



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Validazione su base sperimentale del codice RELAP5 mediante  
campagna di prove sperimentali su impianto HEFUS-3

*M. Utili, A. Del Nevo, M. Polidori*

Report RdS/2011/168

VALIDAZIONE SU BASE SPERIMENTALE DEL CODICE RELAP5 MEDIANTE CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI SU IMPIANTO HEFUS-3

M. Utili, A. Del Nevo, M. Polidori - ENEA

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

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

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS - LP3 - 019	L	1	26

**Titolo**

**Validazione su base sperimentale del codice RELAP5 mediante campagna di prove sperimentali su impianto HEFUS-3**

**Descrittori**

**Tipologia del documento:** Report

**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

**Argomenti trattati:** Reattori nucleari veloci,  
Reattori nucleari gas  
Sicurezza nucleare  
Termoidraulica

**Sommario**

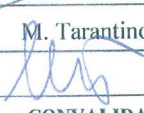
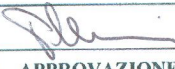
Presso il centro di ricerca ENEA Brasimone, nell'ambito dell'Accordo di Programma tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, è stata svolta un'attività sperimentale sull'impianto ad elio Hefus3 ai fini di validare il codice di calcolo RELAP5. Le attività sperimentali sono state condotte con portate fino a 900g/s a 70bar, in regime di refrigerazione isoterma e a lungo termine, incidente di LOFA (Loss of Flow Accidents) ed incidente di LOCA (Loss of Coolant Accidents). I set di dati generati sono stati impiegati per integrare i dati precedentemente acquisiti con range di portate fino a 0.35kg/s a 4MPa per la validazione dei codici T/H per l'analisi di reattori a gas ad alta temperatura mediante codice RELAP5.

**Note**


Autori: Marco Utili, Alessandro Del Nevo, Massimiliano Polidori

Copia n.

In carico a:


2			NOME			
			FIRM			
1			NOME			
			FIRM			
0	EMISSIONE	23/09/2011	NOME	M. Utili	M. Tarantino	P. Meloni
			FIRM			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE



 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	3	26

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>5</b>
<b>1. MATRICE DI PROVA</b>	<b>6</b>
<b>2. UPGRADE DELL’IMPIANTO SPERIMENTALE</b>	<b>7</b>
2.1 TURBOCIRCOLATORE K300	8
2.2 SCAMBIATORE HE/H2O	8
2.3 VALVOLE	9
<b>3. ANALISI DI POST TEST DEL TRASNITORIO HE-FUS3 CON IL CODICE RELAP5</b>	<b>9</b>
3.1 IL CODICE RELAP5	9
3.2 NODALIZZAZIONE RELAP5 DELL’APPARECCHIATURA HE-FUS3	10
3.3 MODIFICHE EFFETTUATE PER LA SIMULAZIONE	11
3.4 ANALISI DI POST TEST	11
<b>4. COMMENTI CONCLUSIVI</b>	<b>15</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>25</b>



 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	5	26

## INTRODUZIONE

Durante il primo anno dell'Accordo di Programma è stata svolta una campagna sperimentali sulla sezione di prova 7PIN [1], mediante l'impianto sperimentale He-Fus3, situato presso il Centro di Ricerca ENEA Brasimone, avente come obiettivo la realizzazione di transitori sperimentali significativi per la validazione dei codici T/H per l'analisi di reattori a gas ad alta temperatura e loro utilizzo ai fini di validare il codice RELAP5.

Tenendo conto degli scenari, delle condizioni di impianto significativi per il progetto e della sicurezza dei reattori a gas (GFR/VHTR), sono stati simulate nel primo anno dell'ADP condizioni stazionarie e transitori incidentali (start-up a step, 2 LOFA, 2 LOCA) che hanno permesso di individuare **le condizioni iniziali e al contorno ottimali** per la conduzione dei nuovi transitori sperimentali.

Inoltre, l'upgrade dell'impianto He-Fus3 ha consentito di simulare i transitori sperimentali (LOCA e LOFA) con una portata di elio fino a 1.0k/s a 70bar contro i 350g/s a 40bar delle precedenti prove, consentendo di incrementare il range di validazione del codice di calcolo RELAP5 e di estenderne la validazione ai nuovi componenti installati, nonché di migliorare la mappatura dei parametri fisici grazie ad una implementazione della strumentazione.

In queste nuove condizioni operative sono stati simulati i casi di arresto del sistema di circolazione dell'elio con una portata di 0.76 e 0.84kg/s e la perdita totale della porta dell'elio a causa della rottura di un componente. I risultati sperimentali sono stati utilizzati per l'implementazione del modello di calcolo ai fini di ampliare il database di validazione dei codici di calcolo e per l'analisi dei post-test.

## 1. MATRICE DI PROVA

Hefus3 consente di realizzare test sia in diverse condizioni di funzionamento del reattore, e sia in regime incidentali. Sulla base delle attività di modellizzazione precedentemente svolte nell'ambito del PAR2006-07 sono state selezionate e realizzate tre tipologie di test:

- 1) refrigerazione isoterma a lungo termine, “Steady state test”: finalizzato alla completa caratterizzazione del loop dopo l’upgrading
- 2) incidente di LOFA (Loss of Flow Accidents): finalizzato a fornire un set di dati per la caratterizzazione del codice in transitorio in caso di perdita del flusso di elio generato da un mal funzionamento del sistema di pompaggio
- 3) incidente di LOCA (Loss of Coolant Accidents): finalizzato a fornire un set di dati per la caratterizzazione del codice in transitorio in caso di perdita del flusso di elio generato da un mal funzionamento del sistema di pompaggio

I dati ottenuti in condizioni stazionarie alle differenti portate, velocità del turbocircolatore di Hefus3, potenza termica e pressione hanno consentito di stimare sperimentalmente la perdita di potenza termica, l’afficienza dell’economizzatore, e le prestazioni del nuovo TurboCircolatore (TC).

In tabella 1 è riportata la matrice di prova delle attività sperimentali condotte.

Prova.n.	Test	Portata He [kg/s]	Pressione He [MPa]	Potenza termica fornita [kW]	Note
1	Steady state	0.442	6.4	140	Caratterizzazione economizzatore
2	Steady state	0.442	6.4	210	Caratterizzazione TC - economizzatore
3	Steady state	0.760	6.4	210	Caratterizzazione TC
4	LOFA	0.760	6.4	210	Prova di LOFA con riavvio immediato del TC (100s)
5	Stady state	0.560	6.4	210	Caratterizzazione TC - economizzatore
6	Stady state	0.560	7.4	210	Caratterizzazione TC - economizzatore
7	LOFA	0.840	7.4	210	Prova di LOFA con fermo TC (~900s)
8	LOCA	0.840	7.1	210	

Tab. 1 – Matrice di prova.

L’esperimento, avente una durata complessiva di circa 35000s, è suddiviso in tre fasi:

1. Fase 1 - **test n.1÷4**: da 0s a 13800s – dall’inizio del transitorio a quando il compressore viene arrestato;
2. Fase 2 - **test n.5÷7**: da 13800s a 30800s – (simile alla prima) dal riavvio del compressore fino al successivo arresto;



3. Fase 3 - **test n.8**: da 30800s a 35430s – dalla partenza del compressore, al raggiungimento del nuovo stato stazionario e, infine alla conclusiva fase di depressurizzazione.

I due LOFA sono finalizzati alla caratterizzazione del codice RELAP5 e dell'economizzatore in condizioni accidentali di arresto del TC e di ripristino sia in tempi brevi (100s circa), e sia in caso di arresto prolungato (900s circa).

## 2. UPGRADE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE

HE-Fus3, rappresenta la facility di riferimento europeo per le attività di sperimentazione e di qualifica in elio di sistemi e componenti del reattore a fissione VHTR/GFR. Hefus3 è un impianto ad elio con configurazione a otto, costituito da una zona fredda che ospita il compressore e da una zona calda in cui è alloggiata la sezione di prova, figura 1. Le due zone si incrociano in corrispondenza di uno scambiatore-economizzatore. Nel 2010 è stata realizzato l'upgrade dell'impianto ai fini di condurre test di caratterizzazione con portate di elio fino a 1.40kg/s a 80bar [2]. In tabella 2 sono riportate le caratteristiche dell'impianto.

<b>He-FUS3</b>	
Fluido di processo	He
Temperatura di progetto	530°C
Pressione di progetto	8MPa
Massima portata in massa He	1.4kg/s
Max capacità rimozione del calore	1.3 MW
Massima Potenza scaldante	210kW + 750kW

*Tab. 2 – Caratteristiche impianto.*

Ai fini di realizzare le condizioni di portata e pressione indicate in tabella 2 sono stati modificati/sostituiti, rispetto alla precedente configurazione riportata in Ref. [2], i seguenti componenti:

- Turbocircolatore (TC), denominato k300
- Scambiatore elio/acqua
- Valvole intercettazione scambiatore He/H<sub>2</sub>O e TC.
- Upgrade delle tubazioni ramo caldo
- Sostituzioen della strumentazioen di misura portata e pressione

## 2.1 Turbocircolatore K300

Il nuovo compressore, visibile in figura 2, è un trubo circolatore centrifugo ad un stadio guidato in rotazione da un motore ascincorno trifase ad alta velocità, 40000rpm. Il Turbo Circolatore (TC) presenta un albero con una singola girante ad un stadio, con motore elettrico immerso in elio alla pressione di esercizio all'interno di un vessel chiuso mediante due flangie smontabili, figura 2. L'albero del motore elettrico è supportato in rotazione da un sistema di cuscinetti magnetici, figura 3. Un bypass interno al TC garantisce la corretta portata di ricircolo per il sistema girante/cuscinetti magnetici. Il sistema di controllo del TC oltre a gestire la portata di ricircolo del bypass interno controlla anche la portata del bypass freddo dell'impianto Hefus3 ai fini di garantirne il punto ottimale di funzionamento in termini di rapporto di compressione, forza assiale applicata alla girante e distanze tra girante e sistema di supporto.

In tabella 3 sono riportate le caratteristiche del TC, mentre in figura 4 è riportata la curva caratteristica di funzionamento del TC – K300 nell'impianto Hefus3.

Requirement	Unit	TBM	TDM
Minimum He mass flow rate	kg/s	0.2	
Maximum He mass flow rate	kg/s	1.40	1.00
Inlet He temperature	K	323.15	
Inlet He pressure	MPa	7.28	8.80
Outlet He Pressure	MPa	8.21	10.14
Compression ratio	-	1.128	1.152
Design temperature for motor/vessel	°C	150	
Design pressure for vessel	MPa	10.50	
Maximum He leak rate at 10 MPa	Pa m <sup>3</sup> /s	1 x 10 <sup>-6</sup>	


Tab. 3 – Caratteristiche TurboCircolatore K300.

## 2.2 Scambiatore He/H2O

In tabella 4 sono riportate le caratteristiche del nuovo scambiatore a mantello elio acqua posizionato all'ingresso del TC – K300 subito dopo il filtro dell'eleio ed l'air cooler, figura 1 e 5.

<b>Potenza termica massima asportabile</b>	900	kW
<b>Superficie totale trasferimento di calore</b>	16.85	m <sup>2</sup>
<b>Conducibilità termica (lato mantello)</b>	3216.43	W/m <sup>2</sup> K
<b>Conducibilità termica (lato tubi)</b>	1670.50	W/m <sup>2</sup> K
<b>Perdita di carico (lato tubi)</b>	0.013	MPa

Tab. 4 – Caratteristiche scambiatore elio/acqua.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	9	26

## 2.3 Valvole

Sono state inserite due valvole elettropneumatiche, FV300 e FV301, da 3” posizionate all’ingresso ed all’uscita del TC ai fini di escluderlo dall’impianto in caso di rottura di una tubazione e/o componente, figura 6.

## 3. ANALISI DI POST TEST DEL TRASNITORIO HE-FUS3 CON IL CODICE RELAP5

### 3.1 Il codice RELAP5

RELAP5 [3] è un codice termoidraulico di sistema sviluppato a Idaho National Laboratory (INL) per l’ente regolatore USA (US Nuclear Regulatory Commission) ed estensivamente validato per i reattori ad acqua leggera. Tale codice, altamente flessibile ha la capacità di trattare fluidi di diverso tipo (DO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Lb, LBE, Ar, He, etc.).


Il codice è basato su un modello sei equazioni non omogeneo e non equilibrio per i sistemi bifase, risolto da un metodo numerico semi implicito per l’analisi di transitorio. L’obiettivo dello sviluppo di RELAP5 è quello avere un codice capace di fornire un’accurata predizione dei transitori a livello di sistema, e di effettuare analisi parametriche e di sensitività.

Il codice è di tipo “object oriented” ossia, include modelli di componenti di tipo generico che consentono la simulazione di un impianto, ad esempio: pompe, valvole, cinetica neutronica puntuale, riscaldatori elettrici, pompe a getto, turbine, accumulatori, separatori sistemi di controllo, ecc.

Sono disponibili per la simulazione di fenomeni complessi, specifici modelli, generalmente, di tipo empirico. Questi sono utilizzati per calcolare condizioni di flusso bloccato, di ribagnamento di parete in crisi termica, flussi in controcorrente, trasporto di boro, trasporto di incondensabili, ecc...

Il codice consente un efficiente verifica dell’input, tramite la quale l’utente può controllare e verificare gli errori commessi nello sviluppo della nodalizzazione. L’input ha un formato libero, consente l’opzione di “restart” tramite la quale si può arrestare e riavviare il calcolo modificando la geometria del sistema, aggiungere e cancellare componenti, cambiare le opzioni del codice e le logiche di controllo.

Lo sviluppo dei modelli implementati nell’attuale versione del codice RELAP5 (Mod3) sono il risultato di 30 anni di ricerca e sviluppo che hanno riguardato, tra l’altro, anche estensive campagne sperimentali in apparecchiature ad effetto separato e integrali. RELAP5 è la sintesi dell’esperienza accumulata attraverso un lungo processo di validazione effettuato confrontando i risultati del codice con i dati sperimentali ottenuti nelle apparecchiature sperimentali quali LOFT, PBF, Semiscale, ACRR, NRU, etc...

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	10	26

Un'estensione della versione RELAP5/Mod3.1, nominata ATHENA/Mod1, fu sviluppata da INL per le analisi dei transitori termoidraulici del sistema di refrigerazione di ITER Tokamak. La principale peculiarità di ATHENA era la capacità di rappresentare una grande varietà di fluidi per mezzo di equazioni di stato generalizzate. Per esempio, in ATHENA furono implementate le proprietà di acqua, elio, idrogeno, azoto, potassio, sodio, litio. Lo sviluppo di ATHENA fu arrestato con la versione RELAP5/Mod3.2, in quanto in essa erano state inglobate gran parte delle sue caratteristiche.

ENEA, verso la fine degli anni '90, iniziò attività di validazione indipendente del codice ATHENA/Mod1, grazie ai dati del circuito ad elio (HEFUS3) realizzato presso il centro ricerca del Brasimone.

### ***3.2 Nodalizzazione RELAP5 dell'apparecchiatura He-Fus3***

La nodalizzazione RELAP5 dell'apparecchiatura sperimentale He-Fus3 (vedi Fig. 7) include tutte le parti dell'impianto rilevanti per la simulazione degli esperimenti: tubazioni, strutture termiche passive, riscaldatori, sezione di prova (semplificata), valvole, compressore. Ogni componente è stato modellato attraverso l'uso di componenti generici quali: "pipe", "branch", "valve", "pump", "single junction", "heat structure" [6].


La parte idraulica della nodalizzazione, visualizzata attraverso l'interfaccia grafica SNAP in Fig. 1, ha 255 nodi e 258 giunzioni. Le strutture termiche associate (attive e passive) sono 329, per un totale di 4103 punti "mesh".

La nodalizzazione è stata sviluppata secondo le indicazioni fornite nel manuale del codice [3], oltretutto sulla base dell'esperienza accumulata nell'ambito delle attività di validazione svolte a ENEA sul sistema He-Fus3 (vedi Refs. [4], [5], [6] e [10]). Le principali regole adottate per lo sviluppo del modello numerico sono le seguenti:

- l'intero circuito è modellato allo scopo di valutare le capacità del codice di simularne il funzionamento dinamico;
- l'economizzatore e i riscaldatori sono modellati esplicitamente al fine di verificare la simulazione dello scambio termico in questi componenti;
- la sezione di prova è simulata implicitamente preservando il bilancio energetico e le cadute di pressione;
- le strutture termiche passive sono modellate in dettaglio al fine di tener conto in modo corretto dell'inerzia termica del circuito e delle perdite termiche con l'ambiente.

La nodalizzazione ha, inoltre, le seguenti caratteristiche:

- le lunghezze dei volumi idraulici sono in generale tra 0.2 e 0.5 m, allo scopo di raggiungere un buon compromesso tra il tempo di calcolo necessario per la simulazione, limitare il numero di volumi di controllo e riuscire a modellare in modo corretto la geometria e le caratteristiche reali del sistema;
- la dimensione delle "mesh" usate per la conduzione nelle strutture termiche è approssimativamente 10mm;
- le opzioni non equilibrio, "smooth area change" sono usate alle giunzioni;

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	11	26

- i modelli di stratificazione termica e di portata critica sono generalmente attivi.

La descrizione dettagliata della nodalizzazione, delle assunzioni e delle scelte modellistiche effettuate sono disponibili in dettaglio in Ref. [7].

### ***3.3 Modifiche effettuate per la simulazione***

L'attuale configurazione dell'apparecchiatura sperimentale He-Fus3 è stata modellata partendo dalla nodalizzazione descritta al paragrafo 3.2 e apportando le opportune modifiche al fine di tenere in considerazione l'attuale geometria e le caratteristiche del sistema.

La parte di nodalizzazione che riguardava la sezione di prova (simulava la configurazione 7 pin [8]) è stata sostituita con un modello semplificato del dispositivo Hets [12]. Vista la geometria di tale dispositivo, non rappresentabile in dettaglio con un codice di sistema, si è optato per modellarlo come un volume idraulico al quale viene imposta (direttamente al fluido) la potenza asportata dal fluido. Le perdite di carico della sezione di prova sono state simulate con una perdita di carico concentrata equivalente. Le linee di connessione alla sezione di prova sono state modellate in modo semplificato, tenendo in considerazione l'attuale geometria del sistema, e preservando il volume idraulico complessivo, la lunghezza della pipeline, la superficie esterna e l'elevazione complessiva.

Nella parte fredda del circuito è stata cancellata dal modello la parte di nodalizzazione che va dalla valvola a monte del compressore k200 (vecchio compressore) fino all'attacco al serbatoio di espansione v205 (come riportato in Fig. 1).

È stata inoltre modellata la nuova linea nella quale è installato il nuovo compressore k300 che si connette alla linea fredda diretta verso l'economizzatore, a valle del serbatoio di espansione. Il compressore è simulato attraverso il componente RELAP5 pompa. Il serbatoio di espansione, non più interessato dal flusso principale, è stato modificato: l'altezza è stata incrementata (a circa 6.6.m) in accordo con Ref. [8].

Infine, la nodalizzazione è stata completata modellando la linea che va dal serbatoio di espansione alla valvola sulla linea utilizzata per tirare il vuoto durante la fase di condizionamento dell'impianto, prima di poterlo riempire con elio. Tale linea è infatti usata per la depressurizzazione consentendo la fuoriuscita dell'elio dall'impianto (Fig. 1).

### ***3.4 Analisi di post test***

Un'analisi di post test si è effettuata per valutare le capacità del codice di predire i fenomeni di interesse ed è un processo che si basa su diverse fasi (vedi Ref. [11]).

Una prima fase è quella di messa a punto del modello numerico sulla base 1) della configurazione geometrica del sistema da simulare, 2) delle condizioni iniziali e al contorno da implementare, ed, infine, 3) della sequenza degli eventi da imporre (vedi paragrafo 3.4.1).

Una seconda fase è quella del raggiungimento dello stato stazionario, ovvero si dimostra che il calcolo al tempo “zero”, predice i principali parametri sperimentali (o di impianto) correttamente e senza variazioni (o oscillazioni) rilevanti (paragrafo 3.4.2).

La terza fase consiste nella valutazione delle capacità del codice di simulare il transitorio. La valutazione avviene attraverso un confronto qualitativo e, se possibile, quantitativo dei principali parametri (di cui è disponibile la misura sperimentale) che descrivono i fenomeni e i processi oggetto della simulazione (vedi paragrafo 3.4.3). Il calcolo di riferimento dell’analisi di post test, oggetto di questa fase, non è quello che fornisce i “migliori” risultati del codice. Il calcolo di riferimento è quello in cui le condizioni iniziali e al contorno sono consistenti con i dati dell’esperimento all’interno dell’ampiezza dei margini di incertezza, ed in cui il codice e la nodalizzazione sono rispettivamente, sviluppati e utilizzati in modo coerente con le analisi di analoghi sistemi.

Un’ultima fase (non affrontata nella presente analisi) consiste nell’analisi di sensitività. Tale analisi si prefigge di verificare, da un lato la robustezza dei risultati del codice, di valutare la rilevanza che alcuni parametri e scelte dell’utilizzatore hanno sui risultati e infine di verificare la coerenza e precisione dei dati sperimentali, quindi favorendo un processo virtuoso attraverso il quale si dimostra la qualità dei dati sperimentali e se ne completa le informazioni favorendone l’interpretazione e la comprensione.

### ***3.4.1 Messa a punto del calcolo***

Per effettuare la simulazione del transitorio He-Fus3 il calcolo è stato messo a punto implementando le seguenti condizioni al contorno ed effettuando le seguenti assunzioni.

1. La pressione è stata imposta in accordo con i dati sperimentali all’inizio della fase di stazionario attraverso l’inizializzazione dei componenti RELAP5. Nessuna regolazione è stata implementata per controllare la pressione del sistema durante il transitorio. All’istante 32581s la valvola di depressurizzazione FV9 (Fig. 1) è aperta per effettuare la depressurizzazione.
2. La portata complessiva che evolve attraverso il compressore è imposta durante tutto il transitorio in accordo con i dati sperimentali.
3. La portata che attraversa l’economizzatore e i tre riscaldatori dipende dalle portate attraverso i bypass. I primi due bypass ricircolano parte della portata del compressore dalla linea fredda diretta verso l’economizzatore, verso la linea fredda a monte dell’aeroterma. Il terzo bypass, preleva parte della portata diretta all’ingresso della zona scaldata e la inietta nuovamente (fredda) sulla linea calda tra l’ultimo riscaldatore e la sezione di prova. La simulazione delle linee di bypass richiede la conoscenza della caratteristica delle valvole operate, oltreché una perfetta modellazione delle perdite di carico delle linee (o in alternativa i valori della portata).
4. La potenza dei riscaldatori elettrici è stata ricostruita sulla base delle informazioni ricevute (Ref. [9]), e valutata sulla base del salto termico misurato sperimentalmente attraverso ciascun riscaldatore.
5. La potenza attraverso la sezione di prova è stata imposta basandosi su Ref. [9]. Va tuttavia considerato che la potenza rilasciata dal dispositivo Hets al fluido è dell’ordine di pochi kW e rappresenta una percentuale inferiore al 4% della potenza complessiva fornita al circuito (quando gli “heaters” sono funzionanti a piena

potenza). Essa è calcolata come la rimossa dal fluido, valutata sulla base del salto termico dell'elio attraverso il dispositivo.

6. L'opzione "restart" è stata utilizzata durante il transitorio per poter ricalibrare le condizioni al contorno (partendo dallo stato dell'impianto al time step precedente).

### 3.4.2 Stato stazionario

Lo stato stazionario è stato impostato a 1000s, di "null transient". Questo significa che il codice calcola con l'opzione "transient", per raggiungere uno stato stazionario di equilibrio del sistema, coerente con quello dell'esperimento da simulare. I principali parametri predetti al termine dello stato stazionario sono confrontati con i dati sperimentali misurati dal sistema di acquisizione di He-Fus3 il 15/07/2011 alle ore 8.00 am (vedi Tab. 5). Questi istanti rappresentano nella descrizione del transitorio (paragrafo 3.4.3) e nelle figure sotto il tempo 0s.

L'analisi dei dati in Tab. 5 consente di concludere quanto segue:


- i valori iniziali dei parametri sono giudicati accettabili;
- tali valori sono raggiunti in modo stabile, ossia non ci sono variazioni sensibili (<1%) di tali parametri durante gli ultimi 100s del calcolo;
- il calcolo dei salti termici attraverso i riscaldatori, coerentemente con gli altri risultati in Tab. 5, consente di concludere che i valori imposti della potenza dei riscaldatori è corretta;
- la temperatura in uscita dalla sezione di prova risulta inferiore al dato sperimentale indica che la portata attraverso il bypass dei riscaldatori è leggermente superiore a quanto dovrebbe circolare nell'apparecchiatura sperimentale.

#	QUANTITY (*)	UNIT	EXP	R5	Er.	Note
<b>1</b>	<b>POTENZA CIRCUITO <sup>(1)</sup></b>					
1-1	Riscaldatore I – (--)	kW	--	0	--	
1-2	Riscaldatore II – (--)	kW	--	70	--	
1-3	Riscaldatore III – (--)	kW	--	70	--	
<b>2</b>	<b>ABSOLUTE PRESSURE</b>					
2-1	Tanca di espansione – (PT206)	MPa	6.4	6.4	0.0 %	
<b>3</b>	<b>TEMPERATURA DEL FLUIDO</b>					
3-1	Ingresso economizzatore (lato mantello) – (TT215)	°C	45	46	1 °C	
3-2	Ingresso riscaldatore I – (TT216)	°C	339	345	6 °C	
3-3	Ingresso riscaldatore II – (TT221)	°C	337	343	6 °C	
3-4	Ingresso riscaldatore III – (TT297)	°C	396	397	1 °C	
3-5	Uscita riscaldatore III – (TT236)	°C	451	450	-1 °C	
3-6	Uscita sezione di prova – (TT233)	°C	442	431	-11 °C	
3-7	Uscita economizzatore (lato tubi) – (TT218)	°C	134	136	2 °C	
<b>4</b>	<b>DIFFERENZA TEMPERATURA <sup>(2)</sup></b>					
4-1	Riscaldatore I – (--)	°C	-2	-2	0 °C	
4-2	Riscaldatore II – (--)	°C	59	54	-5 °C	
4-3	Riscaldatore III – (--)	°C	55	53	-2 °C	
<b>5</b>	<b>PORTATA</b>					
5-1	Uscita dal compressore – (FT300)	kg/s	0,442	0,442	0.0 %	

- (1) Dato sperimentale calcolato sulla base della differenza di temperatura del fluido tra ingresso e uscita della zona scaldata elettricamente

- (2) Rilevante per il calcolo della potenza dei sistemi riscaldatori.

Tab. 5 – Stato stazionario: confronto tra i dati sperimentali e i risultati RELAP5.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	14	26

### 3.4.3 Analisi del transitorio

La simulazione di tutto l'esperimento (35430s) ha richiesto circa 82000s di tempo di calcolo. Il confronto tra i risultati del codice e i dati sperimentali disponibili sono riportati da Fig. 8 a Fig. 19.

#### Fase 1

Dopo i 1000s di stazionario, il transitorio inizia con il primo riscaldatore E219-1 a potenza zero e gli altri due riscaldatori (E219-2 e E219-3) a 70 kW. Raggiunti i 5500s, la potenza del primo riscaldatore è portata linearmente a 70kW in 500s e tenuta costante fino al termine della fase 1. La portata di elio (Fig. 8) è mantenuta costante a 0.442kg/s fino a circa 5700s. Durante questo periodo, le temperature lungo il circuito sono ben calcolate dal codice. La principale differenza si osserva nella temperatura a valle della sezione di prova dove il codice predice una temperatura di circa 10°C inferiore al dato misurato dalla termocoppia dell'impianto. Tale differenza è imputabile ad un eccesso di portata che fluisce attraverso il bypass degli "heaters" (nel calcolo circa il 2% della portata complessiva) imposta attraverso il settaggio della valvola FV234 (vedi Fig. 1), corrispondente al componente RELAP5 CV 172 in Fig. 7.

A 5700s, la portata attraverso il compressore è aumentata fino a circa 0.76kg/s ed è mantenuta costante fino al termine della fase 1, quando il compressore viene arrestato. Le temperature attraverso il circuito mostrano una differenza rispetto ai dati sperimentali più marcata. L'errore di temperatura all'ingresso del primo riscaldatore è di circa -15 °C ed aumenta fino a circa -30 °C all'uscita del terzo riscaldatore. L'aumento dell'errore nel passaggio attraverso i riscaldatori è causato da un eccesso di portata che fluisce attraverso i riscaldatori, dovuto a una modifica dell'apertura delle valvole di bypass nell'esperimento, causata dal sistema di controllo automatico della portata del turbocircolatore, tramite la valvola FV235, ai fini di ottimizzare il carico assiale sulla girante. Al contrario, la differenza di temperatura calcolata all'ingresso del primo riscaldatore è dovuta principalmente allo scambio termico attraverso l'economizzatore è inferiore nel calcolo rispetto a quanto osservato nell'esperimento, come mostrato dal minor salto termico osservabile dal confronto di Fig. 15 e Fig. 16. La fase 1 si conclude con l'arresto del compressore.


#### Fase 2

La fase 2 inizia con il riavvio del compressore. La potenza scambiata attraverso l'economizzatore e il primo riscaldatore risulta sovrastimata. A circa 16100s, la valvola di bypass di ricircolo dalla linea fredda di mandata alla linea diretta verso l'aeroterma è parzialmente chiusa nella simulazione, per consentire una maggiore portata verso l'economizzatore, mentre la valvola di bypass dei riscaldatori è aperta in modo da aumentarne l'area di un 2%. A circa 19000s, quando il sistema è quasi stabilizzato le temperature predette dal codice risultano sovrastimate da un massimo tra i 20-25 °C all'ingresso dei riscaldatori per poi ridursi a valle della sezione di prova. Tali differenze permangono per la restante parte della fase 2 durante la quale solo la portata che fluisce attraverso il compressore viene fatta variare (Fig. 8). La fase 2 si conclude con l'arresto del compressore. Il differente andamento della temperatura osservato al momento dell'arresto del compressore è da imputare all'arresto della potenza imposto nel calcolo RELAP5 in concomitanza con l'arresto della porta.

#### Fase 3

La terza fase riguarda la fase di depressurizzazione rapida, da 71bar a 0bar relativi in circa 160s, dovuta all'apertura della valvola FV 9 (vedi Fig. 1). Il calcolo RELAP5 è stato



 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	15	26

effettuato attivando il modello di portata critica Henry Fauske sulla giunzione della valvola. Il confronto con i dati sperimentali (vedi Fig. 10) mostra un maggiore velocità di depressurizzazione nel calcolo.

#### 4. COMMENTI CONCLUSIVI

L'analisi dei risultati ha il principale scopo di validare le capacità del codice RELAP5 nel predire l'esperimento effettuato nell'apparecchiatura He-Fus3. I principali fenomeni e processi osservabili nell'esperimento e potenzialmente rilevanti per la validazione di codici di sistema sono: lo scambio termico (convezione e conduzione) nell'economizzatore, nei riscaldatori elettrici, e nella sezione di prova (Hets), (potenzialmente) la crisi termica, le perdite di carico attraverso valvole, il funzionamento del compressore, la portata critica, le perdite termiche con l'ambiente, e la stratificazione termica (principalmente, nella tanca di espansione). Stante le scelte effettuate nello sviluppo della nodalizzazione e, soprattutto, nella messa a punto del transitorio, oltre che la disponibilità dei dati sperimentali, la simulazione si è focalizzata sui fenomeni di scambio termico e sulla simulazione della portata critica.

L'analisi qualitativa dei risultati mostra una soddisfacente capacità del codice RELAP5 di simulare tali fenomeni nel range di portata 0.442 e 0.84kg/s e di pressioni 6 e 7.1MPa, e soprattutto il comportamento dell'apparecchiatura He-Fus3 a livello di sistema. Tali risultati vanno ad integrare il database già sviluppato nelle attività svolte nei precedenti PAR andando a costituire un set di dati per la validazione del codice RELAP5 per reattori termici a Gas sufficientemente ampio per coprire le diverse casistiche.

La disponibilità di un più esteso set di misure sperimentali atta a migliorare la conoscenza delle condizioni al contorno del sistema oggetto della simulazione, oltreché la caratterizzazione dei fenomeni rappresentati dall'apparecchiatura durante esperimento consentirebbe di effettuare una quantificazione dell'accuratezza dei modelli coinvolti nella simulazione della simulazione.



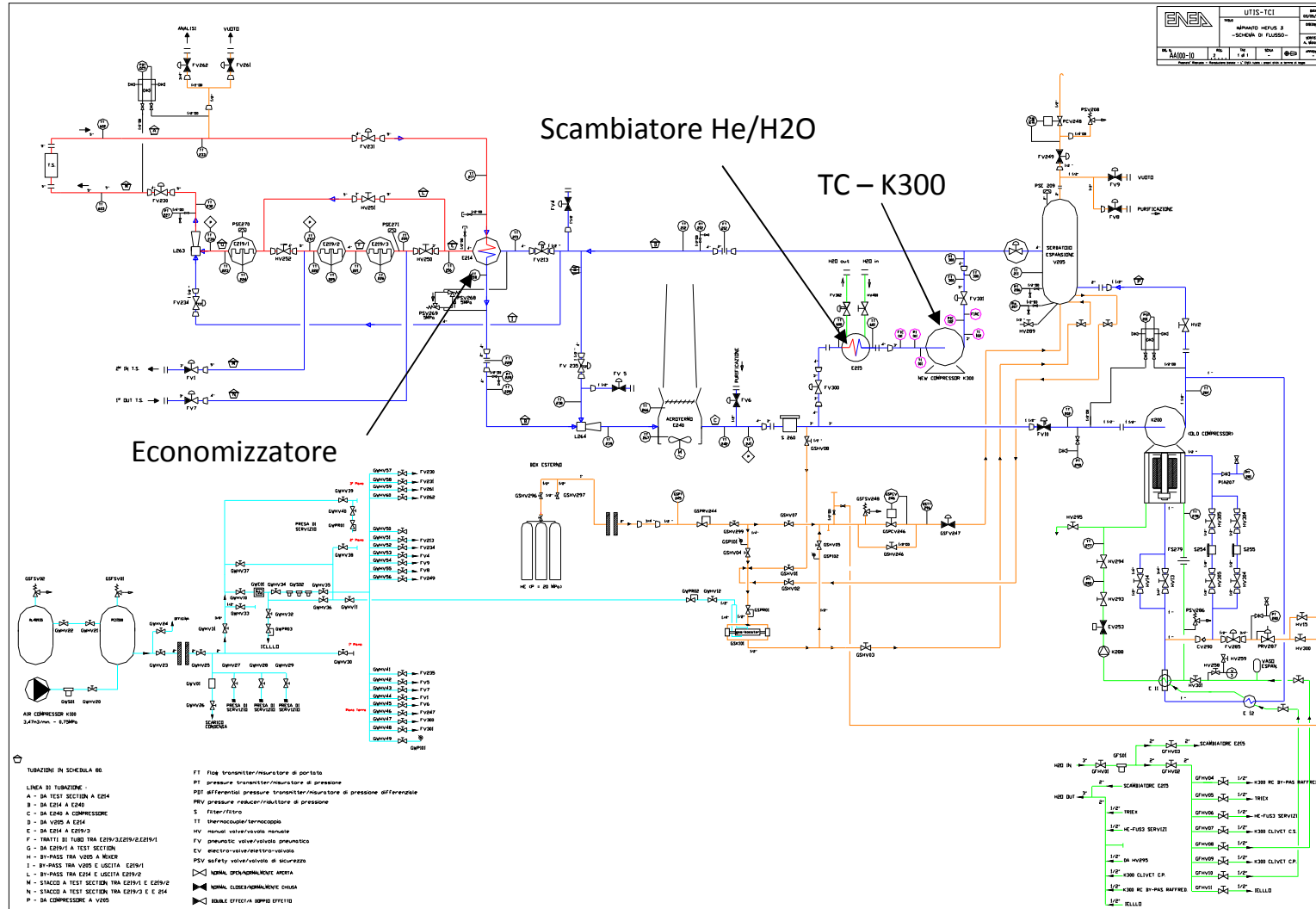


Fig. 1 – P&I dell'apparecchiatura sperimentale Hefus3.

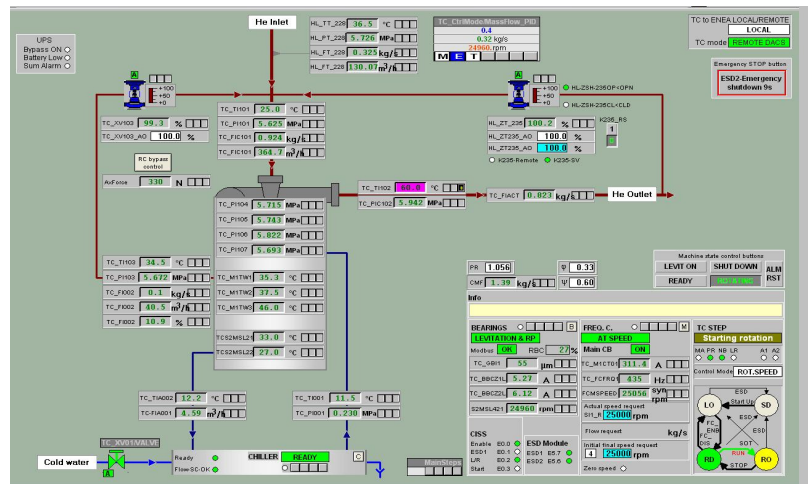
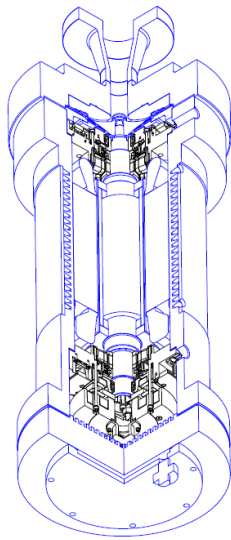


Fig. 2 – Vista in sezione del TurboCircolatore K300.



Fig. 3 – Cuscinetti magnetici e girante con diffusore del TurboCircolatore K300.

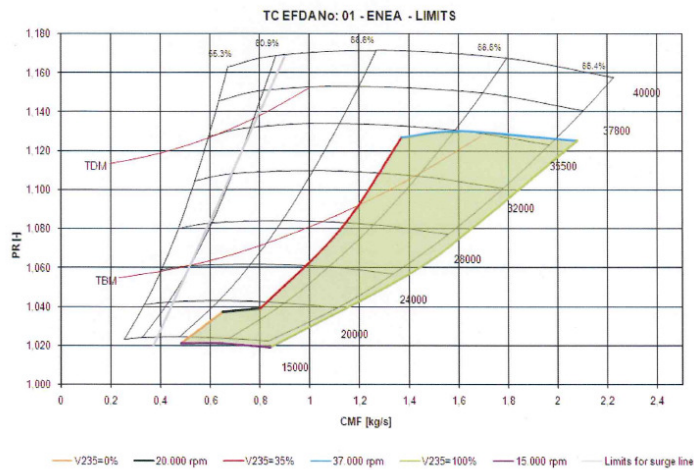
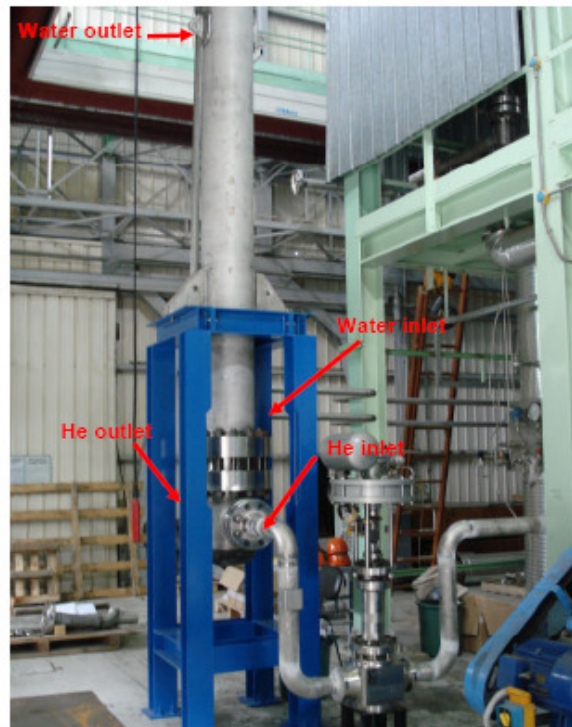


Fig. 5– Layout TurboCircolatore K300 e relativa caratteristica d’impianto.



*Fig. 5 – Immagine dello scambiatore elio/acqua.*



*Fig. 6 – Valvole elettropneumatiche .*

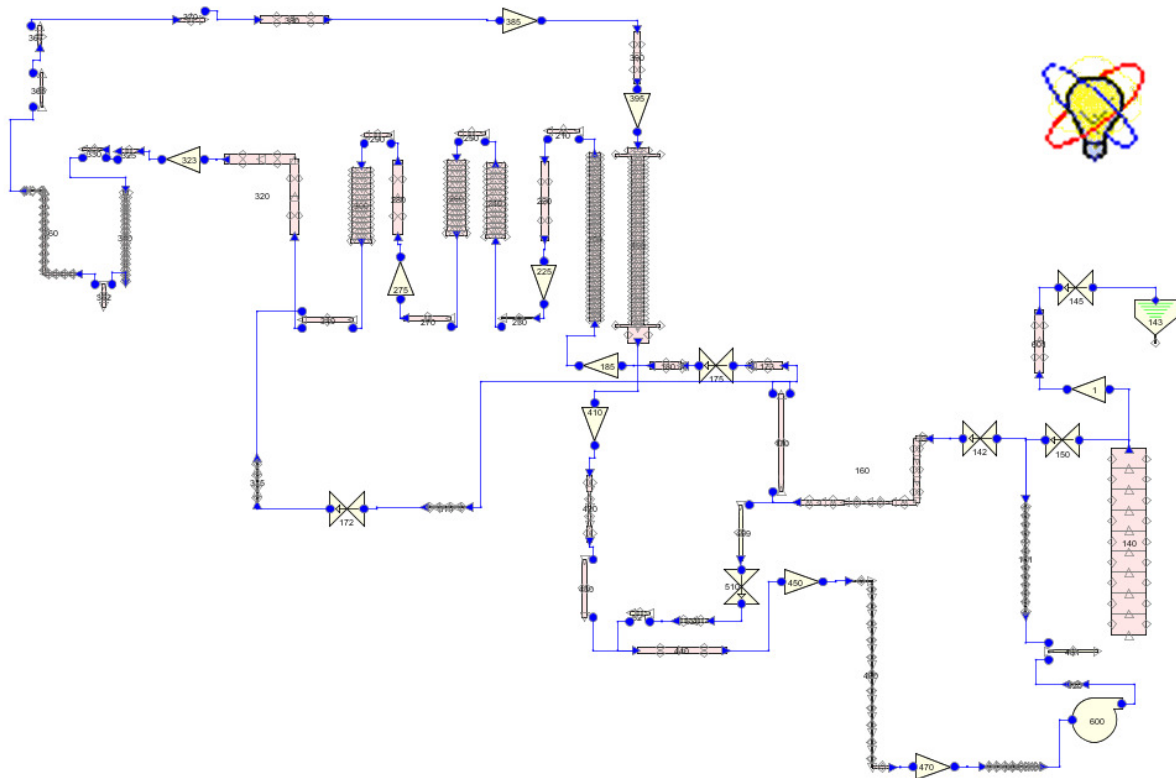


Fig. 7 – Schema complessivo della nodalizzazione RELAP5 dell'apparecchiatura sperimentale Hefus3: rappresentazione della GUI SNAP .

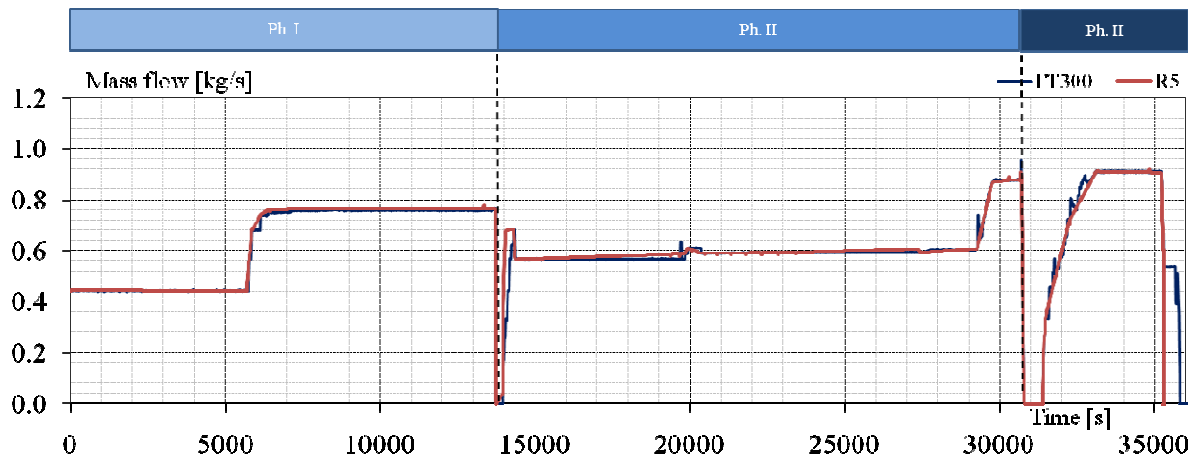


Fig. 8 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: portata complessiva.

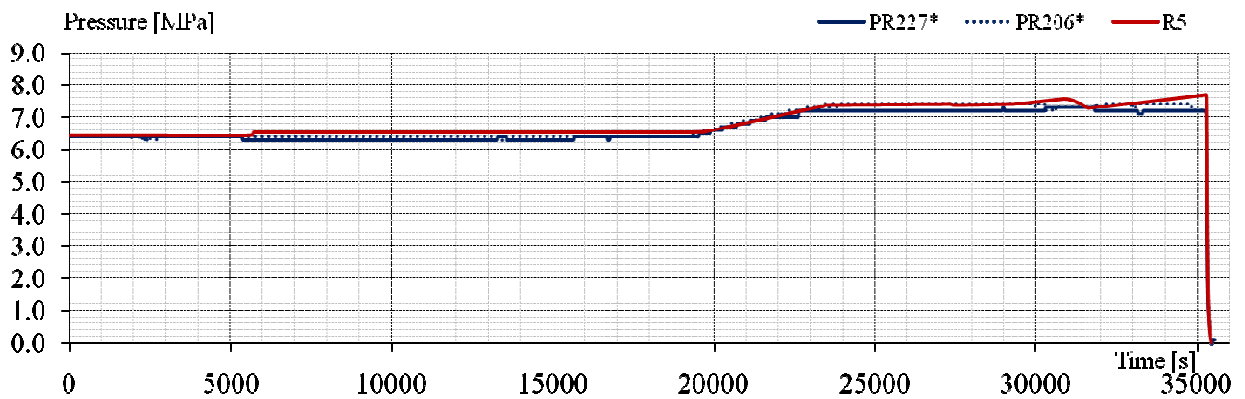


Fig. 9 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: pressione circuito.

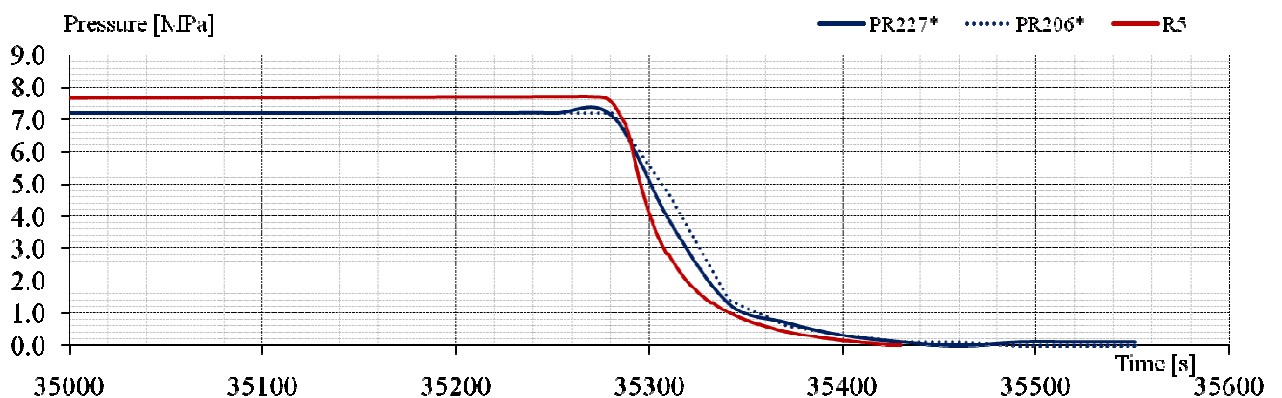


Fig. 10 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: pressione circuito (fase di depressurizzazione rapida).

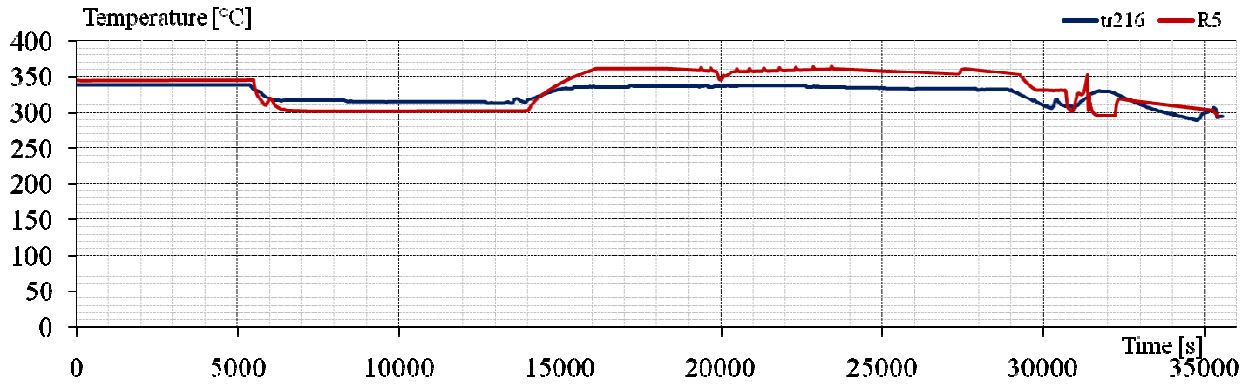


Fig. 11 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: temperatura in ingresso al I riscaldatore (TR216).

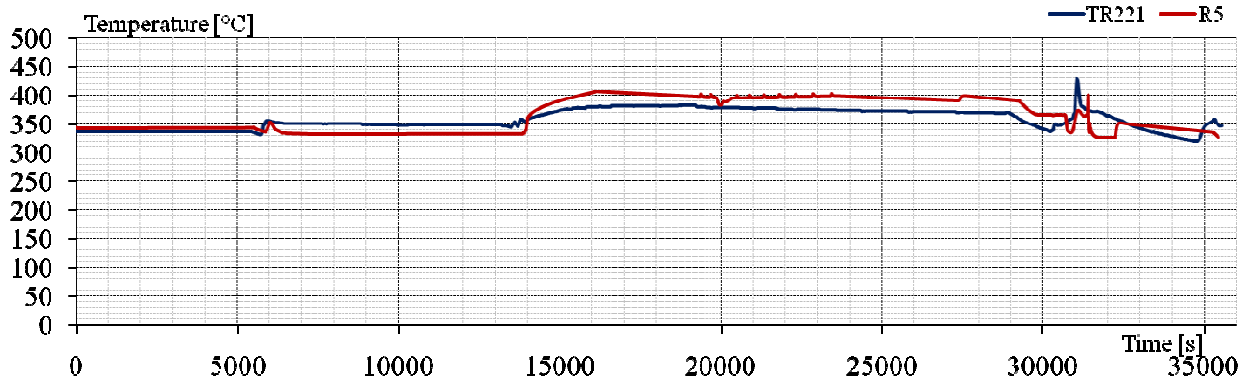


Fig. 12 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: temperatura in ingresso al II riscaldatore (TR221).

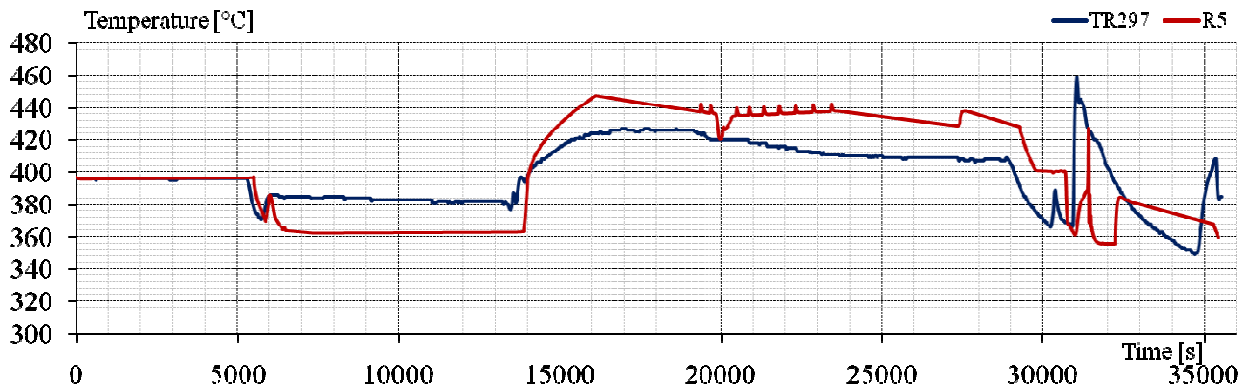


Fig. 13 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: temperatura in ingresso al III riscaldatore (TR297).



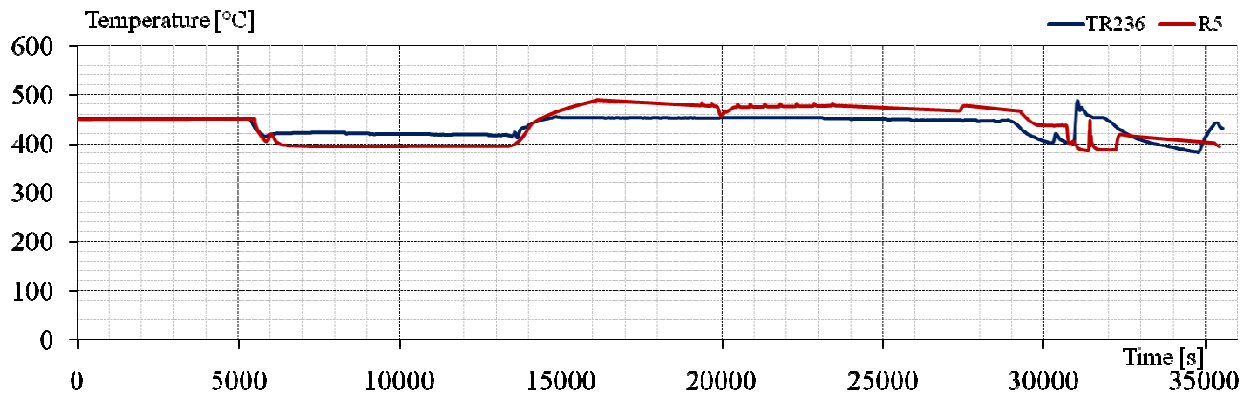


Fig. 14 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: temperatura in uscita dal III riscaldatore (TR236).

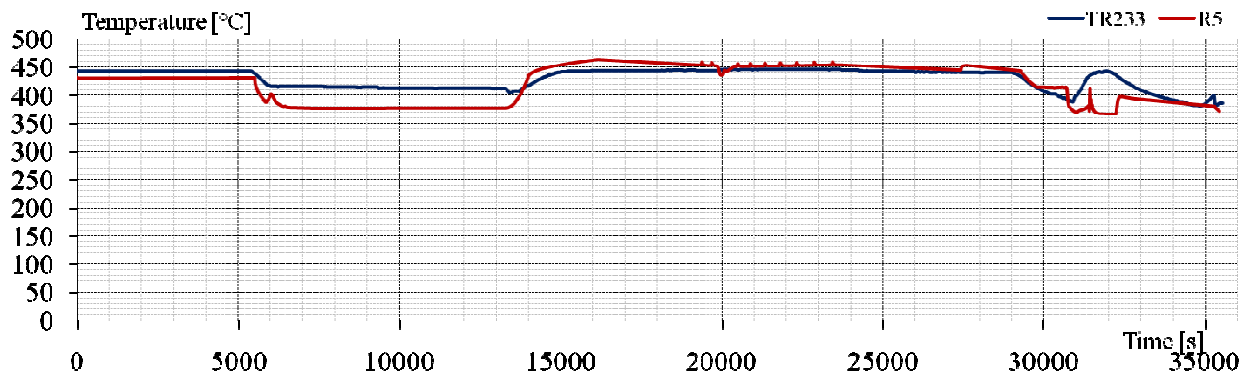


Fig. 25 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: temperatura in uscita dalla sezione di prova (TR233).

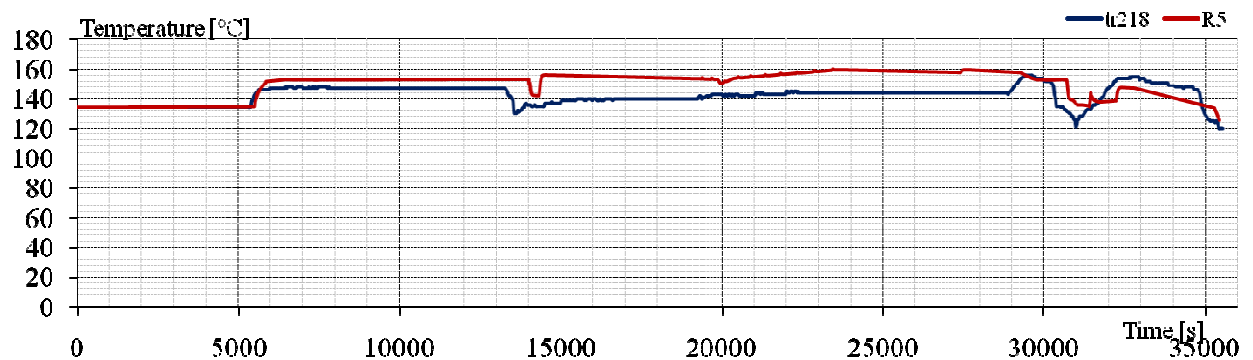


Fig. 36 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: temperatura in uscita dall'economizzatore lato tubi (TR218).

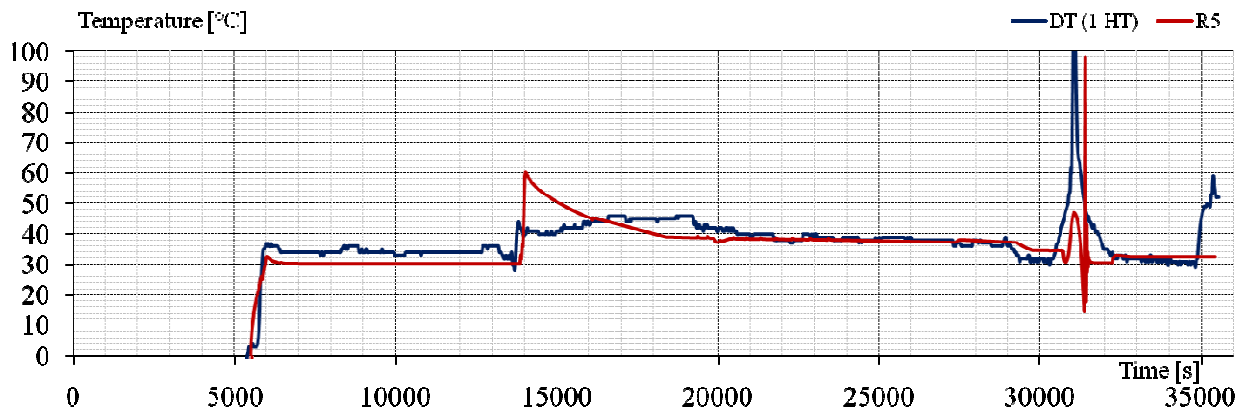


Fig. 47 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: salto termico attraverso il I riscaldatore.

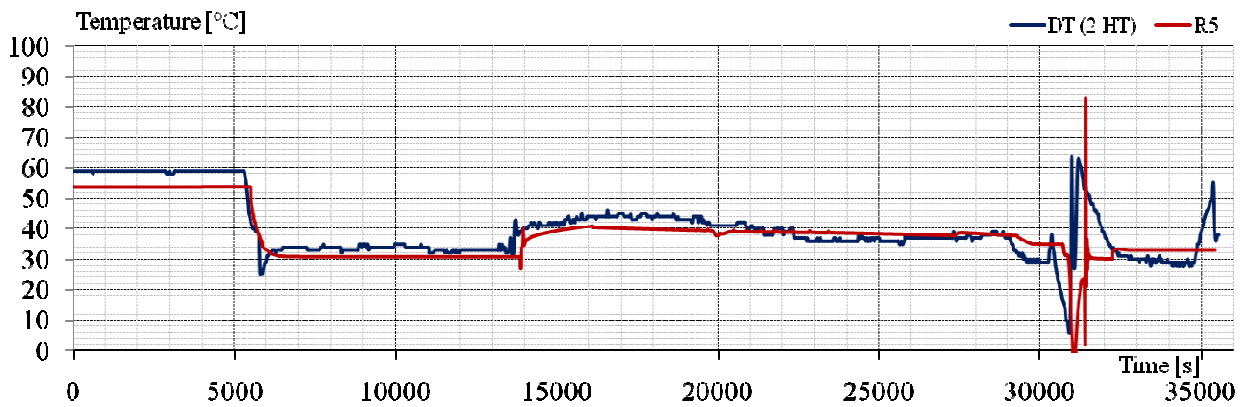


Fig. 58 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: salto termico attraverso il II riscaldatore.

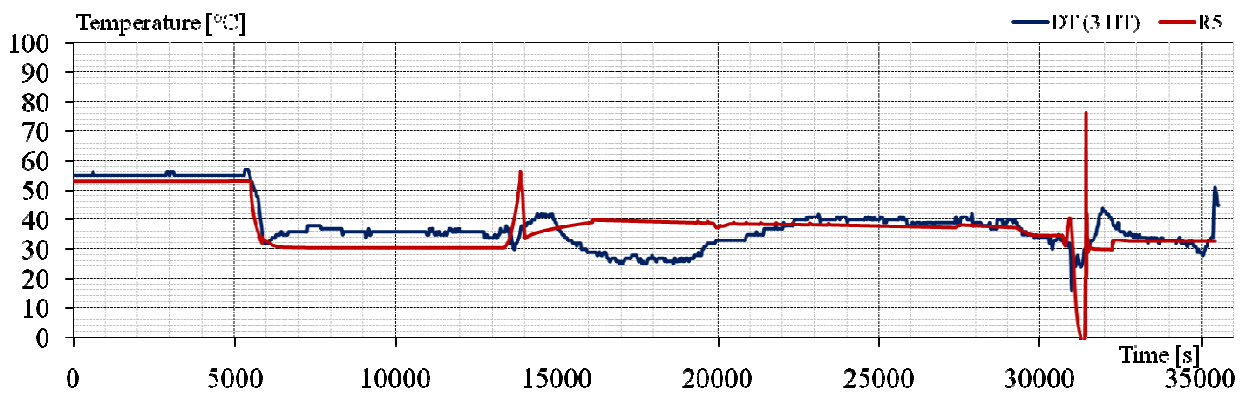




Fig. 69 – Risultati sperimentali e calcolo REALP5: salto termico attraverso il III riscaldatore.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	25	26

## BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Meloni, F.S. Nitti, “Pre-Test Analysis for an Experimental Campaign in the Upgraded HE-FUS3 Loop”, NNFISS - LP3 – 002
- [2] A. Tincani, “UPGRADING OF THE HE-FUS 3 HELIUM LOOP FOR TESTING TBMS”, F4E n. TW5-TTB-002 D1, ENEA n. HB-G-R-009
- [3] *Relap5/Mod 3.3 Code Manual*, Information Systems Laboratories, Inc., Document NUREG/CR-5535.
- [4] **P. Meloni and G. Dell’Orco**, *Assessment of ATHENA Code Capability to Simulate Helium Cooled Systems for Fusion Reactors*, Proceedings of Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9), San Francisco, California, (1999).
- [5] **P. Meloni, et al.**, *RELAP5 and CATHARE2 benchmarking assessment on two LOFA transients conducted in HE-FUS3 helium facility*, Proceedings of ICAPP ’10, San Diego, CA, USA, (2010).
- [6] **P. Meloni**, *HE-FUS3 Experimental Campaign for the Assessment of Thermal-Hydraulic Codes: Pre-Test Analysis and Test Specifications*, ENEA RT-FPN-P9LU-015, December 2008
- [7] **M. Polidori**, *Assessment of the RELAP5 Mod3.3 capability to simulate thermal-hydraulic and dynamic behavior of helium cooled loops*, UTFISSM – P9S9 – 001.
- [8] **M. Polidori**, *HE-FUS3 benchmark specifications*, UE Grant Agreement n° 249678, UTFISSM – P9SU – 001.
- [9] *Comunicazione diretta con il team sperimentale di He-Fus3.*
- [10] **P. Meloni, M. Polidori, L. Barucca, M. Gregorini**, *Final results for the HE-FUS3 benchmark calculations (ENEA-ANSALDO contribution)*, RAPHAEL Project Deliverable D-ST1.5a, Feb. 2009.
- [11] **F. D’Auria, A. Bousbia-Salah, A. Petruzzi, A. Del Nevo**, *State of the Art in Using Best Estimate Calculation Tools in Nuclear Technology*, Nuclear Engineering and Technology, Vol.38 No.1 Feb. 2006.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS – LP3 - 019	0	L	26	26

- [12] C.Nardi, “EVALUATION OF THE HETS DIVERTOR THERMAL AND FLUID PERFORMANCE”, Document - FUS-TEC DI-MC-R-002.