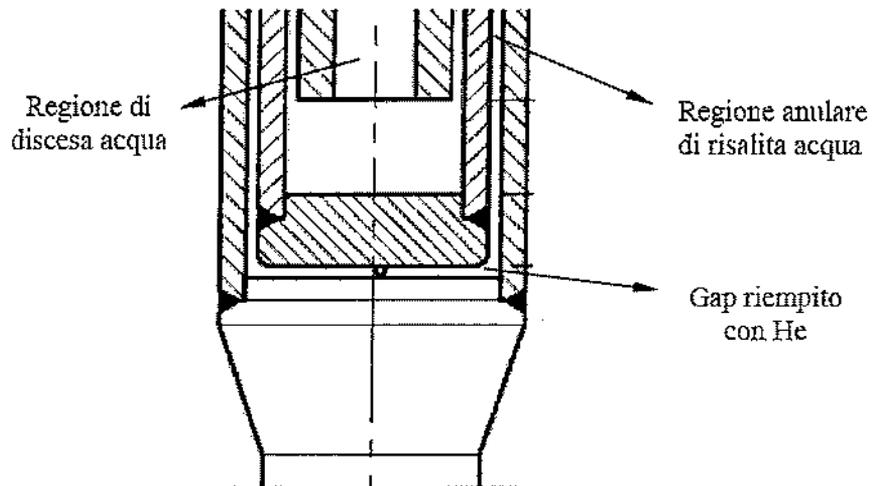
**VOLUME MORTO:** Rappresenta il componente di sezione maggiore (diametro pari a 650 mm) alla destra del riser. Si estende dalla zona del gas di copertura, fino a sfociare nel volume di raccordo, in corrispondenza del fondo del riser. Il volume è delimitato da una virola che rappresenta la struttura portante dell'intera sezione di prova. Superiormente essa è collegata ad un supporto/coperchio che consente la comunicazione, in zona gas, del volume morto con l'interno del serbatoio di prova. Nelle prove descritte nel seguito il volume morto è tenuto separato dal volume di raccordo mediante una flangia cieca; all'interno del volume morto non vi è metallo liquido durante le prove bensì gas inerte.

**IL VASO DI ESPANSIONE:** Questa parte della sezione di prova ha lo scopo di separare la miscela di Pb-Bi fuso ed Argon, che salgono dal riser, nei singoli componenti. L'argon va a riempire l'upper plenum e viene rimesso in circolo tramite il sistema di ricircolo dell'argon, mentre il Pb-Bi è convogliato allo scambiatore di calore.

**COPERCHIO:** E' formato da una flangia accoppiata a quella del serbatoio mediante una piastra ed una virola di collegamento tra flangia e piastra. Sulla piastra (in corrispondenza dell'asse del riser) è inserito un oblò di osservazione.

**LO SCAMBIATORE DI CALORE:** Nella sezione di prova ICE verrà testato un nuovo tipo di scambiatore di calore a fascio tubiero raffreddato ad acqua, costituito da 91 tubi a baionetta, disposti a reticolo triangolare. Questi vengono alimentati da tre valvole Swagelok<sup>®</sup> posizionate sul coperchio dello scambiatore, che provvedono ad immettere il fluido refrigerante in un plenum superiore diviso in tre compartimenti. Il primo compartimento fornisce acqua a 7 tubi, il secondo a 54 tubi ed infine, il terzo a 30 tubi. Tale tipo di

suddivisione è stata resa necessaria per poter parzializzare il numero di tubi che partecipano allo scambio termico, permettendo, quindi, di poter lavorare a regimi di potenza anche notevolmente inferiori al 100% senza richiedere sensibili variazioni della portata d'acqua di alimento. La tipologia dei tubi a baionetta consiste essenzialmente in tre tubi concentrici, il più esterno dei quali ha le estremità saldate, come si vede in figura 1.3.



*Figura 1.3: Particolare di uno dei 91 tubi a baionetta dello scambiatore.*

L'acqua iniettata nel circuito secondario a pressione dell'ordine di 4 bar e temperatura di 50 °C, percorre il primo tubo in senso discendente per poi risalire nella parte anulare compresa tra il tubo interno ed il tubo intermedio. Proprio in quest'ultima zona si verifica l'evaporazione del film liquido: il vapore prodotto si accumula in un plenum di raccolta e, dopo aver scambiato calore con la parte iniziale discendente dei tubi, viene scaricato direttamente in atmosfera tramite un collettore disposto lateralmente alla struttura dello scambiatore. La zona anulare compresa tra il tubo esterno ed il tubo intermedio è riempita con elio ad una pressione leggermente più alta di quella della lega eutettica sul lato primario lungo la parte terminale del fascio tubiero. Le zone anulari di ciascuno dei 91 tubi riempiti di gas sono interconnesse tra di loro per formare un piccolo plenum di raccolta dell'elio, all'interno del quale la pressione è costantemente monitorata. L'acciaio scelto per l'intera struttura dello scambiatore è l'AISI 304, il quale, oltre ad avere un discreto coefficiente di conducibilità termica, combina una buona resistenza alla corrosione alle basse temperature di esercizio lato LBE (Lead-Bismuth Eutectic) con l'alta economicità rispetto ad acciai speciali.

*DOWNCOMER:* E' la zona interessata alla discesa dell'eutettico uscente dal riser.

## 2. Nodalizzazione di ICE mediante il codice RELAP

### 2.1 Nuovi modelli implementati nel codice

Il codice di calcolo RELAP [3] è stato sviluppato presso l'INEL (Idaho National Engineering Laboratory) su richiesta della NRC (Nuclear Regulatory Commission) al fine di analizzare in maniera più realistica possibile fenomeni transitori legati a particolari condizioni incidentali di riferimento degli impianti nucleari ad acqua leggera (LWR), come ad esempio i LOCA (Loss Of Coolant Accident). In seguito, questo codice di calcolo ha subito delle implementazioni con lo scopo di includere la gran parte degli scenari transitori e incidentali che possono verificarsi in tali sistemi termoidraulici, come ATWS (Anticipated Transient Without Scram) e SGTR (Steam Generator Tube Rupture).

Il modello fluidodinamico alla base del codice RELAP5 è monodimensionale bifase con completo non-equilibrio termico e meccanico tra le fasi: per la risoluzione delle equazioni di bilancio, esso fa uso di due possibili schemi: uno è quello semi-implicito, utilizzato nel presente lavoro, mentre l'altro viene definito "nearly-implicit", il quale, però, risulta ancora in fase di sviluppo e miglioramento. Per quanto riguarda la valutazione dei fenomeni di scambio termico, viene risolto il problema della conduzione del calore monodimensionale in strutture termiche con condizioni al contorno di tipo convettivo.

Il codice è stato successivamente adattato per l'utilizzo di fluidi refrigeranti diversi dalla miscela bifase acqua-vapore per la quale è stato originariamente sviluppato. La versione del codice utilizzata in questo lavoro è quella RELAP5/mod.3.3, sviluppata dall'Ansaldo Nucleare e dall'ENEA in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP) dell'Università di Pisa [4], in cui sono state inserite le librerie contenenti le proprietà termofluidodinamiche del piombo e della sua lega eutettica piombo-bismuto.

Tali proprietà, già implementate nel codice, sono state successivamente modificate per adattarle a quelle recentemente proposte a livello internazionale dall'OECD/NEA [5]. In particolare, sono state inserite nuove funzioni per la viscosità dinamica, la conducibilità termica e la tensione superficiale.

Nel codice è stata, inoltre, implementata una nuova correlazione di scambio termico convettivo per "fuel bundles" in modo da calcolare con maggiore accuratezza il coefficiente di scambio termico all'interno del nocciolo del reattore. Infatti, nella versione originale del codice, la correlazione utilizzata nel caso di un metallo liquido era quella di Seban & Shimazaki [6]:

$$Nu = 5.0 + 0.025Pe^{0.8} \quad (1)$$

Questa correlazione è, in realtà, valida per metalli liquidi che fluiscono all'interno di tubazioni con temperatura di parete costante. La "nuova" correlazione implementata nel codice è quella di Ushakov et al. [7], sviluppata per il reattore BREST, valida per "bundles" con disposizione triangolare delle barrette:

$$Nu = 7.55 \frac{p}{D} - 20 \left( \frac{p}{D} \right)^{-13} + 0.041 \left( \frac{p}{D} \right)^{-2} Pe^{(0.56+0.19p/D)} \quad (2)$$

e con  $1 < Pe < 4000$  e  $1.2 < (p/D) < 2.0$ . Questa correlazione è stata inserita nel codice in modo che venga utilizzata durante la simulazione solo se nell'input del codice viene scelta la configurazione di tipo "assembly" per una data struttura termica.

## 2.2 Nodalizzazione della sezione di prova

La nodalizzazione RELAP sviluppata per la sezione di prova ICE è riportata in figura 2.1. Rispetto ad una precedente nodalizzazione del circuito messa a punto dall'ENEA [8] viene maggiormente dettagliato il circuito secondario di refrigerazione ed il bundle della sezione scaldante.

### 2.2.1 Nodalizzazione del circuito primario di ICE

Il circuito primario è rappresentato nella parte destra della figura 2.1 con i volumi (pipes) etichettati da 20 a 150.

La nodalizzazione ha conservato la struttura fondamentale studiata e verificata in un precedente lavoro [9], fatto salvo i componenti 96, 108 e 116 che rappresentano rispettivamente il riser, il downcomer ed il volume di LBE che circonda la gonna dello scambiatore di calore, questo ultimo rilevante ai fini dell'inerzia termica del sistema a causa della piccola portata di fluido che vi passa e del grande volume occupato. Altri elementi da tenere in dovuta considerazione sono il riscaldatore, situato nel componente 50 ("PIPE"), la giunzione a cui è affidata l'iniezione di argon nel riser, rappresentata dal componente 85 ("TIME-DEPENDENT JUNCTION") ed il vaso d'espansione posto in cima alla sezione di prova, simulato dal componente 105 ("SEPARATOR"), in cui vengono separate la componente gassosa, che defluisce nel duomo, da quella liquida, che viene indirizzata verso la sezione refrigerante.

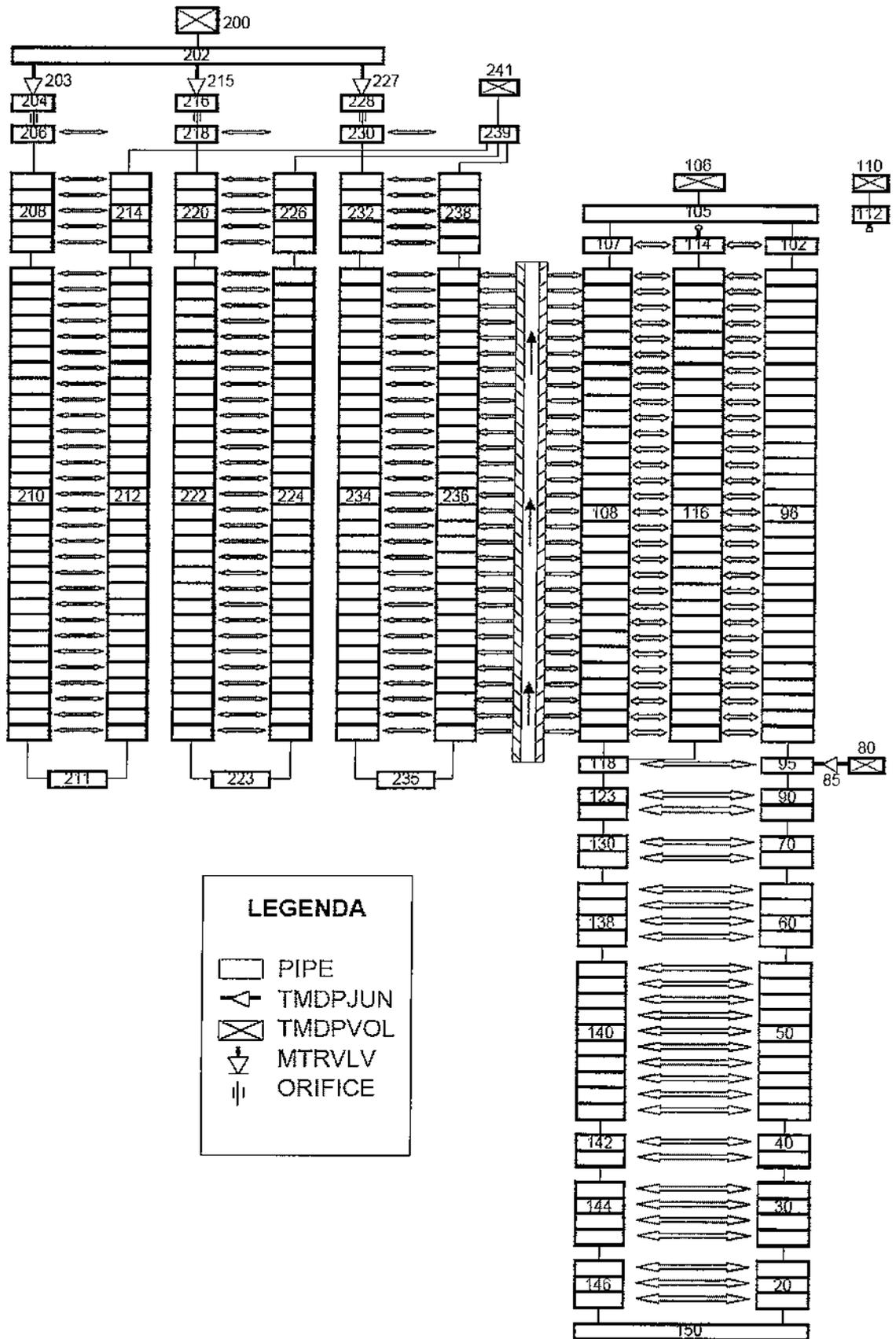


Figura 2.1: Nodalizzazione RELAP della sezione di prova ICE.

### *3.2.2 Nodalizzazione dello scambiatore di calore W-DHR*

Lo scambiatore di calore è schematizzato nella parte sinistra della figura 2.1 con i volumi che vanno dal 200 al 241. In particolare, la schematizzazione dei 91 tubi in parallelo dello scambiatore è stata eseguita utilizzando 3 tubi, in accordo con la suddivisione in tre compartimenti presente nel plenum superiore di raccolta dell'acqua di alimentazione. Ognuno dei tre tubi simula in numero il totale dei tubi alimentati da ciascuno dei tre compartimenti, suddivisi in 7 tubi per quanto riguarda il primo compartimento, 54 tubi per il secondo e 30 tubi per il terzo (v. figura 2.2). A monte dei tre compartimenti sono state posizionate tre valvole, identificate dalle card 203, 215 e 227 (MTRVLV), le quali provvedono a suddividere la portata d'acqua proveniente dal volume di raccolta 202 e ad alimentare, quindi, i tre compartimenti del plenum superiore. Esse sono state implementate nel codice come delle valvole motorizzate aventi un determinato tempo di apertura, in modo da simulare in maniera realistica la fluidodinamica dell'acqua all'ingresso del circuito. Gli orifizi presenti a monte di ciascun tubo sono stati simulati semplicemente come delle giunzioni aventi aree molto piccole che uniscono i tre volumi rappresentanti i compartimenti di alimentazione dell'acqua con i successivi tre volumi 206, 218 e 230 (BRANCH), i quali, a loro volta, descrivono le parti iniziali discendenti dei tubi.

Le cadute di pressione attraverso gli orifizi sono state tenute in conto direttamente sulle giunzioni mediante appropriati coefficienti di perdite di carico concentrate. I tre tubi sono stati implementati nella loro configurazione a baionetta (v. figura 1.4), la quale prevede una sezione dei tubi discendente rappresentata dai volumi 208 e 210 (pipes) per il primo tubo, 220 e 222 per il secondo e 232 e 234 per il terzo, ed una sezione di risalita di forma anulare rappresentata dai volumi (ANNULUS) 212 e 214 per il primo tubo, 224 e 226 per il secondo e 236 e 238 per il terzo. Il componente 239 (BRANCH) consente, infine, la raccolta del vapore in uscita dai tubi dello scambiatore, indirizzandolo successivamente, tramite la giunzione 240 (SNGLJUN), verso lo scarico in atmosfera, simulata dal volume 241 (TMDPVOL). Per quanto riguarda il comportamento termico della sezione di prova si sono accuratamente riprodotte le dimensioni di ogni struttura e le proprietà termodinamiche tipiche dei materiali. Il gap di elio è stato simulato mediante una "struttura" avente una conduttanza termica equivalente.

Lo scambio termico tra il circuito primario e lo scambiatore di calore è ristretto ai soli volumi di risalita dell'acqua 212, 224 e 236, i quali scambiano in flusso controcorrente col volume 108, che rappresenta la zona del primario interessata alla discesa dell'LBE.

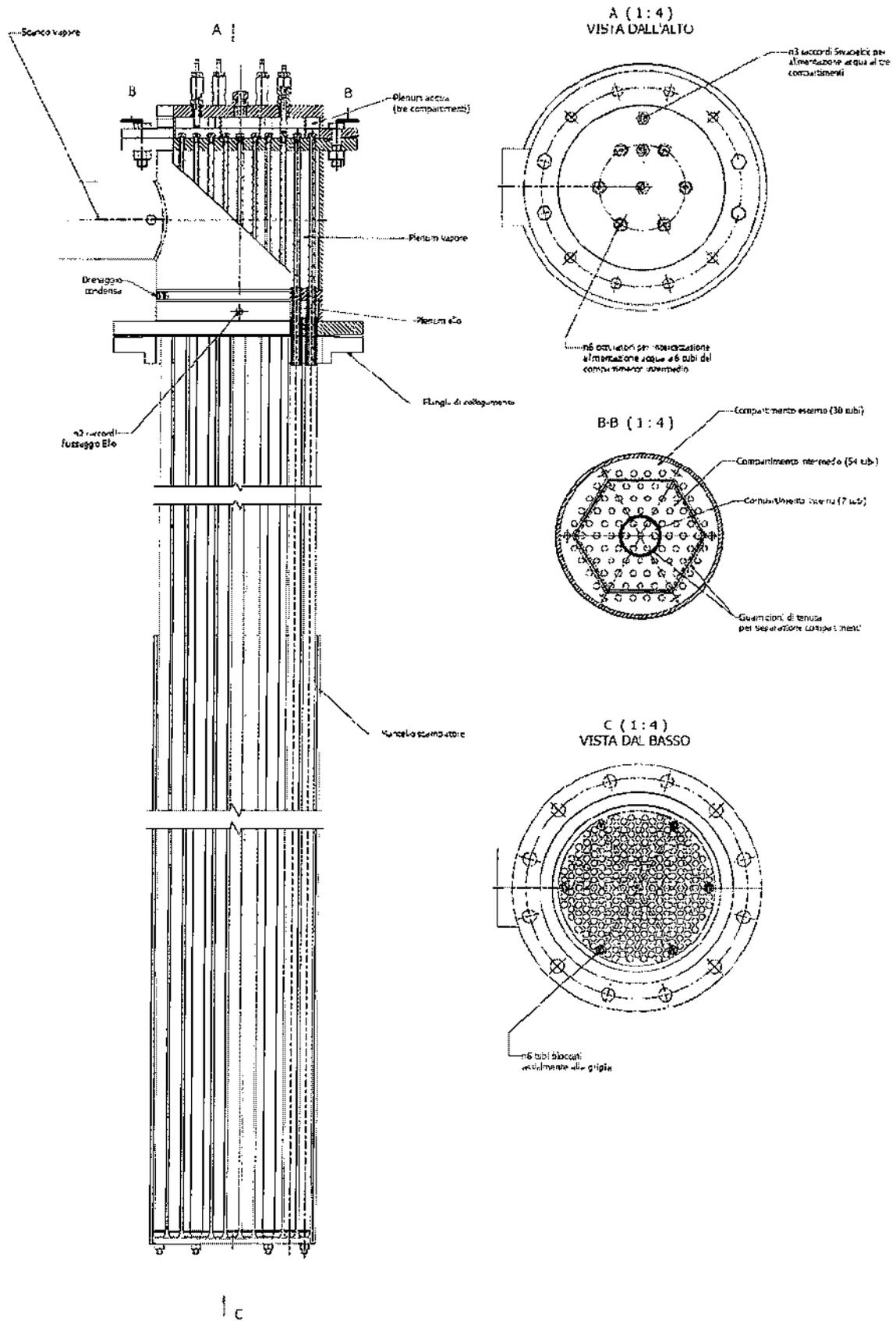


Figura 2.2: Disegno del W-DHR.

Ulteriori scambi di calore sono solo relativi alle strutture interne dei circuiti primario e secondario; nello specifico, ciascun volume di discesa dell'acqua scambia con il corrispondente volume di risalita adiacente. Solo i componenti 211, 223 e 235 (BRANCH) non hanno alcun accoppiamento termico con il circuito primario, nonostante rappresentino la parte curva dello scambiatore reale, poiché il loro apporto allo scambio termico, date le dimensioni, è stato ritenuto trascurabile.

E' stata utilizzata la nuova correlazione di scambio termico limitatamente ai componenti che rappresentano il riscaldatore e lo scambiatore di calore (v. paragrafo 2.1), mentre per tutte le altre strutture termiche viene utilizzata la vecchia correlazione.

### **2.3 Transitori analizzati**

La matrice dei transitori analizzati in questo lavoro consiste di tre prove, utili alla verifica del comportamento termoidraulico dell'apparecchiatura in condizioni sia di normale funzionamento che incidentali, a seguito dell'accoppiamento del nuovo scambiatore di calore W-DHR con il circuito primario di ICE.

Le condizioni in cui sono state eseguite le suddette tre simulazioni e gli obiettivi perseguiti sono riassunti in tabella 1.

Per quanto riguarda il Test A, oltre alla prova di "riferimento" con pressione di ingresso dell'acqua nel DHR di 4 bar, sono state eseguite due ulteriori simulazioni con pressione di alimentazione del circuito secondario pari a 3 ed a 5 bar, al fine di analizzare eventuali differenze nel raggiungimento del regime stazionario.

	Test A	Test B	Test C
<b>Tipologia della prova</b>	Circolazione in condizione di regime stazionario con potenza termica	Perdita della circolazione assistita (ULOF)	Perdita del pozzo freddo (ULOHS)
<b>Condizioni operative</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condizioni di regime di temperatura: 350 – 400 °C</li> <li>• Condizioni di regime della portata: 50-60 kg/s</li> <li>• <math>\Delta T</math> sezione scaldante di circa 100°C</li> <li>• Pressione ingresso acqua nel secondario del DHR: 4 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condizioni iniziali di regime stazionario</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condizioni iniziali di regime stazionario</li> </ul>
<b>Variabili da monitorare</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>T_{in}</math> e <math>T_{out}</math> nel riscaldatore</li> <li>• <math>T_{in}</math> e <math>T_{out}</math> nello scambiatore di calore</li> <li>• <math>\Delta p</math> attraverso il riscaldatore</li> <li>• <math>T_{max}</math> superficie barrette scaldanti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Portata nel circuito primario</li> <li>• Temperatura media dell'LBE</li> <li>• Temperatura massima sulla superficie delle barrette scaldanti</li> <li>• <math>T_{in}</math> e <math>T_{out}</math> nel riscaldatore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura media dell'LBE</li> <li>• Temperatura sulla superficie delle barrette scaldanti</li> <li>• <math>T_{in}</math> e <math>T_{out}</math> nel riscaldatore</li> <li>• Portata nel circuito primario</li> </ul>
<b>Obiettivi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verifica dell'accoppiamento riscaldatore-scambiatore di calore</li> <li>• Caratterizzazione termoidraulica dell'apparecchiatura</li> <li>• Valutazione dei coefficienti di scambio termico nei punti chiave</li> <li>• Validazione dei parametri della nodalizzazione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Studio del transitorio durante il passaggio dalla circolazione forzata alla circolazione naturale</li> <li>• Caratterizzazione del regime di circolazione naturale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisi del comportamento del sistema in condizioni transitorie</li> </ul>

*Tabella 1: Matrice dei transitori presi a riferimento.*

### 3. Risultati ottenuti

#### 3.1 Test A

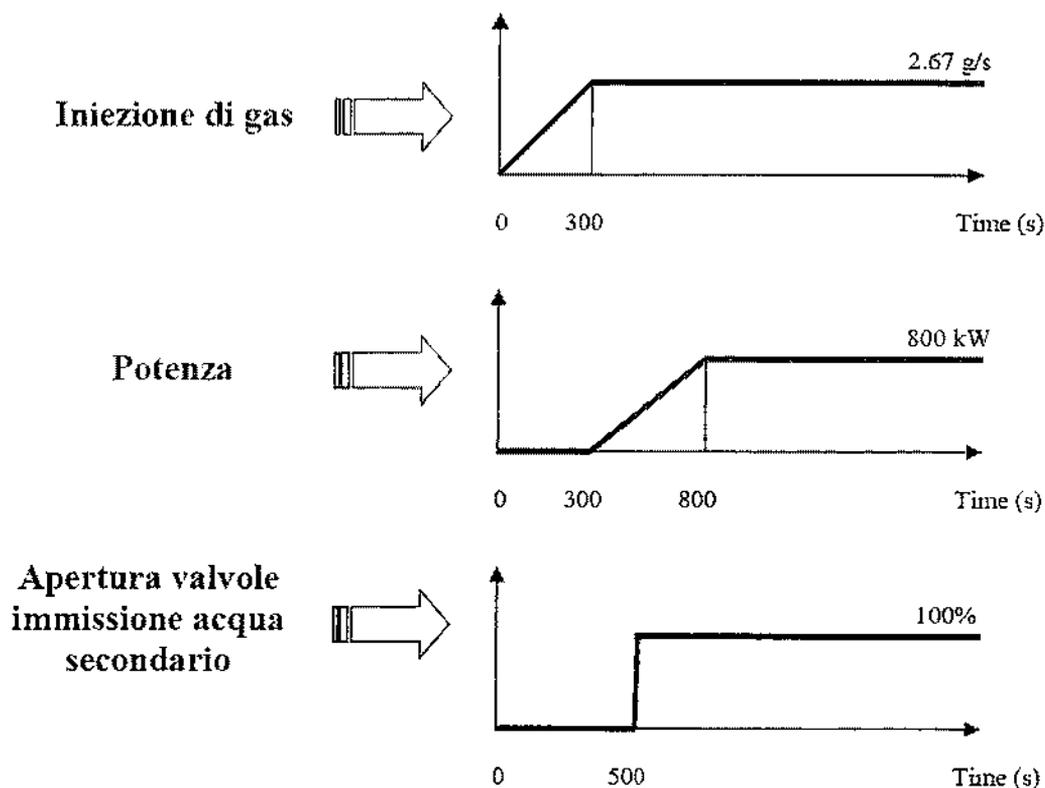
Il transitorio considerato per l'apparecchiatura ICE prevede la verifica del raggiungimento delle condizioni di regime stazionario, considerando l'accoppiamento di entrambi i circuiti primario e secondario, partendo dalle condizioni di  $T_{LBE} = 460.15 \text{ K}$ , con potenza erogata alla sezione scaldante e portata di iniezione di argon nulle all'istante iniziale.

Le condizioni al contorno riguardanti la portata di iniezione dell'argon nel circuito primario, la potenza fornita ai riscaldatori elettrici ed il grado di apertura delle valvole di immissione dell'acqua di refrigerazione allo scambiatore di calore sono riportate in figura 3.1.

In particolare, la portata di iniezione di argon viene aumentata linearmente dal valore nullo fino al valore di regime di  $2.67 \text{ g/s}$  in un intervallo di tempo pari a  $300 \text{ s}$  (v. figura 3.1). Il riscaldatore viene, invece, attivato a  $300 \text{ s}$  dall'inizio della prova e raggiunge la sua potenza massima erogabile ( $800 \text{ kW}$ ) in un intervallo di tempo pari a  $500 \text{ s}$  (v. figura 3.1).

Per quanto riguarda il circuito secondario, la pressione d'iniezione dell'acqua è stata assunta pari a  $4 \text{ bar}$ , mentre come condizioni iniziali al suo interno sono stati scelti un valore di pressione pari a  $1 \text{ bar}$  ed una temperatura di  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Questo tipo di scelta è stata fatta per evitare fenomeni di stress termici e meccanici all'interno dei tubi, dovuto al notevole gradiente termico che si stabilisce tra l'acqua in ingresso e la temperatura di superficie dei tubi lungo la sezione immersa nella lega fusa. Le valvole di alimentazione del secondario dello scambiatore vengono aperte dopo  $500 \text{ s}$  dall'inizio della prova (v. figura 3.1). Essendo un circuito che scarica vapore direttamente in atmosfera, la portata d'acqua che si viene a stabilire nel secondario è legata alla differenza tra la pressione di ingresso e quella atmosferica.

Sfruttando le condizioni al contorno appena esposte, le simulazioni eseguite per il raggiungimento delle condizioni stazionarie relativamente all'intera struttura nodalizzata hanno prodotto una serie di risultati utili alla comprensione del funzionamento del nuovo scambiatore W-DHR ed, in particolare, al suo comportamento a seguito dell'accoppiamento con il circuito primario.



*Figura 3.1: Condizioni al contorno adottate per la sezione di prova ICE durante il transitorio.*

Inoltre, è stato eseguito un confronto tra i risultati ottenuti con l'uso della correlazione di Ushakov, recentemente implementata nel codice di calcolo, e quelli relativi alla vecchia correlazione (v. paragrafo 2.1).

In figura 3.2 sono riportati gli andamenti temporali della portata di argon iniettata nel circuito primario e della conseguente portata di LBE che si viene a stabilire per effetto della circolazione assistita. Dopo un iniziale picco del valore della portata di LBE, dovuto essenzialmente al rapido incremento della portata di argon che tende a portarsi sui valori nominali stabiliti, essa si stabilizza ad un valore stazionario pari a circa 53.5 kg/s. L'andamento della portata che si ottiene con l'utilizzo della nuova correlazione di scambio termico convettivo risulta praticamente sovrapposta a quello ottenuto con la vecchia correlazione.

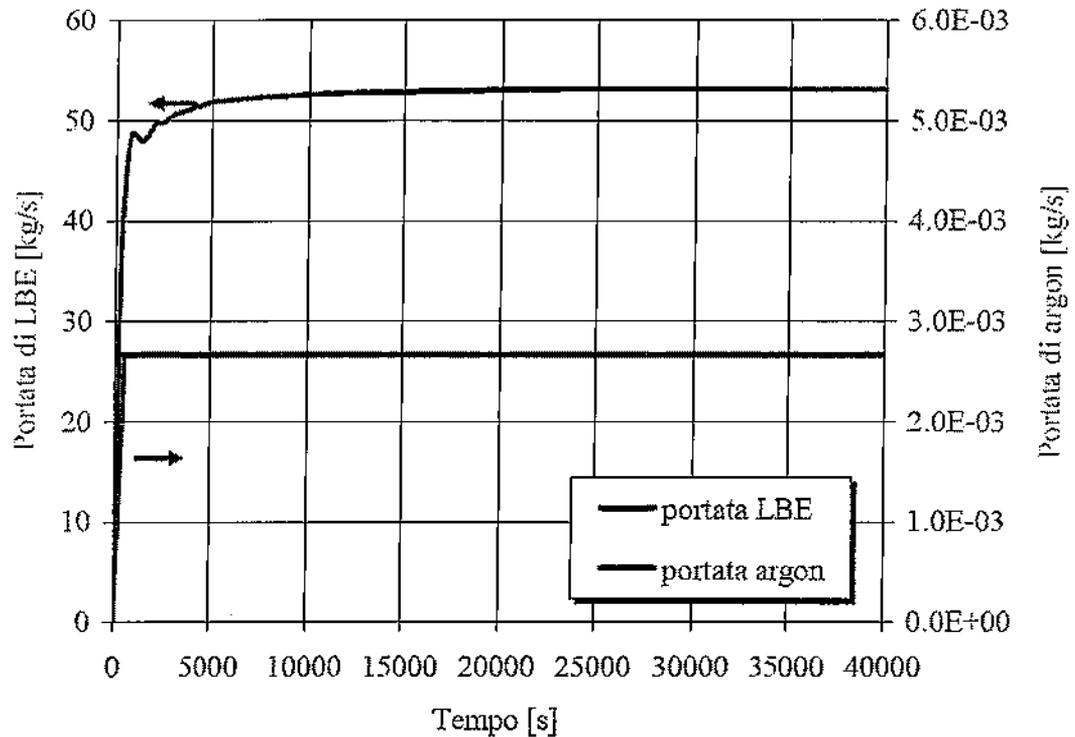


Figura 3.2: Andamento temporale della portata di LBE e di argon.

Gli andamenti temporali delle temperature dell'LBE in ingresso e in uscita al riscaldatore e della temperatura massima della superficie delle barrette scaldanti sono riportati in figura 3.3, mentre in figura 3.4 è mostrato l'andamento delle temperature dell'LBE in ingresso e in uscita dallo scambiatore di calore.

Per quanto riguarda la temperatura dell'eutettico in uscita dalla sezione scaldante, si nota un repentino aumento iniziale, legato principalmente al ritardo di 200 s nell'apertura delle valvole di immissione dell'acqua nel circuito secondario dell'HX rispetto all'avviamento del riscaldatore elettrico, con un successivo incremento graduale fino a portarsi asintoticamente ad un valore di 420 °C. La temperatura massima della superficie delle barrette scaldanti ha andamento simile a quello dell'LBE in uscita dal riscaldatore. Il valore asintotico finale della suddetta temperatura, ottenuto tramite l'uso della correlazione di Ushakov, risulta pari a circa 470 °C. La temperatura in ingresso al riscaldatore mostra una piccola riduzione negli istanti iniziali di accensione del riscaldatore, dovuta al raffreddamento dell'LBE per effetto dell'asportazione di calore da parte dello scambiatore di calore. La differenza di temperatura tra uscita ed ingresso del riscaldatore risulta a fine transitorio pari a circa 100 °C.

L'impiego della nuova correlazione comporta un abbassamento medio della temperatura dell'LBE nel circuito di pochi gradi centigradi ed un abbassamento della temperatura massima della superficie delle barrette scaldanti di circa 30 °C, come risulta in figura 3.2.

L'entità della diminuzione di temperatura delle barrette scaldanti è direttamente legata all'aumento del valore del coefficiente di scambio termico convettivo con la nuova correlazione (v. figura 3.5). Nonostante si abbia un sensibile aumento dell'HTC (Heat Transfer Coefficient), con la nuova correlazione di scambio termico si osserva una piccola riduzione di temperatura media dell'LBE. Ciò è dovuto al fatto che la temperatura media dell'LBE, a parità di potenza termica scaldante, è condizionata essenzialmente dal valore del coefficiente di scambio termico globale tra lato primario e lato secondario dello scambiatore di calore, il cui aumento risulta essere dell'ordine di grandezza di qualche per cento. Infatti, la maggiore resistenza termica allo scambio di calore nell'HX è associata al gap anulare di elio presente nei tubi dello scambiatore.

La temperatura in uscita dal riscaldatore non coincide con quella in ingresso allo scambiatore di calore in quanto la lega eutettica Pb-Bi nella sua risalita attraverso il riser scambia calore con il fluido presente nel downcomer (cfr. figura 3.3 con figura 3.4). Il metallo liquido in ingresso allo scambiatore è quindi leggermente più freddo di quanto non sia all'uscita del riscaldatore e più caldo in ingresso a quest'ultimo componente di quanto non lo sia all'uscita del pozzo freddo.

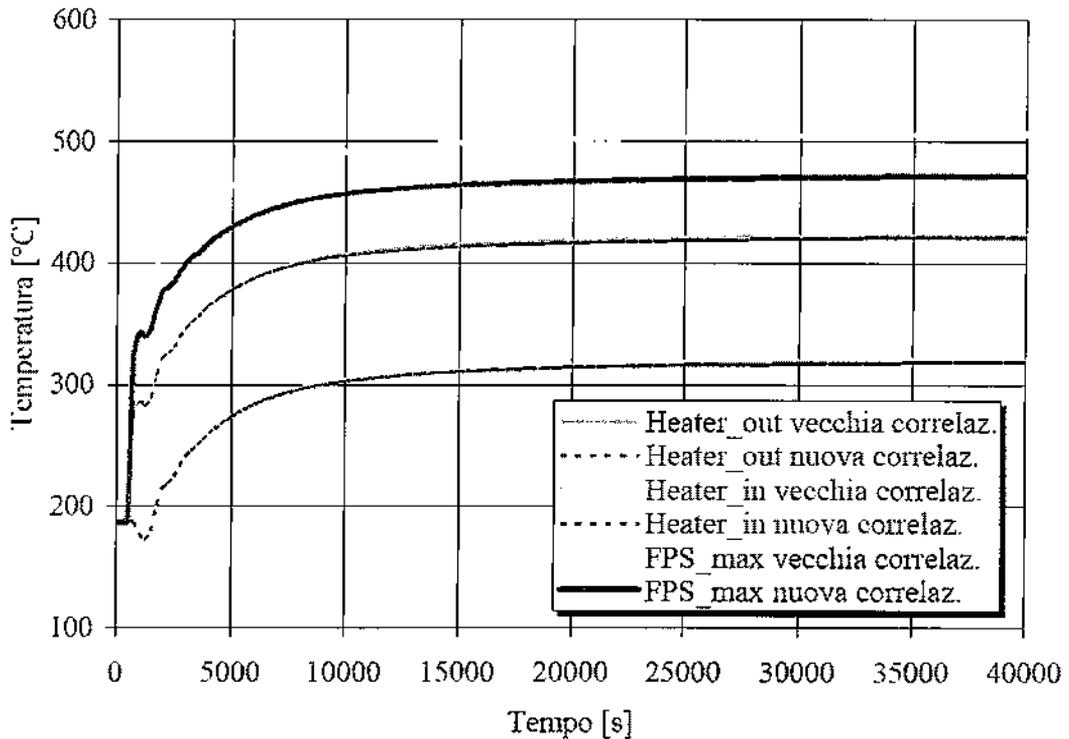


Figura 3.3: Andamento temporale delle temperature in ingresso e in uscita al riscaldatore.

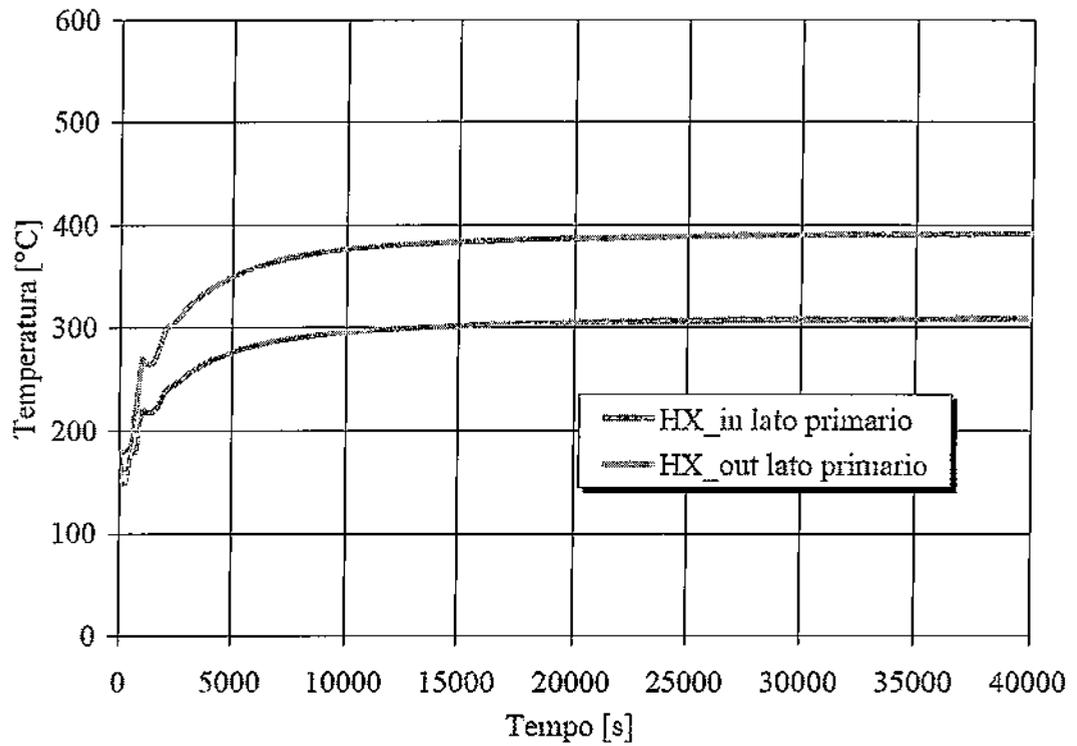


Figura 3.4: Andamento temporale delle temperature in ingresso e in uscita dallo scambiatore di calore, lato primario.

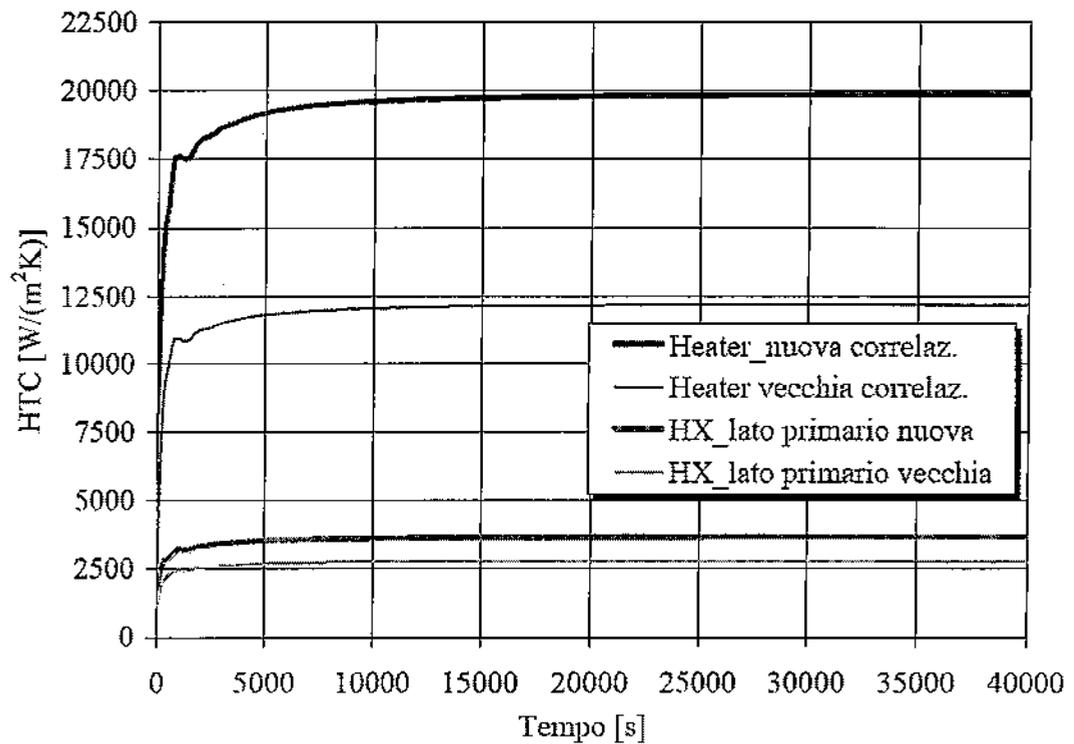


Figura 3.5: Andamento temporale del coefficiente di scambio termico convettivo nel riscaldatore e nel lato primario dello scambiatore di calore.

In figura 3.6 vengono riportati i valori relativi alle portate d'acqua che si vengono a stabilire nei tre compartimenti del secondario dello scambiatore all'apertura delle tre valvole di alimentazione, per effetto della pressione imposta a monte del circuito stesso (pari a 4 bar). Le tre portate, ottenute con il codice RELAP in corrispondenza delle tre valvole presenti sul secondario, risultano proporzionali al numero di tubi che costituisce il compartimento a cui ciascuna valvola è associata. Il picco di portata riscontrabile negli istanti iniziali della simulazione è dovuto alla elevata differenza di pressione esistente all'apertura delle valvole tra l'acqua presente nel collettore di ingresso e l'acqua a valle delle valvole stesse, la cui pressione iniziale è pari a quella atmosferica.

La suddetta differenza di pressione influenza anche la frazione di vuoto calcolata in uscita al circuito secondario, il cui grafico è riportato in figura 3.7, attestandosi allo stazionario intorno ad un valore medio del 67 %. Le piccole oscillazioni della portata in ingresso allo scambiatore di calore sono imputabili alle oscillazioni della frazione di vuoto della miscela bifase presente nel secondario dei tubi dell'HX.

In figura 3.8 sono rappresentati i valori relativi alle differenze di pressione misurate sia nel circuito secondario sia in quello primario, a cavallo, rispettivamente, dell'HX e del riscaldatore. In particolare, la caduta di pressione tra ingresso ed uscita del riscaldatore è stata calcolata al netto del carico gravimetrico da parte della colonna di lega eutettica Pb-Bi.

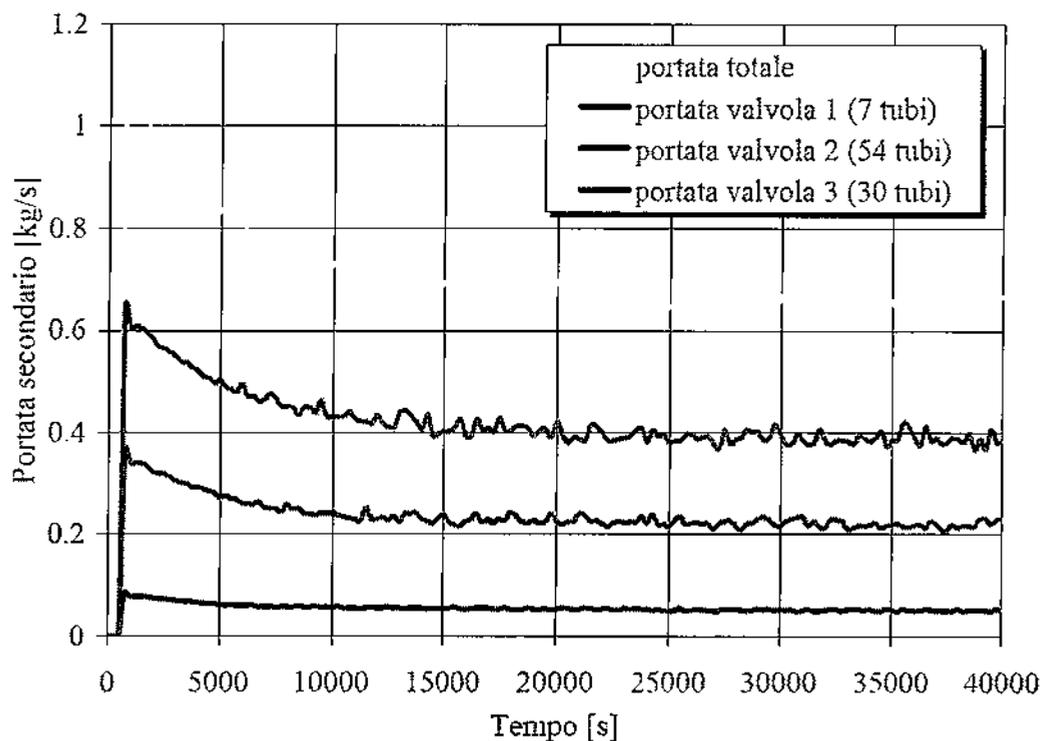
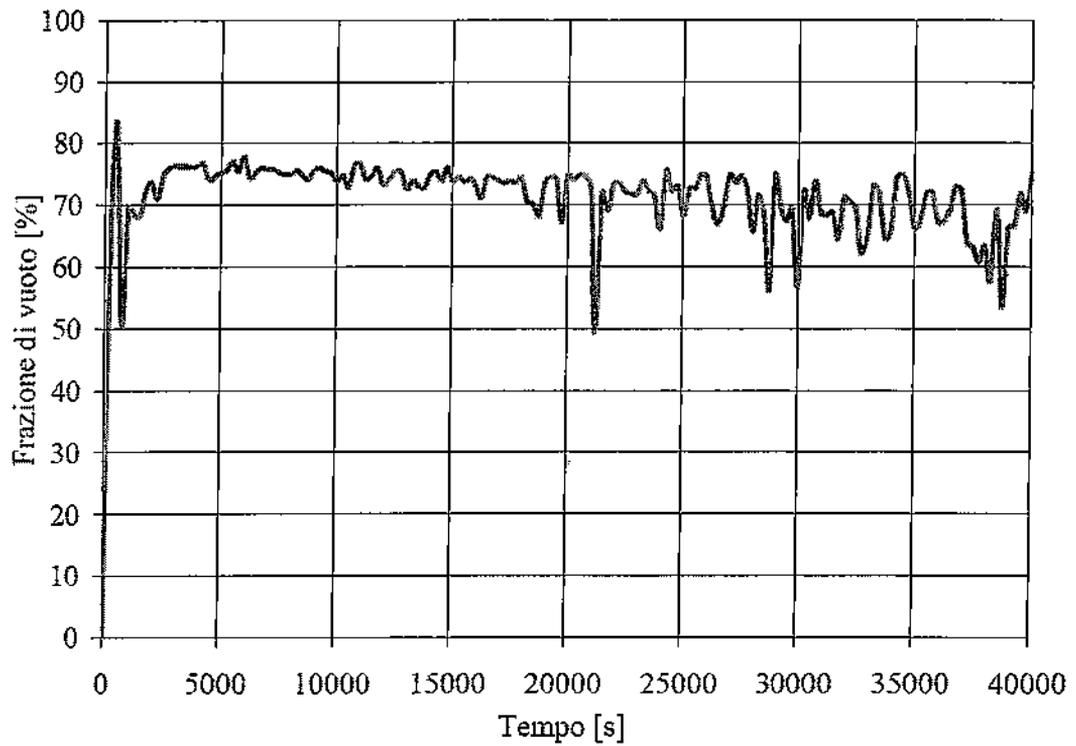
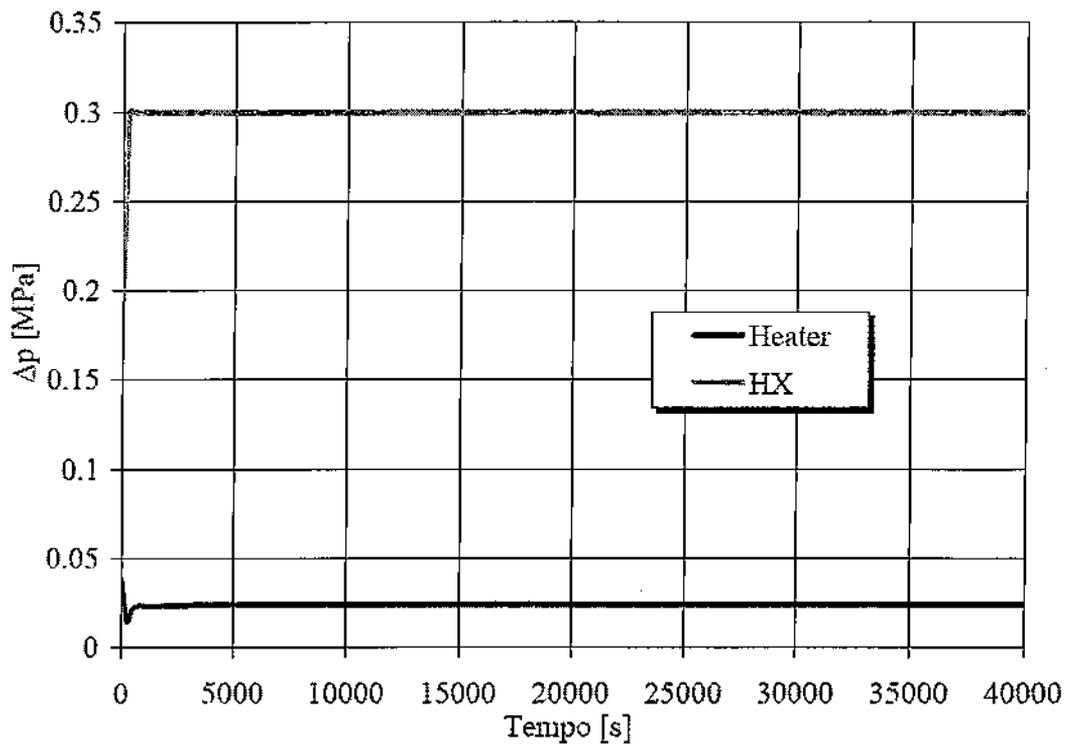


Figura 3.6: Andamento temporale della portata totale d'acqua e di quelle parziali attraverso le tre valvole dello scambiatore di calore.



*Figura 3.7: Andamento temporale della frazione di vuoto all'uscita del circuito secondario dell'HX.*



*Figura 3.8: Andamento temporale della caduta di pressione nel riscaldatore e nello scambiatore di calore lato secondario*

In condizioni stazionarie, la potenza termica fornita dal riscaldatore deve essere uguale a quella asportata dallo scambiatore di calore. La figura 3.9 mostra l'andamento in funzione del tempo della differenza di temperatura tra le sezioni a monte e a valle del riscaldatore e dello scambiatore di calore. Come si può notare, il raggiungimento delle condizioni stazionarie per la differenza di temperatura attraverso l'HX avviene in maniera più lenta rispetto a quanto avviene nella sezione scaldante. Ciò è dovuto, principalmente, al maggiore volume di LBE interessato al raffreddamento da parte dell'HX rispetto a quello presente nella sezione scaldante.

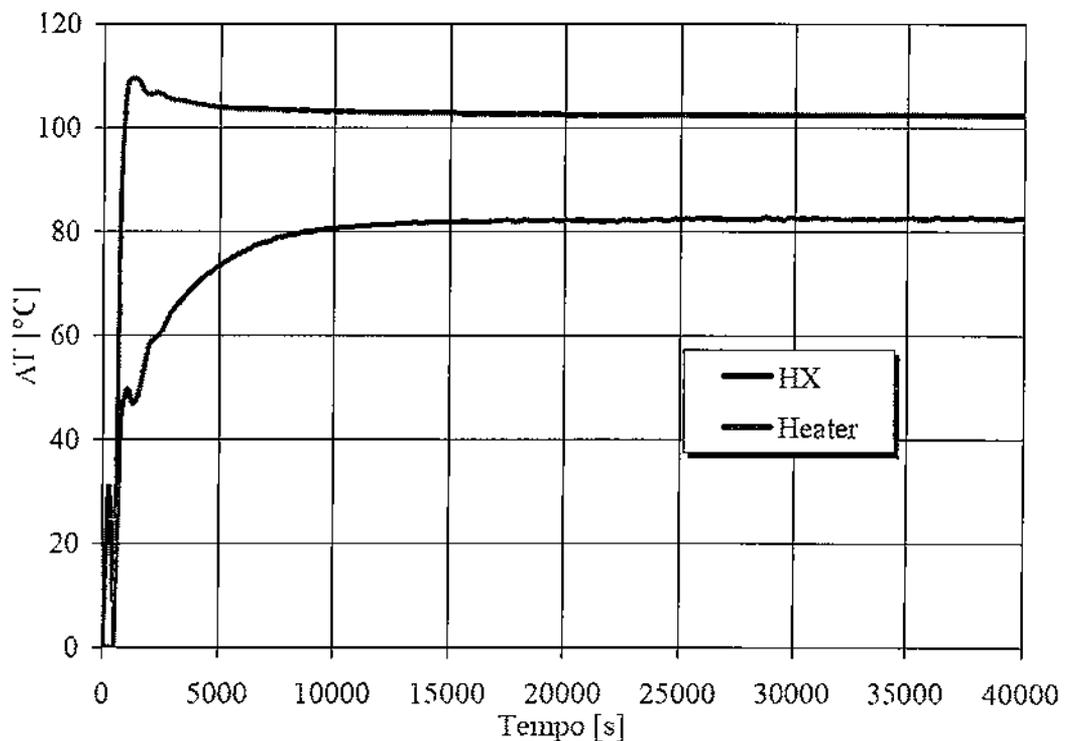
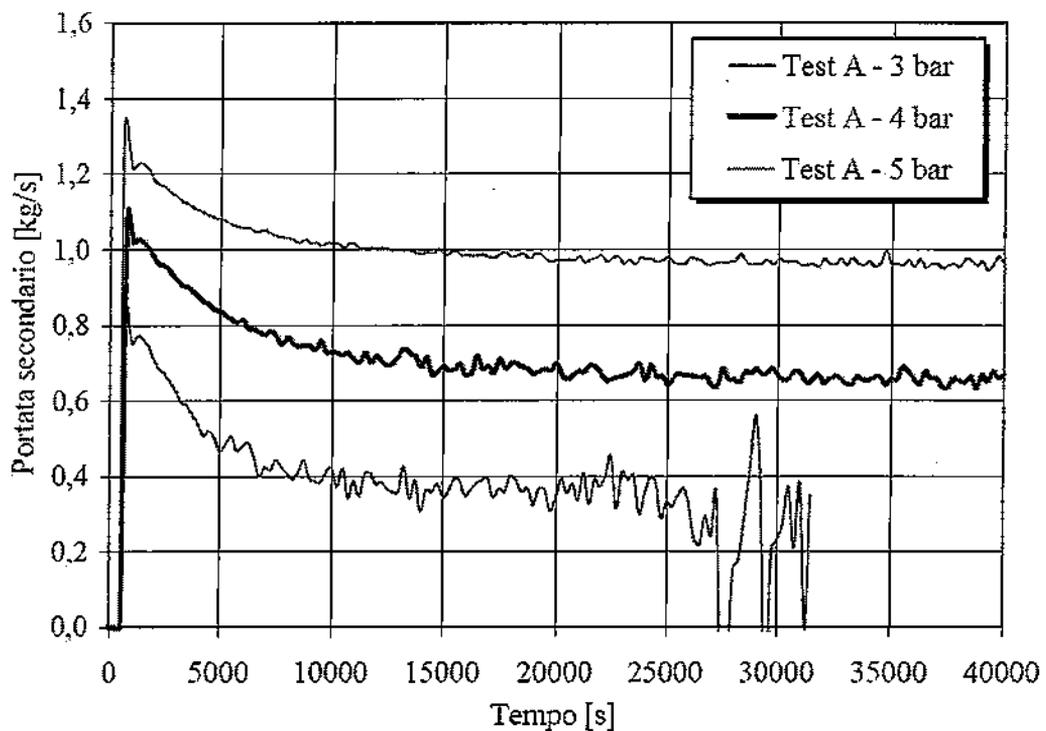


Figura 3.9: Andamento temporale della differenza di temperatura tra ingresso ed uscita del riscaldatore e dello scambiatore di calore

Inoltre, è stata analizzata l'influenza della variazione della pressione dell'acqua di alimentazione del circuito secondario sul raggiungimento delle condizioni stazionarie, al fine di ottenere una corretta caratterizzazione termoidraulica dell'apparecchiatura sperimentale di ICE. In particolare, in aggiunta al caso con pressione in ingresso dell'acqua nell'HX di 4 bar, sono stati considerati altri due casi: uno con pressione di ingresso pari a 3 bar e l'altro con pressione di 5 bar.

Come mostrato in figura 3.10, la variazione delle pressioni dell'acqua in ingresso allo scambiatore comporta un differente valore della portata totale che si viene a stabilire nel circuito secondario. Dopo il picco presente nelle fasi iniziali del transitorio, simile per tutte e

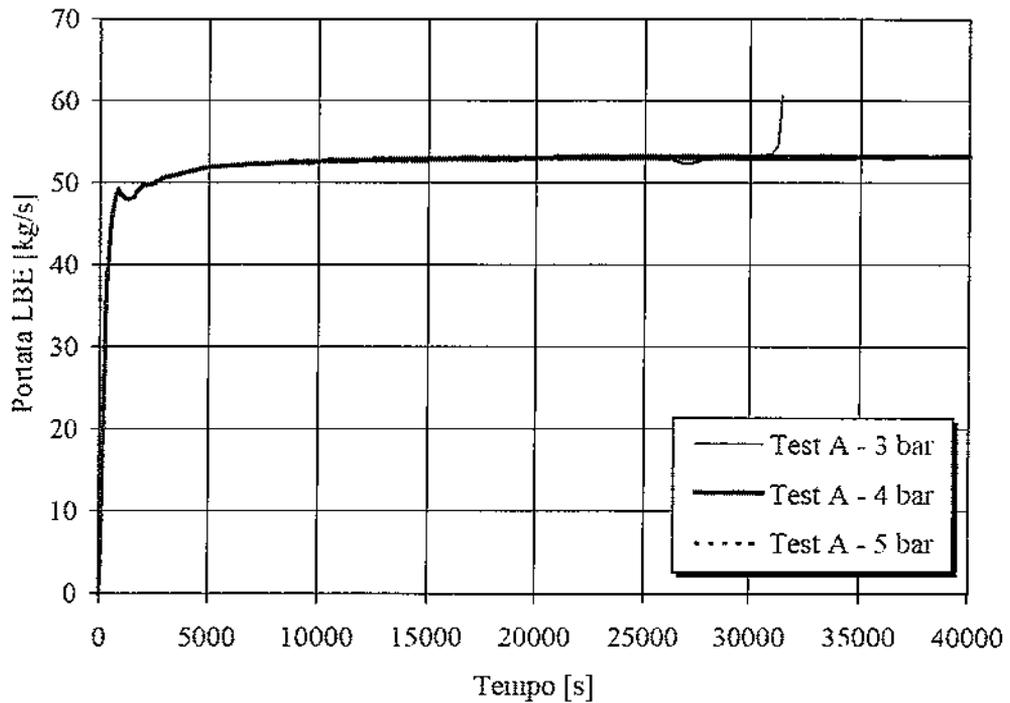
tre le curve, le portate tendono asintoticamente al raggiungimento del loro valore in regime stazionario: la portata corrispondente alla pressione di 5 bar si assesta intorno ad un valore di circa 0.95 kg/s, mentre quella corrispondente a 4 bar intorno a 0.65 kg/s. Per quanto riguarda il caso con pressione di alimentazione di 3 bar, la portata dell'acqua nel secondario tende a diminuire durante il transitorio senza che sia stato possibile ottenere condizioni stazionarie. Il calcolo relativo al Test A con 3 bar di pressione si è arrestato automaticamente intorno ai 32000 secondi a causa delle eccessive oscillazioni di portata verificatesi non solo sul lato secondario, ma anche sul primario della sezione ICE.



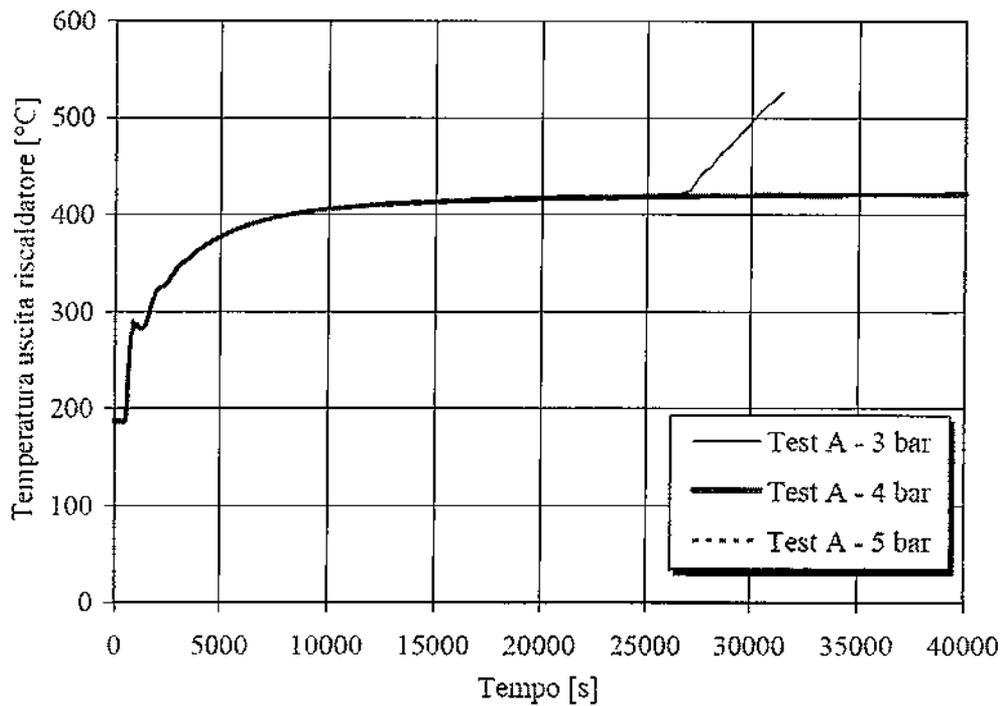
*Figura 3.10: Andamento temporale delle portate d'acqua in ingresso al circuito secondario relativo alle tre diverse pressioni di alimentazione.*

Non riuscendo in tale caso ad estrarre tutto il calore prodotto dal riscaldatore, la portata di LBE nel lato primario del circuito, riportata in figura 3.11, subisce anch'essa una repentina oscillazione dovuta all'incremento della temperatura della lega eutettica Pb-Bi, ben visibile in figura 3.12. Tale incremento della temperatura del fluido primario segue un aumento pressoché lineare della temperatura massima della superficie delle barrette scaldanti, con una variazione di circa 100 °C in poco meno di 5000 s (v. figura 3.13). Per quanto riguarda gli altri due test svolti a pressioni di 4 e 5 bar, non si notano rilevanti variazioni di portata e temperatura sul lato primario del circuito: la variazione di pressione influisce maggiormente

sulla portata in ingresso al circuito secondario e sulla frazione di vuoto in uscita allo scambiatore di calore, quest'ultima riportata in figura 3.14.



*Figura 3.11: Andamento temporale della portata di LBE relativo alle tre diverse pressioni di alimentazione.*



*Figura 3.12: Andamento temporale della temperatura dell'LBE in uscita dal riscaldatore relativo alle tre diverse pressioni di alimentazione.*

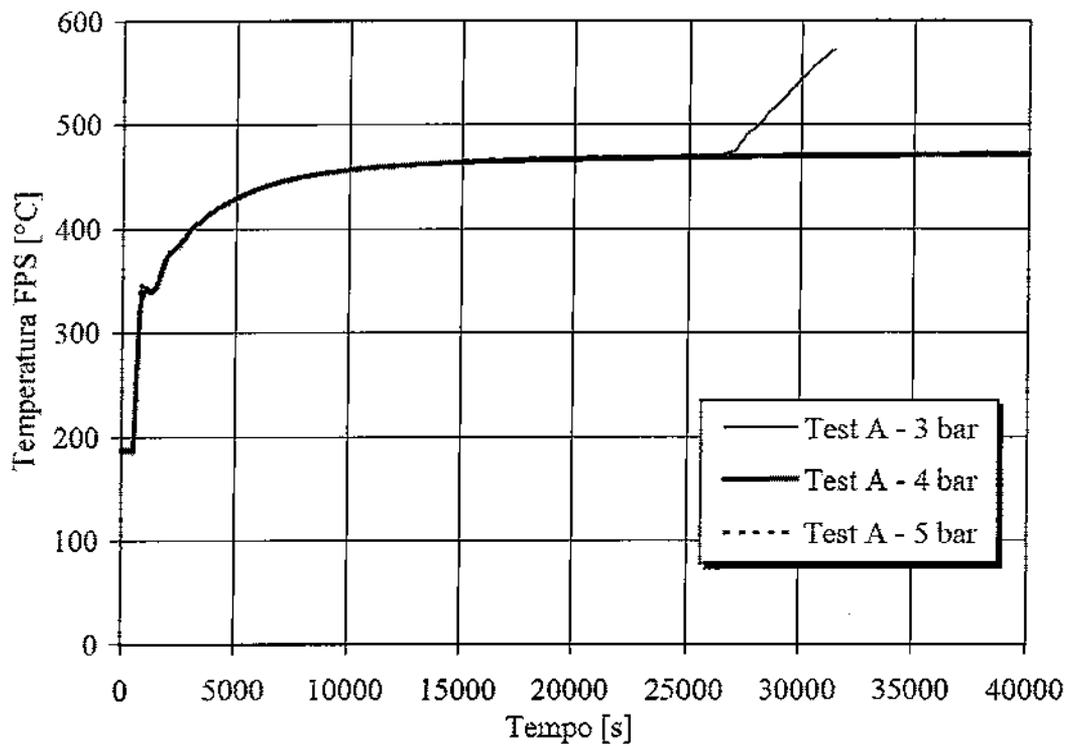


Figura 3.13: Andamento temporale della temperatura massima sulla superficie delle barrette scaldanti relativo alle tre diverse pressioni di alimentazione.

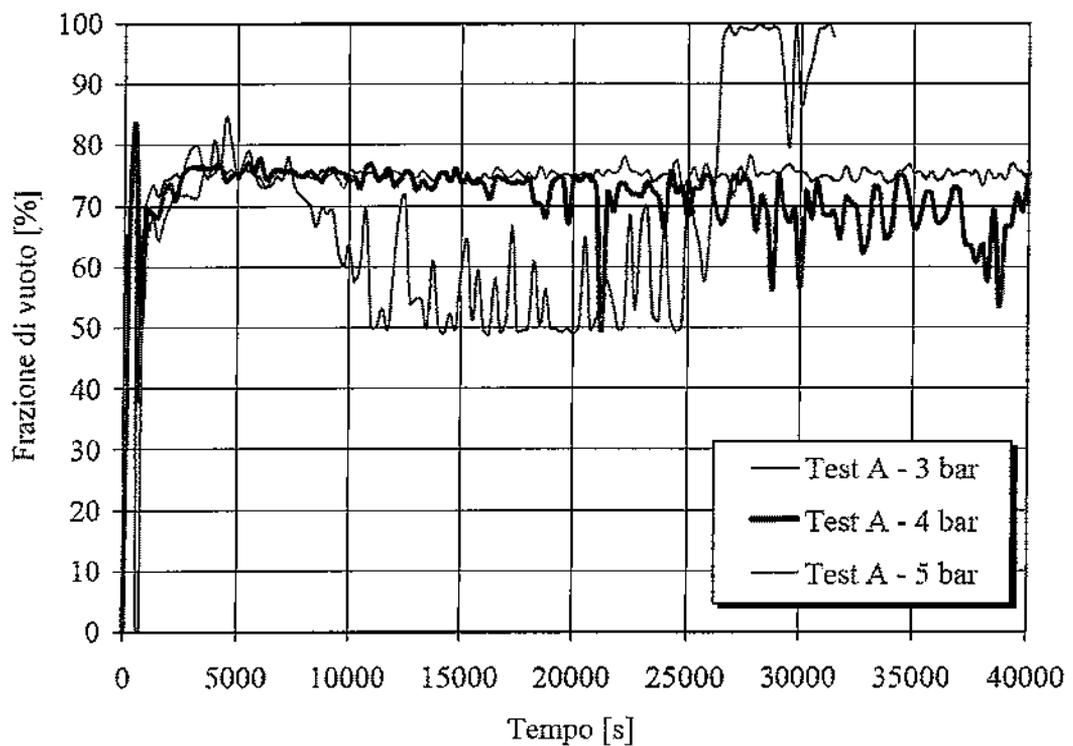


Figura 3.14: Andamento temporale della frazione di vuoto in uscita dall'HX relativo alle tre diverse pressioni di alimentazione.

### 3.2 Test B

Una situazione incidentale di rilevanza significativa per la caratterizzazione del comportamento termoidraulico della sezione di prova ICE è quella relativa alla perdita della circolazione assistita tramite gas iniettato all'interno del circuito primario. Lo scopo di questa simulazione è quello di consentire un'analisi dettagliata del comportamento termoidraulico del circuito a seguito della brusca interruzione della portata di iniezione di argon nel riser.

Le condizioni iniziali sono quelle ottenute al termine della simulazione del test A con pressione di alimentazione dell'acqua nel DHR di 4 bar (condizioni di riferimento). Il Test B inizia con una diminuzione della portata di argon iniettato da 2.67 g/s fino a zero in un intervallo di tempo di 100 s.

Nella figura 3.15 si può osservare come la portata del circuito primario, in assenza di iniezione di gas, si stabilizzi in circolazione naturale sul valore di circa 27.5 kg/s, corrispondente a poco più della metà di quella di regime in circolazione assistita. In queste nuove condizioni di portata la velocità della lega eutettica Pb-Bi è quindi circa la metà di quella nelle normali condizioni operative. Data la dipendenza quadratica delle perdite di carico concentrate rispetto alla velocità, il dimezzamento della portata comporta una diminuzione considerevole delle perdite di carico nel riscaldatore, così come mostrato in figura 3.16.

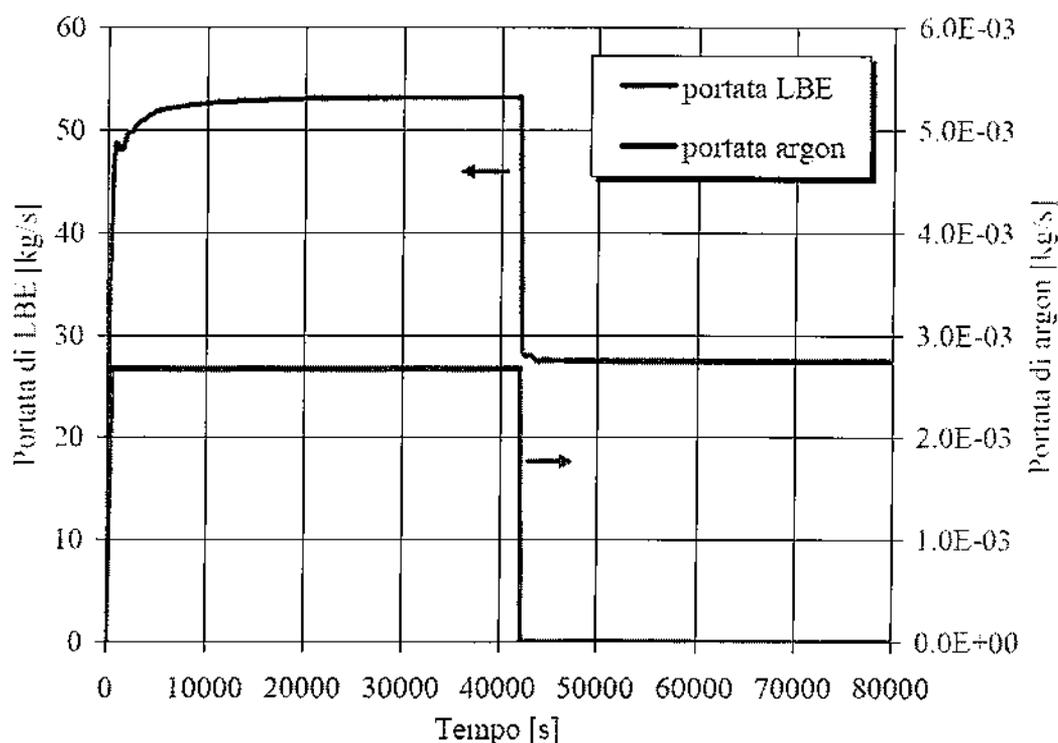
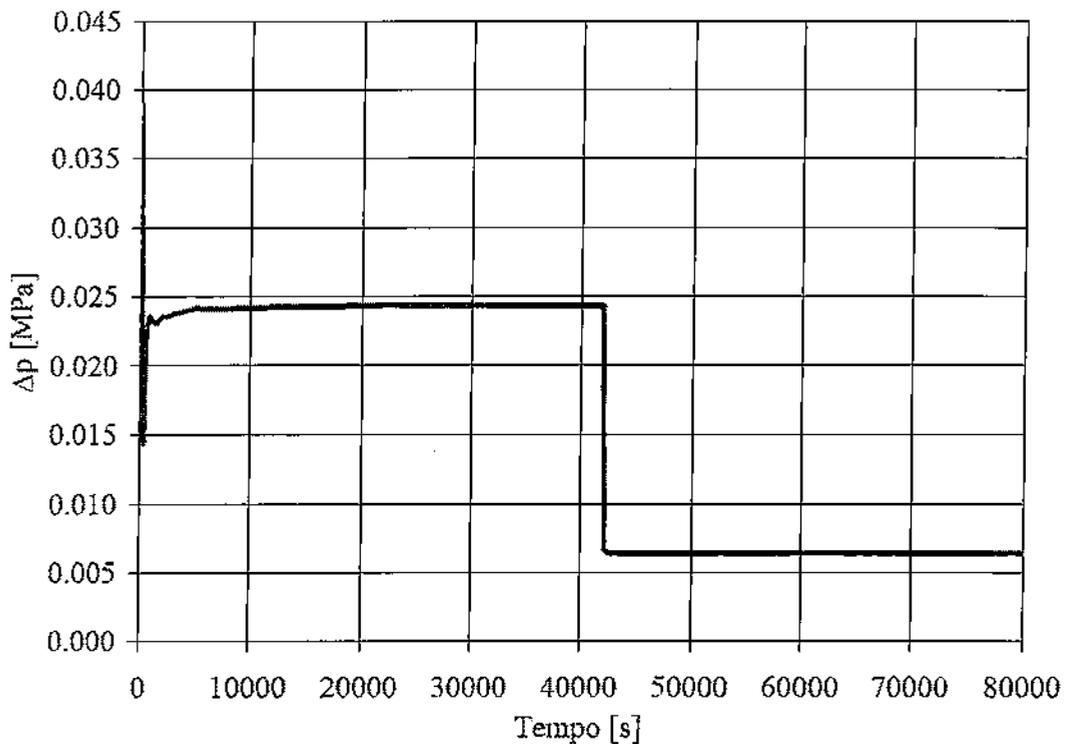


Figura 3.15: Andamento temporale della portata di LBE e di argon.



*Figura 3.16: Andamento temporale delle perdite di carico attraverso il riscaldatore.*

Come si può vedere dalla figura 3.17, la diminuzione della portata di Pb-Bi in circolazione naturale ha l'effetto di aumentare la temperatura della superficie delle barrette scaldanti sino ad un valore pari a circa 560 °C, a cui corrisponde un incremento di circa 80 °C della temperatura di uscita dell'LBE dalla sezione scaldante.

Nelle figure 3.18 e 3.19 sono riportati gli andamenti temporali delle temperature, rispettivamente, del fluido nel lato primario e di quello nel lato secondario, dello scambiatore di calore. In particolare, nella figura 3.18 si osserva un leggero abbassamento della temperatura del Pb-Bi in uscita dallo scambiatore di calore, a seguito dell'interruzione dell'iniezione di argon. Ciò è dovuto alla diminuzione della portata nel circuito primario a cui consegue una diminuzione del coefficiente di scambio termico convettivo lato LBE (v. figura 3.20).

Questo repentino abbassamento della temperatura del Pb-Bi in uscita dallo scambiatore di calore non influenza l'andamento della temperatura di uscita dell'acqua di refrigerazione dallo scambiatore stesso (v. figura 3.19). Infatti, essendo l'acqua in uscita dall'HX alla pressione di circa 1 bar e bifase, la sua temperatura si mantiene pari a quella di saturazione alla pressione di uscita.

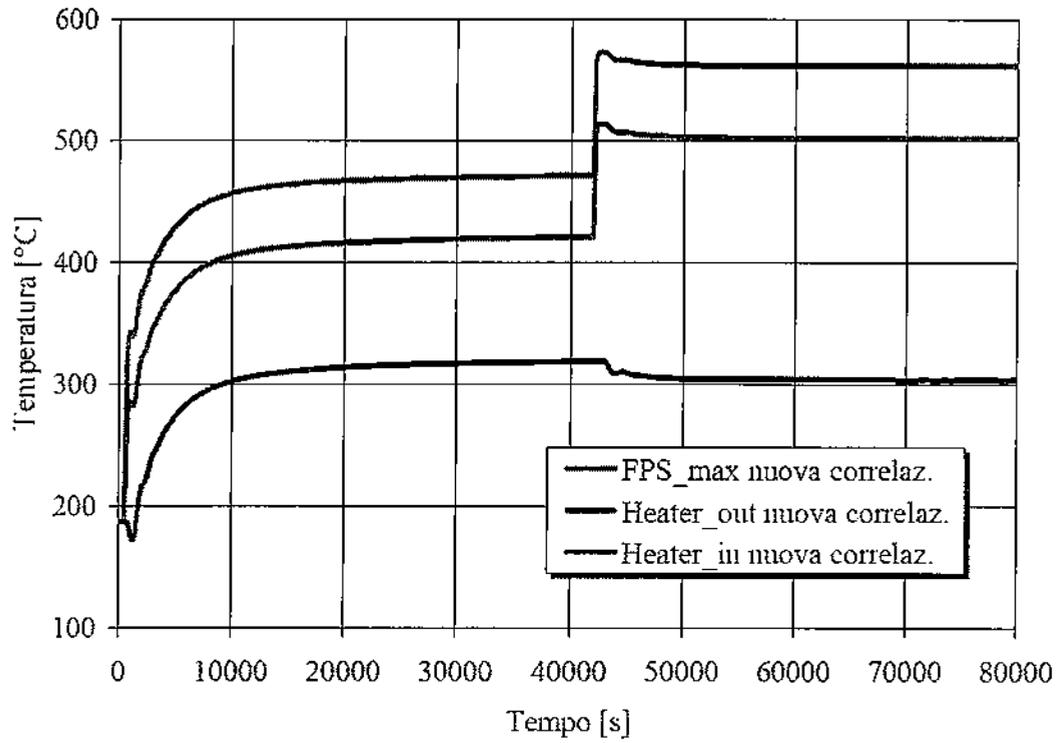


Figura 3.17: Andamento della temperatura in ingresso e in uscita dal riscaldatore e sulla superficie delle barrette scaldanti.

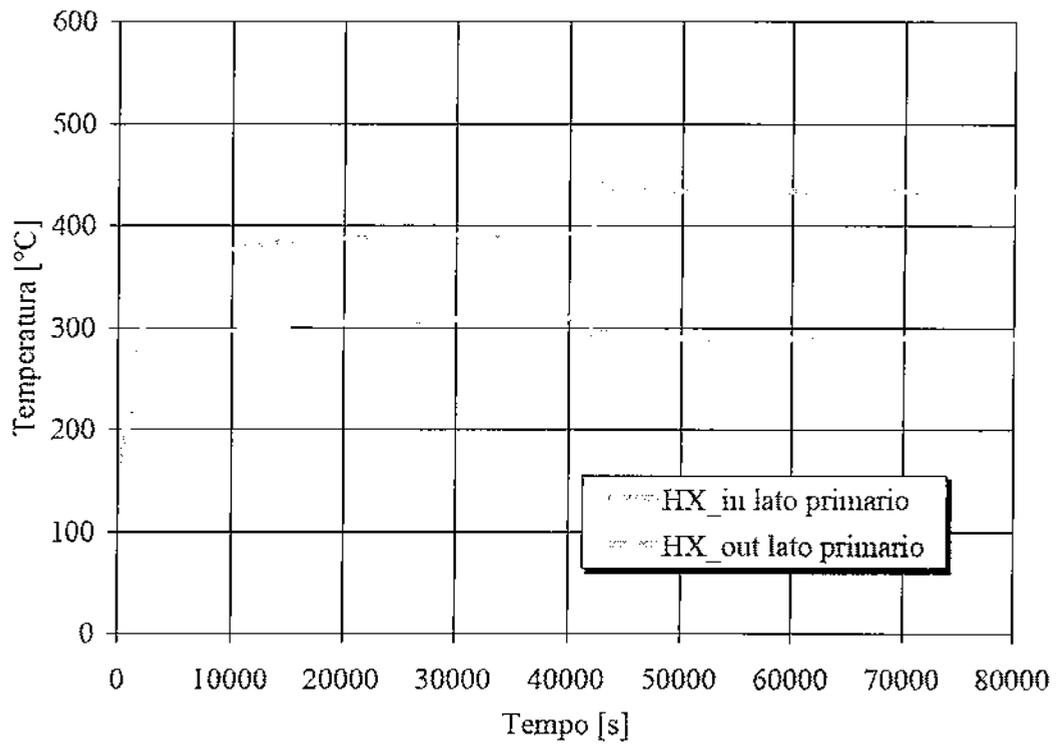


Figura 3.18: Andamento temporale della temperatura in ingresso e in uscita dallo scambiatore di calore, lato primario.

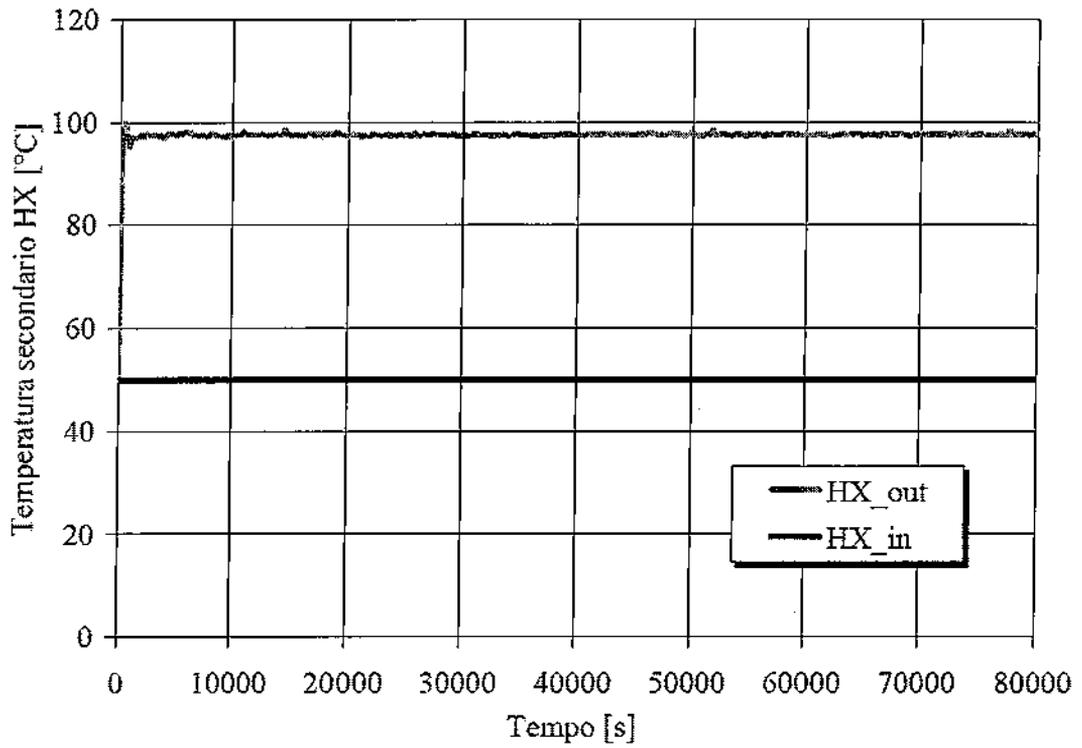


Figura 3.19: Andamento temporale della temperatura dell'acqua in ingresso e in uscita dallo scambiatore di calore.

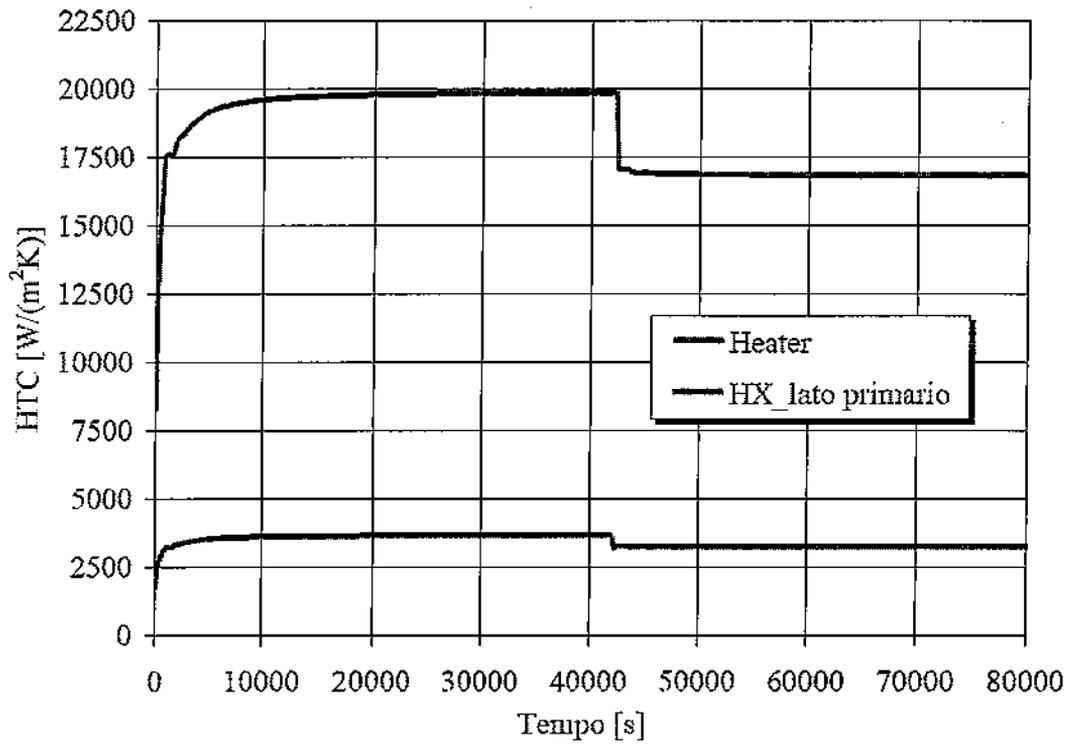


Figura 3.20: Andamento temporale del coefficiente di scambio termico nella sezione scaldante e nello scambiatore di calore, lato primario.

### 3.3 Test C

Il transitorio relativo alla prova C riguarda un altro ipotetico scenario incidentale, che può verificarsi durante le normali condizioni di esercizio di un impianto nucleare, nel quale si abbia una improvvisa interruzione della refrigerazione da parte del circuito secondario.

La simulazione relativa a questa condizione incidentale è servita a valutare il comportamento della sezione di prova ICE a seguito della chiusura accidentale delle valvole di alimentazione del circuito secondario e le possibili strategie di intervento per garantire la sicurezza dell'intero impianto CIRCE. Le condizioni incidentali considerate in questo transitorio sono state analizzate partendo dalle condizioni di regime ottenute nel test A.

Per simulare la perdita del pozzo freddo sono state chiuse le valvole di alimentazione del circuito secondario rappresentate nella nodalizzazione di ICE tramite le card 203, 215 e 227 (v. figura 2.1). Queste ultime bloccano la portata del fluido secondario chiudendosi in un intervallo di tempo di 10 s.

Nella prima fase del transitorio si assiste allo svuotamento dei tubi dello scambiatore di calore per effetto della rapida vaporizzazione dell'acqua conseguente sia all'aumento di temperatura delle superfici dei tubi stessi, sia alla diminuzione della pressione in tutto il circuito secondario posto a valle delle valvole di alimentazione, la quale si portata in pochi secondi alla pressione atmosferica.

In figura 3.21, è riportato l'andamento temporale della portata nel circuito primario durante il transitorio. La chiusura delle valvole di alimentazione dell'acqua inizia a 40000 s. Nonostante la presenza di oscillazioni, si può notare che nei 10000 s seguenti la perdita del pozzo freddo, il valor medio della portata rimane praticamente costante. Le oscillazioni osservate potrebbero essere legate all'aumento del volume specifico del gas conseguente con l'aumento della temperatura della lega eutettica: il regime di flusso nel condotto ascendente risulta quindi meno stabile per la presenza di grandi bolle di argon.

L'aumento della temperatura della lega eutettica è lineare, circa 200 °C/ora (v. figura 3.22): infatti, nella configurazione incidentale il circuito si comporta in modo simile ad un volume termicamente isolato al quale viene fornita una potenza termica costante. Essendo costante il valor medio della portata, la differenza di temperatura tra l'ingresso e l'uscita alla sezione scaldante rimane circa uguale al valore che si ha nelle normali condizioni di esercizio, di poco inferiore ai 100 °C.

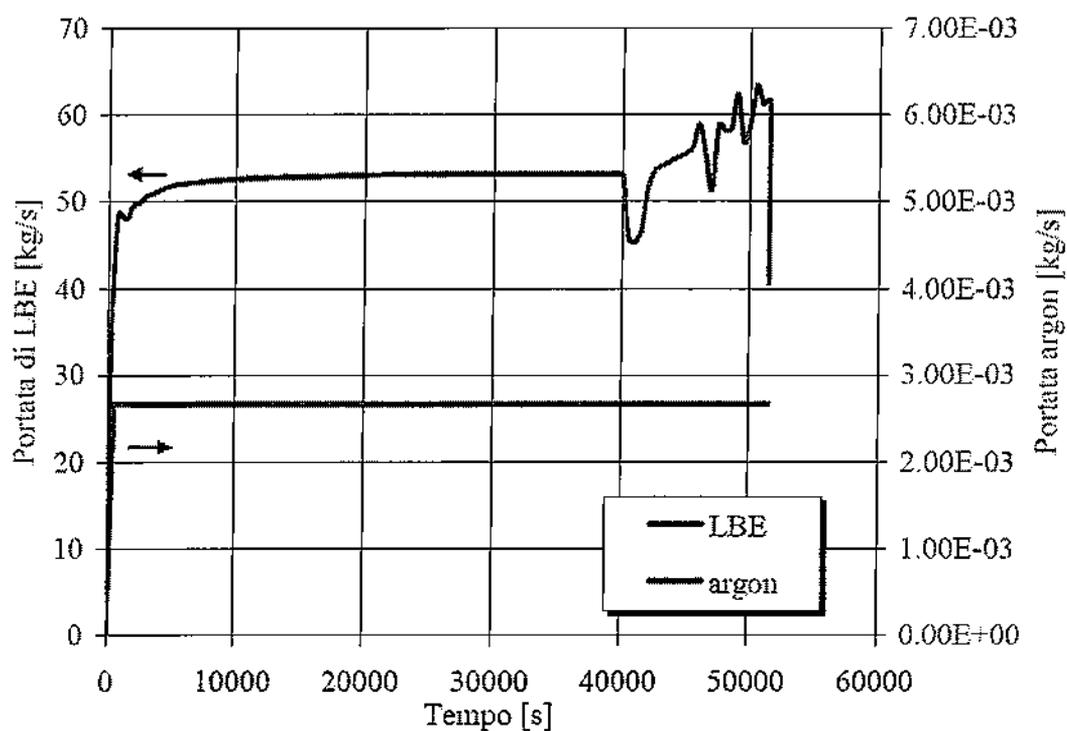


Figura 3.21: Andamento temporale della portata di LBE e argon nel circuito primario.

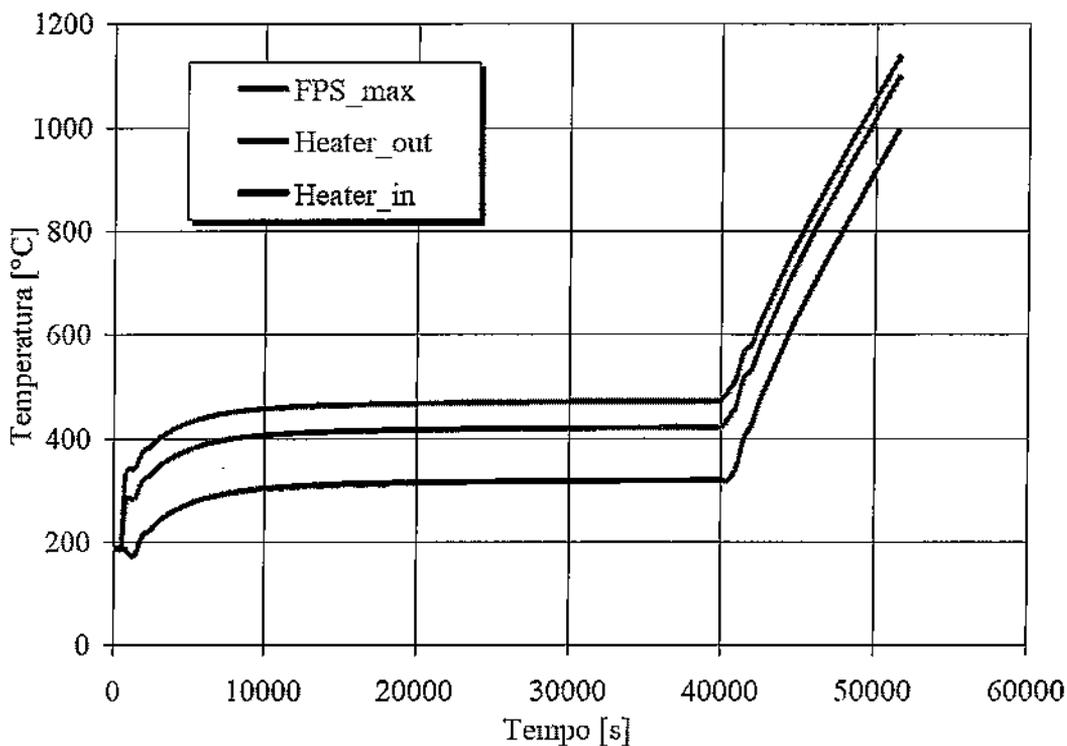


Figura 3.22: Andamento temporale delle temperature in ingresso e in uscita dal riscaldatore e sulla superficie delle barrette scaldanti.

La figura 3.23 mostra come negli istanti immediatamente successivi alla chiusura delle valvole di alimentazione del circuito secondario, la differenza di temperatura dell'LBE tra l'ingresso e l'uscita dallo scambiatore di calore tenda ad annullarsi, seguendo l'incremento lineare dettato dalla temperatura massima della superficie delle barrette del riscaldatore (v. figura 3.22).

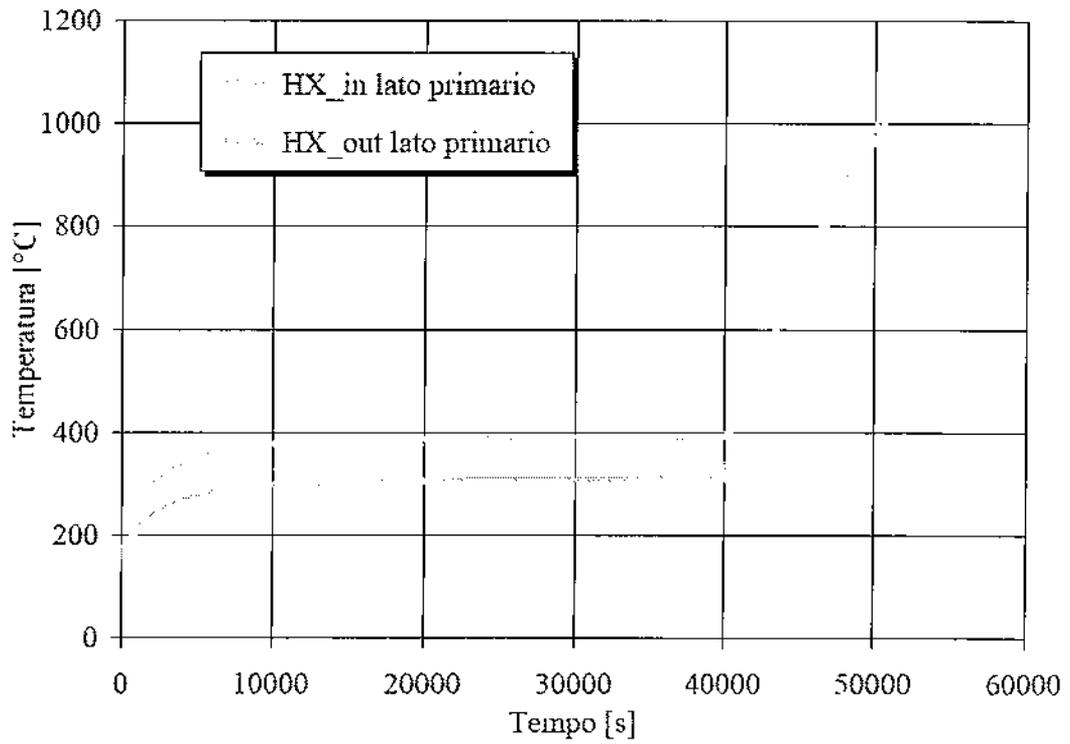


Figura 3.23: Andamento temporale della temperatura in ingresso ed in uscita dal riscaldatore, lato primario.

## Conclusioni

I risultati ottenuti per la caratterizzazione del comportamento termoidraulico della sezione di prova ICE hanno portato ad una buona comprensione del funzionamento del nuovo scambiatore di calore W-DHR, considerando il suo accoppiamento con il circuito primario.

In particolare, i calcoli relativi alla prima prova hanno permesso di fornire indicazioni circa il raggiungimento delle condizioni stazionarie in corrispondenza a tre differenti valori della pressione dell'acqua in ingresso al circuito secondario. Per la prova con pressione dell'acqua in ingresso all'HX di 4 bar (test A di riferimento) sono stati determinati gli andamenti temporali delle principali grandezze termodinamiche nei punti in cui saranno disponibili misure sperimentali. Si è osservato, ad esempio, che l'implementazione nel codice di calcolo della nuova correlazione di scambio termico convettivo per "bundles" ha avuto l'effetto positivo di determinare una leggera diminuzione della temperatura media dell'LBE nel circuito primario ed una sensibile diminuzione della temperatura massima della superficie delle barrette scaldanti, a causa del più elevato valore del coefficiente di scambio termico convettivo lato LBE rispetto alla vecchia correlazione

Nel caso del Test A con pressione dell'acqua in ingresso all'HX di 3 bar si è visto come non sia possibile asportare dal circuito primario tutta la potenza termica generata nella sezione scaldante. In pratica, una così bassa pressione dell'acqua in ingresso nell'HX implica una relativamente bassa portata nel circuito secondario con impossibilità di rimuovere tutto il calore generato.

I due transitori incidentali considerati hanno fornito indicazioni sulla velocità di salita della temperatura dell'LBE nelle varie regioni del circuito. Nel caso di incidente di perdita di iniezione di gas (ULOF) si è osservato che l'apparecchiatura è in grado di funzionare a piena potenza in regime di circolazione naturale senza che le temperature dell'LBE eccedano valori pericolosi per l'impianto. Nel caso di incidente di perdita del pozzo freddo (ULOHS) si è visto che le costanti di tempo coinvolte nella dinamica del transitorio consentono ai sistemi automatici o agli operatori di avere un margine sufficiente per intervenire in sicurezza, evitando che si abbiano danni all'apparecchiatura causati dalle elevate temperature raggiunte dall'LBE.

## Bibliografia

1. M. Tarantino, "Gas Enhanced Circulation Experiments on Heavy Liquid Metal pool System", ENEA-HS-F-R-001, 2007.
2. G. Benamati, C. Foletti, N. Forgiione, F. Oriolo, G. Scaddozzo, M. Tarantino, "Experimental Study on Gas-Injection Enhanced Circulation performed with the CIRCE Facility", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, pp. 768-777, 2007.
3. RELAP5/MOD 3.3 Code Manual, "NUREG/CR-5535/Rev 1-Vol. I-VIII", January 2002.
4. F. Bianchi, P. Meloni, F. Mattioda, G. Forasassi, G. Fruttuoso, F. Oriolo, S. Bocci, "Implementation and preliminary verification of the RELAP5/PARCS code for Pb-Bi cooled subcritical systems", AccApp '01 & ADTTA '01, Nuclear Application in the new Millennium, RENO (Nevada- USA), November 11-15, 2001.
5. "Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal- Hydraulics and Technologies", OECD 2007 / NEA No. 6195, Paris 2007.
6. Neil E. Todreas, Mujid S. Kazimi, "NUCLEAR SYSTEM I, Thermal Hydraulic Fundamentals", Taylor&Francis, New York, 1989.
7. W. Pfrang, D. Struwe, "Assessment of Correlations for Heat Transfer to the Coolant for Heavy Liquid Metal Cooled Core Designs", Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 7352, October 2007.
8. G. Bandini, P. Meloni, "W-DHR Testing in CIRCE Facility – RELAP5/MOD 3.3 Pre-Test Calculations", ENEA-FPN-P9LU-008, 2008.
9. Tesi di Laurea in Ingegneria della Sicurezza Industriale e Nucleare, "Analisi termoidraulica in supporto all'attività sperimentale ICE", Filippo Fiori, Università di Pisa, 2008.