



Ricerca di Sistema elettrico

Miglioramento dei Modelli dei Codici Integrali CATHARE e TRACE per la Simulazione di Specifici Aspetti della Facility Integrale SPES2

C. Lombardo, M. Polidori
P. Chiovaro, S. D'Amico, I. Moscato, G. Vella



MIGLIORAMENTO DEI MODELLI DEI CODICI INTEGRALI CATHARE E TRACE PER LA SIMULAZIONE DI SPECIFICI ASPETTI DELLA FACILITY INTEGRALE SPES2

C. Lombardo, M. Polidori – ENEA
P. Chiovaro, S. D’Amico, I. Moscato, G. Vella – CIRTEN: UNIPA

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per i nucleare di IV Generazione”

Responsabile scientifico ENEA: Felice De Rosa

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi

Titolo

Miglioramento dei modelli dei codici integrali CATHARE e TRACE per la simulazione di specifici aspetti della facility integrale SPES2.

Descrittori
Tipologia del documento: Rapporto tecnico

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione

Argomenti trattati: Reattori nucleari evolutivi
Sicurezza nucleare

Sommario

Il presente documento è stato preparato nel corso della prima annualità dell'AdP ENEA-MSE nell'ambito dell'obiettivo C (SPERIMENTAZIONE E CALCOLI IN APPOGGIO AGLI STUDI SULLA SICUREZZA) della Linea Progettuale 1 (Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare). In esso vengono riportati i principali risultati dell'attività di validazione e verifica dei codici di sistema TRACE e CATHARE sulla base delle campagne sperimentali condotte negli anni scorsi sugli impianti SPES-2 e PERSEO.

Note

Il presente documento è stato preparato con il contributo del personale ENEA e CIRTEN:

C. Lombardo, M. Polidori (ENEA)

P. Chiovaro, S. D'Amico, I. Moscato, G. Vella (Università degli Studi di Palermo)


Sigla documento rif. : CERSE-UNIPA RL 1227/2016


Copia n.
In carico a:

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	
2			NOME			
			FIRMA			
1	REVISIONE 1	19/09/16	NOME	Calogera Lombardo	Paride Meloni	Felice De Rosa
			FIRMA	<i>Calogera Lombardo</i>	<i>Paride Meloni</i>	<i>Felice De Rosa</i>
0	EMMISSIONE	07/09/16	NOME	Calogera Lombardo	Paride Meloni	Felice De Rosa
			FIRMA	<i>Calogera Lombardo</i>	<i>Paride Meloni</i>	<i>Felice De Rosa</i>

INDICE

INDICE.....	2
LISTA DELLE FIGURE	3
LISTA DELLE TABELLE	4
1. INTRODUZIONE.....	5
2. DESCRIZIONE DELL’IMPIANTO SPERIMENTALE SPES2	6
3. CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI CONDOTTA SU SPES2.....	11
4. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA CATHARE	12
5. DESCRIZIONE DELLE MIGLIORE APPORTATE AL MODELLO CATHARE DELL’IMPIANTO SPES-2	14
5.1 DESCRIZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA	16
5.2 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA LINEA DVI.....	18
5.3 CONFRONTO TRA I RISULTATI CATHARE E I DATI SPERIMENTALI	18
6. DESCRIZIONE DELLA FACILITY PERSEO	22
6.1 CONFIGURAZIONE DEL CIRCUITO E CONDIZIONI OPERATIVE	24
6.2 MATRICE DEI TEST SPERIMENTALI	25
7. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA TRACE	27
8. DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DELL’IMPIANTO PERSEO	29
8.1 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO	29
8.1.1 RECIPIENTE IN PRESSIONE	30
8.1.2 SCAMBIATORE DI CALORE	31
8.2 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA COSTITUITO DALLE PISCINE.....	33
9. ANALISI PRELIMINARI	35
10. CONCLUSIONI.....	40
BIBLIOGRAFIA.....	42
CURRICULUM DEL PERSONALE CIRTEN	43

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 - 067	1	L	3	43

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1: Schema semplificato della facility SPES-2.....	6
Figura 2: Rappresentazione schematica dell'accoppiamento dei sistemi PRHR-IRWST.	8
Figura 3: Rappresentazione schematica della CMT.	9
Figura 4: Insieme dei sistemi d'emergenza dell'AP-600.....	10
Figura 5: Particolare della nodalizzazione del canale di potenza.	14
Figura 6: Particolare della nodalizzazione del loop A.....	15
Figura 7: Particolare dell'elemento 3D che rappresenta il downcomer anulare.	15
Figura 8: Rappresentazione tramite GUTHARE della nuova nodalizzazione dell'IRWST. ...	16
Figura 9: Andamento della pressione nel circuito primario.....	19
Figura 10: Portata in uscita dalla rottura.	20
Figura 11: Portata di liquido iniettata dalla CMTA.	20
Figura 12: Portata di liquido iniettata dalla CMTB.	21
Figura 13: Portata attraverso il PRHR.	21
Figura 14 : Schema dell'impianto PERSEO.....	22
Figura 15: Schema del circuito primario di PERSEO.	23
Figura 16: Lay-out dello steam duct e della liquid line tra le due piscine.....	24
Figura 17: Vista generale della nodalizzazione TRACE di PERSEO.	29
Figura 18: Recipiente in pressione.	30
Figura 19: Modello dello scambiatore di calore.....	31
Figura 20: Modello della feed line.....	32
Figura 21: Modello della drain line.....	32
Figura 22: Modello delle piscine e delle linee di connessione.....	33
Figura 23: Particolare della geometria dell'iniettore.	34
Figura 24: Particolare dei volumi simulanti l'iniettore.	34
Figura 25: Andamento sperimentale dei livelli di liquido nelle piscine.	35
Figura 26: Andamento simulato dei livelli di liquido nelle piscine.	36
Figura 27: Andamento sperimentale della pressione nel circuito primario.....	38
Figura 28: Andamento simulato della pressione nel circuito primario.....	38
Figura 29: Andamento sperimentale della potenza scambiata dal primario.	39
Figura 30: Andamento simulato della potenza scambiata dal primario.	39

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1: Principali caratteristiche della facility SPES-2.	7
Tabella 2: Caratteristiche delle CMTs.	9
Tabella 3: Caratteristiche del PRHR e dell'IRWST.	10
Tabella 4: Matrice delle prove sperimentali condotte su SPES2.	11
Tabella 5: Condizioni di stazionario.	17
Tabella 6: Segnali di sicurezza e intervento dei sistemi di emergenza di SPES2.	18
Tabella 7: Parametri di progetto.	24
Tabella 8: Matrice dei test di shake down.	25
Tabella 9: Matrice dei test integrali e di stabilità.	26
Tabella 10: Componenti utilizzati nel codice TRACE.	28
Tabella 11: Principali grandezze caratterizzanti la fase esaminata.	37

1. INTRODUZIONE

La gestione in sicurezza degli impianti nucleari, che rappresenta l'oggetto di un crescente interesse in tutto il mondo, ha come fine quello di prevenire e mitigare le conseguenze di eventuali scenari incidentali originati da eventi iniziatori indesiderati. L'importanza di predire il comportamento degli impianti nucleari, sia in condizioni di normale esercizio che incidentali, ha fatto sì che molte delle attività di ricerca condotte negli ultimi anni, siano state finalizzate alla messa a punto di codici di sistema affidabili per le analisi di sicurezza degli impianti nucleari. L'utilizzo di tali codici di calcolo, chiamati "best-estimate", è subordinato alla loro validazione condotta sulla base del confronto con dati numerici provenienti da test effettuati su "facilities sperimentali".

Una di queste facilities, denominata SPES-2, intorno alla fine degli anni 90 veniva annoverata tra quelle a rischio di chiusura e inserita come candidata per potenziali programmi di collaborazione internazionali [1]. Su tale facility, attualmente esistente in SIET, intorno agli anni 90 venne condotto un programma di prove sperimentali i cui risultati possono essere utilizzati per la validazione di codici termoidraulici.

Inoltre il crescente interesse nei confronti dei sistemi di sicurezza passivi di cui possono dotarsi gli impianti nucleari, al fine di aumentarne la sicurezza, ha fatto sì che, le facilities SPES2 e PERSEO siano risultate oggetto di un rinnovato interesse in ambito internazionale [2].

Sulla base di queste premesse, negli anni precedenti in ENEA si è deciso di sviluppare il modello CATHARE di SPES2 mentre il Dipartimento Energia, dell'Informazione e Modelli Matematici "DEIM" dell'Università degli Studi di Palermo ha sviluppato il nodding dell'impianto SPES2, tramite l'impiego del codice di sistema TRACE.

I risultati delle attività di ricerca condotte nel corso del precedente PAR [3] hanno messo in luce:

a) L'opportunità di approfondire ulteriormente alcune delle fenomenologie tipiche del comportamento dei sistemi di sicurezza passivi: con particolare riguardo alla valutazione dell'affidabilità dei sistemi di sicurezza per lo smaltimento del calore residuo di decadimento (PRHR (Passive Residual Heat Removal) installato sull'AP600 della Westinghouse). L'efficienza del PRHR viene aumentata refrigerando tale sistema in una piscina riempita di acqua in condizioni standard ($P=1$ atm, $T=25$ C). All'inizio degli anni 2000 in SIET venne costruita una facility sperimentale chiamata PERSEO (inPool Energy Removal System for Emergency Operation). Su tale facility venne condotta una campagna di prove sperimentali i cui risultati possono essere utilizzati per la validazione dei codici di calcolo. A tale scopo si è deciso di sviluppare il modello TRACE della facility PERSEO e di testare la capacità di tale codice nella descrizione dei fenomeni di condensazione sulla base del confronto tra i dati sperimentali a disposizione e i risultati delle simulazioni TRACE. Tale attività permetterà di migliorare il modello di SPES2 e la confidenza sui risultati ottenuti;

b) La necessità di migliorare ulteriormente il nodding CATHARE anche sulla base degli spunti forniti dagli sviluppatori del codice durante l'ultimo CATHARE Users' CLUB. La prima di tali modifiche dovrebbe riguardare il remesh del 3D utilizzato per descrivere il comportamento del downcomer anulare dell'impianto SPES2. Tale componente dell'impianto risulta essere una parte veramente cruciale in quanto attraverso esso fluisce il fluido caldo che dal core dell'impianto va verso gli scambiatori di calore e il fluido freddo che viene iniettato dai sistemi di emergenza nel tentativo di gestire in sicurezza un evento incidentale. Un'adeguata simulazione delle fenomenologie che entrano in gioco in tale componente, sono essenziali per una corretta riproduzione dell'evoluzione del transitorio di Small Break Loca studiato nella precedente annualità. Inoltre il modello CATHARE ulteriormente sviluppato

potrà essere utilizzato in questa e nelle successive annualità del triennio per la simulazione di altri transitori incidentali selezionati tra quelli della matrice di prova di SPES2.

Il presente documento riporta i principali risultati dell'attività di validazione e verifica dei codici di sistema TRACE e CATHARE sulla base delle campagne sperimentali condotte sugli impianti SPES 2 e PERSEO.

2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES2

La facility SPES-2 [4], il cui layout è presentato nella Figura 1, è stato progettato e costruito per simulare nella maniera più accurata possibile il comportamento termoidraulico dell'AP600.

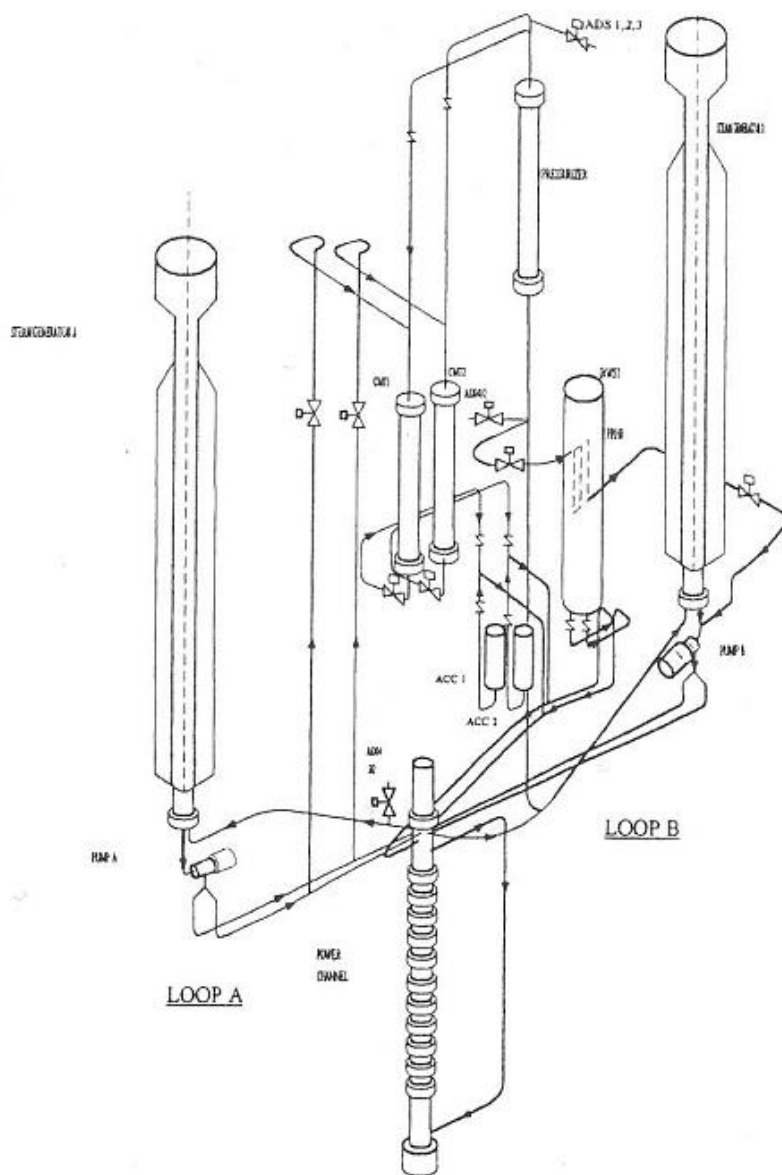


Figura 1: Schema semplificato della facility SPES-2.

In particolare il sistema a due loop simula i circuiti primario e secondario fino alle valvole di isolamento delle linee del vapore in uscita dai generatori di vapore e tutti i sistemi di sicurezza passivi.

Ogni loop del circuito include una hot-leg e due cold-legs che si diramano da una singola pompa primaria di raffreddamento a mandata verticale. Il recipiente in pressione è composto dal lower plenum, dal riser, dove sono posizionate le barrette scaldanti, dall'upper head e dal downcomer. Quest'ultimo consiste di una sezione anulare, nella quale confluiscono le quattro cold-leg e le DVI, e da una tubazione esterna che connette la sezione anulare al lower plenum. Il canale di potenza consiste di un fascio di 97 barrette riscaldate elettricamente ed ha la stessa lunghezza scaldante e la stessa geometria (passo, diametro e lunghezza della barretta) dell'AP600. Il pressurizzatore consiste di un vessel cilindrico flangiato equipaggiato con due riscaldatori interni e altri sei esterni. Esso è collegato alla hot-leg del loop A. La facility ha due generatori di vapore identici per trasferire la potenza termica dal circuito primario al secondario. Il lato primario del generatore di vapore consiste di un fascio tubiero formato da 13 tubi ad U di Inconel 600 assemblati in una matrice quadrata, saldati su una piastra tubiera ed equispaziati per mezzo di sette griglie. Sul lato secondario sono mantenute le elevazioni dell'AP600 fino alla sommità del separatore di vapore dove sono ubicati gli essiccatori.

Le caratteristiche principali dello SPES-2 sono riportate in **Tabella 1**.

Fluido di processo	acqua
Numero di loop	2
Numero di pompe	2
Pressione di progetto del primario	20 [MPa]
Pressione di progetto del secondario	20 [MPa]
Temperatura di progetto del primario [°C]	365
Temperatura di progetto del secondario [°C]	310
Potenza massima [MW]	9
Fattore di scala sull'altezza	1:1

Tabella 1: Principali caratteristiche della facility SPES-2.

La configurazione della facility è tale da essere caratterizzata dalla presenza di tutti i sistemi di emergenza dell'impianto AP - 600.

Tali sistemi sono costituiti da:

- due accumulatori di geometria cilindrica e non sferica, come previsto nell'AP-600. Essi sono stati scalati preservando il volume di questi ultimi, considerando cioè una altezza del cilindro con due calotte emisferiche. Il valore esatto del volume occupato dal gas e dal liquido è stato stabilito in modo da coincidere con gli stessi valori degli accumulatori dell'AP-600. L'Azoto utilizzato nell'AP-600 per mettere in pressione gli accumulatori è stato sostituito con aria compressa. Inoltre una barretta scaldante è stata posta all'interno del serbatoio per mantenere l'acqua ad una temperatura pari a quella nominale.

- un Passive Residual Heat Removal (PRHR) System. Tale sistema di rimozione del calore residuo è costituito da uno scambiatore di calore con i tubi a C che normalmente è contenuto all'interno del In-containment Refueling Water Storage Tank (IRWST), aperto alla sua sommità e quindi alle medesime condizioni di pressione e temperatura dell'edificio di contenimento (vedi Figura 2). Il PRHR ha il compito di rimuovere il calore residuo stoccato dal fluido primario per mezzo del fenomeno della circolazione naturale. Il fluido primario caldo proveniente da una delle hot leg giunge all'ingresso del PRHR e attraversa i tubi a C dello scambiatore scambiando il calore in esso contenuto tramite l'ebollizione del fluido secondario a diretto contatto con la superficie esterna dei tubi dello scambiatore. Il fluido primario, così raffreddato, ritorna al circuito primario tramite la linea di outlet del PRHR connessa al lower head di uno degli scambiatori di calore.

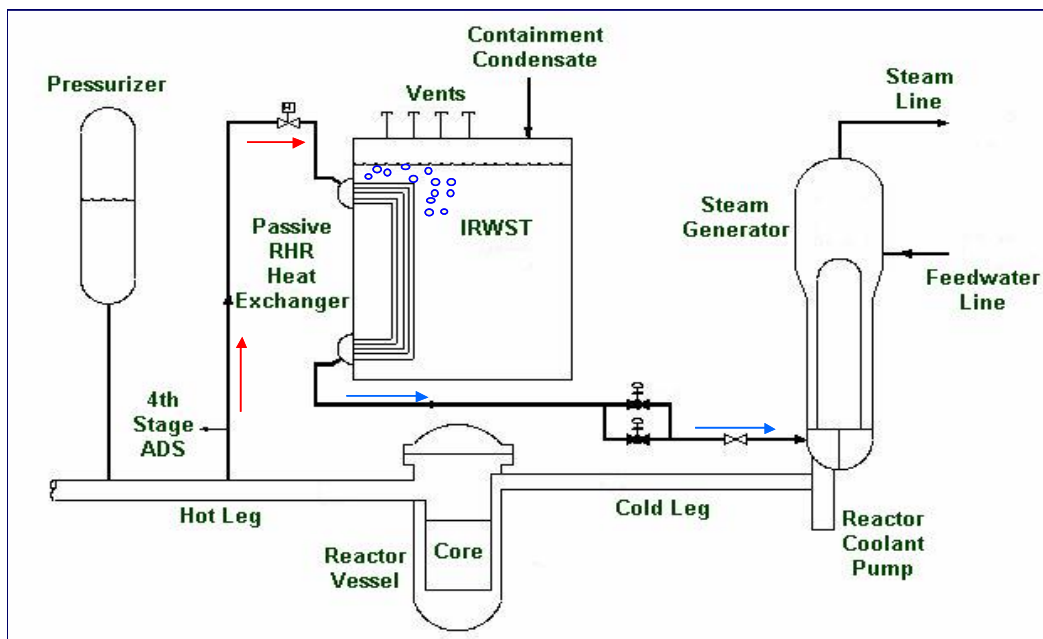
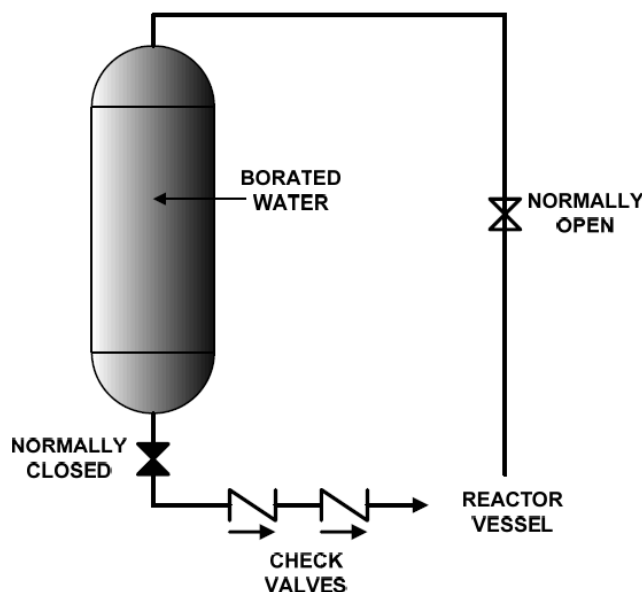


Figura 2: Rappresentazione schematica dell'accoppiamento dei sistemi PRHR-IRWST.

- Due Core Make-up Tanks (CMTs). Le CMT rappresentano per l'AP-600 i classici sistemi di iniezione di emergenza di alta pressione degli impianti PWR. Ciascuna delle due CMTs, riempite con acqua borata, è costituita da un grosso volume di acciaio collegato alla sua sommità, tramite una linea di ingresso, a una delle cold leg e alla sua base, tramite una linea di scarico, a una delle DVI. Ricordiamo poi che le DVIs sono direttamente collegate al downcomer del vessel. In condizioni di normali esercizio dell'impianto le valvole di controllo poste sulle linee di ingresso sono aperte in modo tale che ciascuna delle CMTs si trovi nelle medesime condizioni termodrauliche del circuito primario. Le valvole di controllo poste sulle linee di scarico sono invece normalmente chiuse evitando l'innescarsi della circolazione naturale. In condizioni incidentale tali valvole vengono aperte consentendo, quindi, tramite l'innescarsi della circolazione naturale l'acqua borata contenuta nelle CMTs fluisce verso il core mentre il fluido caldo proveniente dal core fluisce all'interno delle CMTs (Figura 3). La Tabella 2 riporta le principali caratteristiche delle CMTs.

Caratteristiche delle CMT	
Numero	2
Peso totale [kg]	2450
Contenimento esterno	
Pressione di progetto [MPa]	7.3
Temperatura di progetto [°C]	200
Fluido	Aria
Volume [dm ³]	537
Pressione di apertura delle Safety valves [MPa]	7.1
Pessione nominale [Mpa]	6.5
Altezza [m]	7102
Materiale	ASTM A 105/106
Core Make Up Tank	
Pressione di progetto [MPa]	119
Temperatura di progetto [°C]	350
Fluido	Acqua
Volume [dm ³]	143
Pressione di rottura del disco di sicurezza [MPa]	11 ± 5
Pressione nominale [MPa]	155
Altezza [m]	6.26
Area [m ²]	0.023
Materiale	X6 Cr Ni Ti 1811 UNI

Tabella 2: Caratteristiche delle CMTs.

Figura 3: Rappresentazione schematica della CMT.

- Un In-containment Refuelling Water Storage Tank, (IRWST) (Figura 2), rappresentata da una piscina di notevoli dimensioni contenente al suo interno dell'acqua borata. L'IRWST funziona sia da pozzo termico per lo scambiatore di calore residuo del PRHR, come abbiamo spiegato sopra, sia da sorgente di acqua che può essere iniettata nel primario attraverso le DVI. Normalmente, le due linee di scarico che si dipartono dalla base della piscina verso le due DVI sono isolate tramite delle "check valve", quando la pressione nel circuito primario scende al di sotto del valore del battente idrostatico della piscina le valvole di check si aprono consentendo lo scarico dell'acqua che attraverso le DVI fluisce dall'IRWST al vessel.

In Tabella 3 vengono riportate le principali informazioni progettuali relativamente ai due componenti prima descritti.

Caratteristiche del PRHR e dell'IRWST	
IRWST	
Numero	1
Fluido	acqua
Pressione nominale	atmosferica
Livello di liquido nominale [m]	8.53
Volume di liquido [m ³]	5.54
Area [m ²]	0.65
Altezza totale [m]	9.03
Materiale	ASTM A 312 TP 304
PRHR	
Numero dei tubi	3 (uno impiegato)
Diametro interno [mm]	15.75
Diametro esterno [mm]	19.05
Lunghezza totale [m]	8.05
Superficie di scambio termico [m ²]	0.968
Lunghezza tratto verticale [m]	5.36
Lunghezza tratto orizzontale [m]	1.39

Tabella 3: Caratteristiche del PRHR e dell'IRWST.

- Quattro gruppi di valvole di sicurezza (ADS) che installate sulla parte alta del PRZ hanno il compito di consentire una depressurizzazione controllata del circuito primario quando il livello di liquido nelle CMTs diventa inferiore a valori prefissati.

La Figura 4 riporta una visuale d'insieme dei sistemi di sicurezza passivi dell'AP-600.

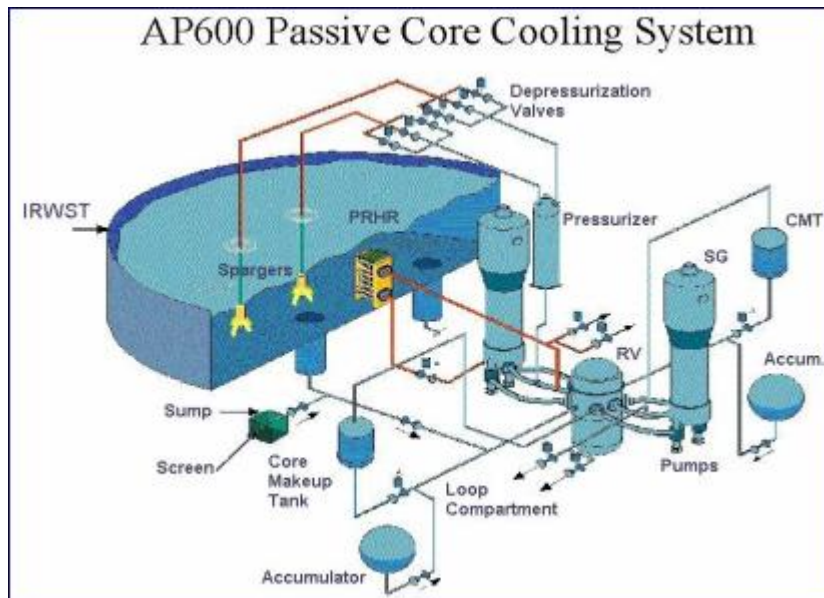


Figura 4: Insieme dei sistemi d'emergenza dell'AP-600.

3. CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI CONDOTTA SU SPES2

La campagna di prove sperimentali condotta su SPES2 è stata effettuata con lo scopo sia di testare le prestazioni dei sistemi di emergenza del tipo passivo dell'impianto nucleare AP600 (progettato da Westinghouse) che di ottenere dati utilizzabili al fine di validare i codici di sistema utilizzati per lo studio delle analisi di sicurezza degli impianti nucleari. La matrice di prova comprende un totale di 15 differenti transitori (vedi Tabella 4): 11 caratterizzati dalla perdita di refrigerante del circuito primario (Loss Of Coolant Accident LOCA), 3 dalla rottura di uno dei tubi del generatore di vapore (Steam Generator Tube Rupture SGTR) e l'ultimo dalla rottura della linea principale del vapore in uscita dal generatore (Steam Line Break SLB).

TAG	TEST DATE	TYPE	DESCRIPTION	STATUS OF NON SAFETY SYSTEMS	PRHR STATUS	SINGLE FAILURES	NOTES
S00103	Feb. 5, 1994	SBLOCA	2" CL Break	CVCS, NRHR, SFW off	On	ADS 4 th stage B	Sharp orifice at the break.
S00203	April 9, 1994	SBLOCA	2" CL Break	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 4 th stage B valves	Smooth orifice at the break.
S00303	April 30, 1994	SBLOCA	2" CL Break	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 4 th stage B valves	As above without PR balance line. Reference CL break.
S00401	May 5, 1994	SBLOCA	1" CL Break	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 4 th stage B valves	Maximize CMT heatup prior to ADS actuation.
S00504	May 18, 1994	SBLOCA	2" CL Break	CVCS, NRHR, SFW on	On	No effect. No 4 th stage actuation expected	Non safety/passive system interaction.
S00605	May 27, 1994	SBLOCA	2" DVI Break	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 4 th stage B valves	Asymmetric CMT performance
S00706	June 10, 1994	SBLOCA	DEG Break of DVI	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 1 st and 3 rd stage valves	Complete loss of one of two PXS subsystems.
S00908	June 23, 1994	SBLOCA	CMT BL DEG Break	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 1 st and 3 rd stage valves	No delivery from faulted CMT. Blind test.
S01007	July 7, 1994	SBLOCA	2" CMT BL Break	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 4 th stage B valves	Examine effect on CMT draindown.
S01110	July 14, 1994	SGTR	SG tube rupture (1 tube)	CVCS, NRHR, SFW off	On	No effect	No operator actions.
S01211	Sept. 9, 1994	SGTR	SG tube rupture (1 tube)	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 4 th stage B valves	Inadvertent ADS opening. Blind test.
S01309	Sept. 22, 1994	SGTR	SG tube rupture (1 tube)	CVCS, SFW on; NRHR off	On	No effect	Operator action to isolate SG, subcool and depressurize primary system.
S01512	Oct. 11, 1994	SLB	SG A steam line break	CVCS, NRHR, SFW off	On (3 tubes)	SFW not isolated on T cold signal	Maximum PRHR cooldown. CMT's do not drain and no ADS actuation occurs.
S01613	Oct. 15, 1994	SBLOCA	1" CL Break	CVCS, NRHR, SFW off	On (3 tubes)	1 of 2 ADS 4 th stage B valves	Show effect of 2 PRHR HX's on cold leg temperature.
S01703	Nov. 12, 1994	SBLOCA	2" CL Break	CVCS, NRHR, SFW off	On	1 of 2 ADS 4 th stage B valves	Reference CL break repeatability test.

Tabella 4: Matrice delle prove sperimentali condotte su SPES2.

In ciascuna delle prove sperimentali componenti la matrice di prova (vedi Tabella 4) i sistemi di emergenza del tipo passivo, di cui è dotato l'impianto all'esame, hanno il compito di gestire in sicurezza l'evoluzione degli incidenti evitando l'eccessivo riscaldamento del canale di potenza.

4. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA CATHARE

Il codice di sistema CATHARE 2 [5] utilizzato per lo sviluppo del modello numerico che verrà presentato nel Capitolo 5, rappresenta il codice di riferimento utilizzato per le analisi di sicurezza necessarie per il licensing dell'EPR (European Pressurized Reactor). Esso tratta la termoidraulica del fluido termovettore in una rete sostanzialmente monodimensionale tramite un modello a due fluidi (liquido e vapore) e 6 equazioni di bilancio (massa, quantità di moto ed energia) per le 6 principali variabili: entalpia di liquido e gas (H_l , H_g), velocità di liquido e gas (V_l , V_g), pressione (P) e grado di vuoto (α). Inoltre sono incluse le equazioni di trasporto per considerare fino a quattro tipi di gas incondensabili (x_i) e fino a dodici componenti radiochimici.

I valori di pressione trattabili sono compresi tra 0.1 e 25 MPa, le temperature del gas possono essere comprese tra 20 e 2000 °C e le velocità massime del fluido tali da non superare le condizioni di sonicità. Inoltre il codice include delle relazioni di chiusura riguardanti i principi di conservazione della massa e della quantità di moto e dello scambio termico tra le fasi del medesimo fluido e tra ciascuna fase e i confini del sistema termoidraulico.

Il codice CATHARE2 ha una struttura di tipo modulare. Ciascun modulo rappresenta un modello termoidraulico adatto a descrivere un certo tipo di elemento. All'interno del modulo vengono risolte le equazioni di bilancio per le variabili interne ed esterne (giunzioni). Questi moduli possono essere assemblati e combinati attraverso le giunzioni per rappresentare il layout del circuito primario e secondario di qualsiasi reattore e qualsiasi facility sia di tipo ad effetti separati che di tipo integrale.

I moduli principali in esso contenuti sono:

- modulo "Axial" (1-D module): viene impiegato per descrivere parti di impianto in cui il flusso del refrigerante è prevalentemente di tipo monodimensionale come ad esempio un pipe o il riser di un reattore;
- modulo "Volume" (0-D module): è un modulo a 2 nodi utilizzato per descrivere volumi di fluido di grossa taglia (plenum) con la possibilità di considerare diverse connessioni ad altri moduli. Tale modulo può essere impiegato per simulare il pressurizzatore, l'accumulatore, la cupola del generatore di vapore ed il lower e l'upper plenum di un PWR. Il modulo volume è dotato di speciali correlazioni per determinare il livello "gonfiato" (livello di pelo libero in cui si tiene in considerazione il volume occupato dalla fase vapore dispersa nella fase liquida), oppure stratificazioni totali o parziali e fenomeni di separazione di fase alle giunzioni;
- modulo 3-D: esso è un elemento impiegato per descrivere fenomeni multidimensionali nel vessel a seguito di transitori incidentali come ad esempio il LB-LOCA dove fenomeni di svuotamento del plenum inferiore e successivo reflooding hanno forti componenti tridimensionali;
- modulo BC (boundary condition): serve per imporre le condizioni al contorno del reattore o della facility. Alle giunzioni di un modulo 1D o 0D si possono imporre i valori di uno o più parametri idraulici (pressione, velocità, portata per ogni fase, frazione di vuoto, etc.), a seconda del tipo di condizione imposta, le BC possono essere definite all'ingresso o all'uscita di un elemento.;
- sottomodulo WALL multistrato: la sua applicazione consente di tenere conto della fenomenologia della conduzione termica radiale;
- sottomodulo EXCHANGER: si impiega per simulare lo scambio termico tra circuiti idraulici distinti (generatore di vapore) oppure all'interno dello stesso circuito (downcomer/riser);

- gadget TEE (1-D): è usato per rappresentare una derivazione laterale (tee branch) a partire da un modulo axial che rappresenta il ramo principale (modulo 1-D);
- Gadget SOURCE (sorgente di massa) e SINK (pozzo di massa): vengono utilizzati per simulare iniezioni o prelievi di massa dal sistema;
- accumulatore: permette di simulare lo specifico componente;
- BREAK: simula la rottura in un pipe;
- valvole, valvole di sicurezza, valvole di controllo, limitatori di flusso;
- pompa ad 1-nodo.

5. DESCRIZIONE DELLE MIGLIORE APPORTATE AL MODELLO CATHARE DELL'IMPIANTO SPES-2

La nodalizzazione della facility è realizzata tramite l'impiego della versione V2.5_3 mod2.1 di Cathare, condotta nel rispetto delle dimensioni geometriche dei vari componenti che la costituiscono e della topologia dei suoi circuiti (cercando di rappresentare al meglio le specifiche di progetto dell'impianto SPES 2).

In questo paragrafo, nella Figura 5 e nella Figura 6 vengono riportati gli schemi della nodalizzazione del canale di potenza e del loop A caratterizzato dalla presenza del pressurizzatore. Per la descrizione geometrica dettagliata del modello vedi [6], qui vogliamo semplicemente ricordare che molte delle scelte nella nodalizzazione della facility influenzano fortemente il risultato delle simulazioni. Va comunque messo in evidenza che è stata dedicata particolare attenzione alla nodalizzazione dei sistemi di emergenza di cui è dotato l'impianto, dal momento che tali sistemi sono del tipo passivo e il loro funzionamento è basato su fenomeni fisici quali la circolazione naturale e che sulla esatta descrizione di tali fenomeni da parte dei codici di sistema si sta attualmente indagando. Inoltre, sulla base delle conclusioni del lavoro condotto nella terza annualità del precedente PAR [3], di quanto riportato in [7] e del confronto con gli sviluppatori del team CATHARE in occasione dell'ultimo CATHARE Users' CLUB, il lato primario del modello CATHARE è stato modificato come segue:

1. La mesh dell'elemento 3D con cui si è nodalizzato il downcomer anulare DWC_ANN è stata infittita (vedi Figura 7).

Tale modifica si è resa necessaria nel tentativo di descrivere i fenomeni tridimensionali che vengono ad instaurarsi quando, in conseguenza della rottura di uno dei tubi del primario, il fluido freddo iniettato dai sistemi di emergenza attraverso le DVI si mescola con il fluido caldo presente nel primario.

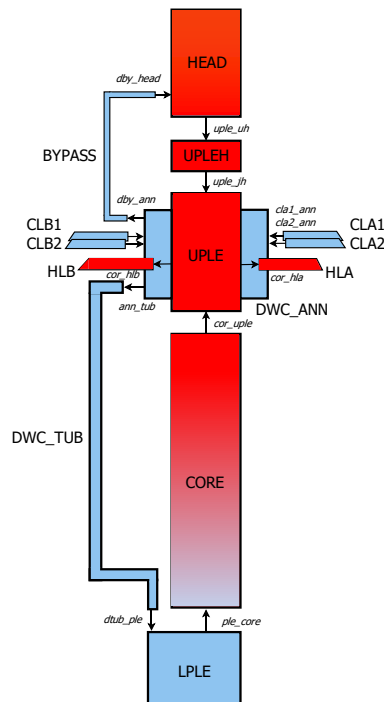


Figura 5: Particolare della nodalizzazione del canale di potenza.

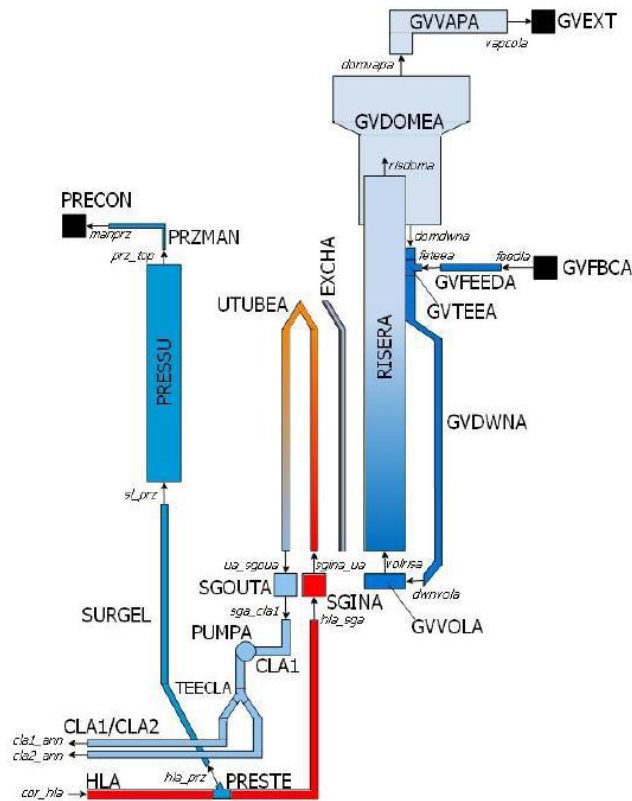


Figura 6: Particolare della nodalizzazione del loop A.

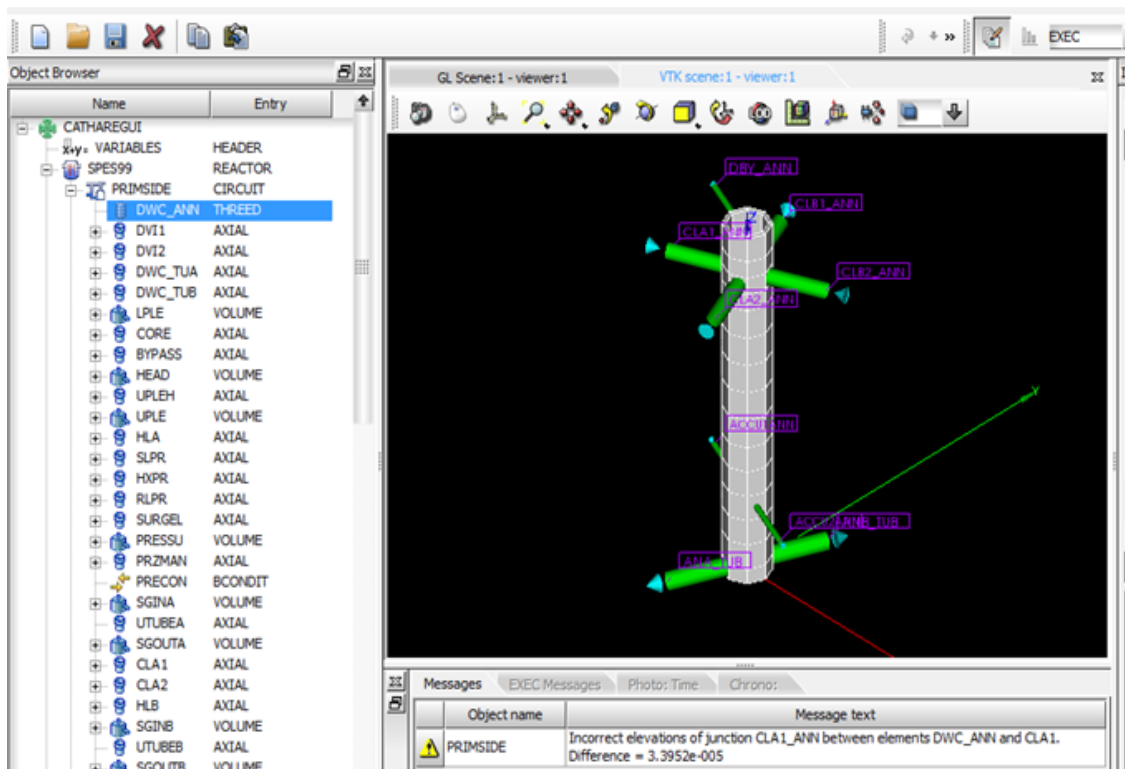


Figura 7: Particolare dell'elemento 3D che rappresenta il downcomer anulare.

5.1 DESCRIZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA

In questo paragrafo riportiamo solamente le migliorie apportate alla nodalizzazione dei sistemi di emergenza. La descrizione dettagliata del noding degli altri sistemi di emergenza è integralmente riportata in [6].

Il remesh della pool che rappresenta l'IRWST si è reso necessario nel tentativo di descrivere i fenomeni di circolazione naturale che in esso si vengono ad instaurare a causa della differenza di temperatura tra il fluido che a diretto contatto con il tubo a C dello scambiatore di calore si scalda e la restante parte di fluido contenuto nella pool. Il particolare della nuova nodalizzazione è presentato in **Figura 8**).

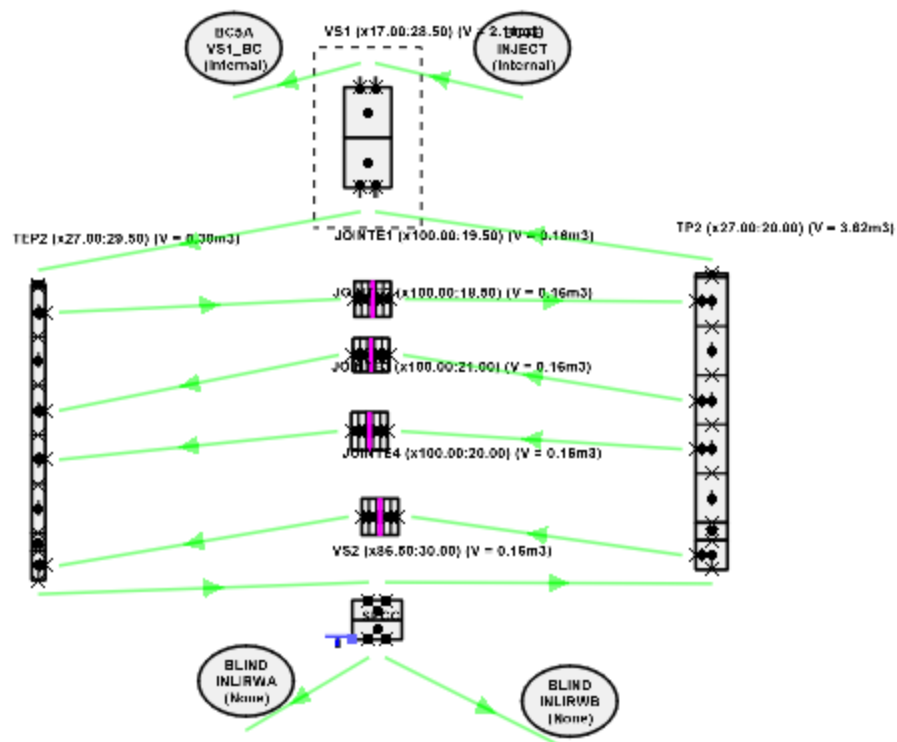


Figura 8: Rappresentazione tramite GUTHARE della nuova nodalizzazione dell'IRWST.

Essa è costituita da:

- Due axial TP2 e TEP2, quest'ultimo rappresenta il tratto della piscina accoppiato termicamente allo scambiatore di calore dell'HXPB ;
- Quattro axial JOINTE1, JOINTE2, JOINTE3 e JOINTE4 che rappresentano i collegamenti trasversali tra gli axial sopra menzionati capaci di garantire la circolazione naturale dentro la piscina,
- Un volum che rappresenta la base della piscina;
- Un volum che rappresenta la parte in alto della piscina supposta in collegamento con l'ambiente circostante.

La necessità di nodalizzare la piscina dell'IRWST nel modo sopra descritto è scaturita dal fatto che l'accoppiamento termico in CATHARE può realizzarsi solo tra due elementi del tipo axial.

Le condizioni stazionarie di riferimento sono state ottenute tramite una procedura di regolazione dei parametri termoidraulici maggiormente rilevanti che ha riprodotto per quanto possibile le regolazioni reali. Nella Tabella 5 vengono riportati le condizioni di stazionario raggiunte a partire dalla nodalizzazione CATHARE sopra descritta.

Stazionario di riferimento	Valori sperimentali		Valori calcolati	
Heater Rod Power (MW)	4.97		4.93	
Pressurized Pressure (MPa)	15.37		15.36	
CL Temp. (A1, B1) [°C]	279.7	277.6	277.0	276.0
CL Temp. (A2, B2) [°C]	279.4	277.6	277.0	276.0
Core Inlet Temp. [°C]	277.9		276.5	
Core Outlet Temp. [°C]	320.4		315.2	
HL Temp. (A, B) [°C]	315.8	316.9	315.1	315.1
Core Mass Flowrate [kg/s]	23.55		23.68	
CL MFlow (A1,B1) [kg/s]	6.04	5.56	6.16	5.70
CL MFlow (A2,B2) [kg/s]	6.24	5.82	6.14	5.67
Pump speed (A, B) [rpm]	3057	2769	2723	2603
DC-UH bypass Mflow [kg/s]	0.13		0.13	
Pressurizer level [m]	3.77		3.72	
SG pressure (A , B) [MPa]	4.97	4.94	4.96	4.96
SG Dome level (A , B) [m]	0.8	0.8	0.8	0.8
SG FW Temp. (A ,B) [°C]	225.6	226.9	226.0	226.0
SG Dome Pres. (A ,B) [MPa]	5.16	5.08	4.97	4.97
SG FW flowrate (A ,B) [kg/s]	2.00	2.20	1.41	1.32
Accumulator nominal pressure (A B)[MPa]	4.93	4.98		
Accumulator level [m]	2.33	2.30		
Accumulator water temperature [°C]	24.4	23.4		
CMTA e B	Piena			
CMTA e B water temperature [°C]	20			
IRWST water volume [m ³]	5.54			
IRWST nominal water level [m]	8.53		8.53	

Tabella 5: Condizioni di stazionario.

5.2 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA LINEA DVI

Nel presente paragrafo vengono riportati i confronti tra i dati sperimentali e i risultati del transitorio simulato tramite l'impiego della nodalizzazione CATHARE come descritta nel capitolo 4 del presente report.

L'evento incidentale preso in esame è originato da una rottura di due pollici sulla linea di iniezione B dei sistemi di emergenza (Direct Vessel Injection DVI).

La sequenza dei segnali di sicurezza e delle azioni che da essi conseguono per l'impianto SPES2 vengono riportati in Tabella 6 :

Evento	Set Point
Spegnimento reattore	P (PRZ) < 12.41 MPa + 5.73s
Intervento sistemi di emergenza	P (PRZ) < 11.72 MPa
Chiusura linea vapore loop B	P (PRZ) < 12.41 MPa + 2s ritardo
Chiusura alimentazione secondario loop A	P (PRZ) < 11.72 MPa + 2 s ritardo
Chiusura alimentazione secondario loop B	P (PRZ) < 11.72 MPa + 2 s ritardo
Intervento CMT loop A/B	P (PRZ) < 11.72 MPa + 2 s ritardo
Intervento PRHR	P (PRZ) < 11.72 MPa + 2 s ritardo
Trip pompe loop A/B	P (PRZ) < 11.72 MPa + 16.2 s ritardo
Intervento I stadio ADS	L (CMT A o B) < 67% +30 s
Intervento II stadio ADS	L (CMT A o B) < 67% +125 s
Intervento III stadio ADS	L (CMT A o B) < 67% +245 s
Intervento IV stadio ADS	L (CMT A o B) < 20% +60 s

Tabella 6: Segnali di sicurezza e intervento dei sistemi di emergenza di SPES2.

Le condizioni di stazionario a partire dalle quali viene simulato il transitorio sono quelle riportate in Tabella 5.

5.3 CONFRONTO TRA I RISULTATI CATHARE E I DATI SPERIMENTALI

Nel presente paragrafo vengono riportati i principali risultati inerenti il transitorio simulato: esso consiste nella rottura di 2" sulla DVI che collega i sistemi di emergenza del loop B al downcomer anulare.

A causa della perdita di massa attraverso la rottura si assiste ad una violenta depressurizzazione del circuito primario: con un ritardo di 5.3 s rispetto all'istante in cui la pressione raggiunge il setpoint inerente il segnale di scram (12.41 MPa), il reattore viene spento. Con 2 s di ritardo rispetto al raggiungimento del secondo setpoint della pressione (11.72 MPa) nel circuito primario vengono chiuse le linee di alimentazione del secondario dei generatori di vapore e vengono aperte le valvole di isolamento delle CMT A e B e del PRHR. Inoltre con 16.2 s di ritardo rispetto allo stesso segnale vengono bloccate le pompe di circolazione del sistema primario. A tal punto si innesca la circolazione naturale all'interno del primario e il calore residuo di decadimento dell'impianto viene asportato dal PRHR il cui tratto a C è immerso all'interno della piscina IRWST.

Inoltre rispettivamente con 30 s 125 s e 245 s di ritardo rispetto al tempo in cui il livello di liquido all'interno delle CMTs scende al di sotto del 67% del suo valore nominale intervengono i gruppi di valvole ADS del I II e III stadio.

Le valvole ADS del IV stadio intervengono con 60 s di ritardo rispetto al tempo in cui il livello di liquido all'interno delle CMTs scende al di sotto del 20% del suo valore nominale.

Per finire, quando la pressione nel circuito primario risulta inferiore al valore dello stesso parametro dentro gli accumulatori si aprono le valvole di check che, collegando le

linee di scarico degli accumulatori alle DVI, permettono che questi ultimi scarichino del liquido freddo dentro al primario.

Nelle figure che riportiamo nel seguito del presente paragrafo si riportano i confronti tra i dati sperimentali e le stesse variabili calcolate dal codice CATHARE, delle principali grandezze di interesse. I grafici presentati non riportano le scale di valori, in quanto i dati sperimentali in essi riportati sono stati ottenuti durante la campagna condotta da SIET per conto di Westinghouse a supporto del studi di sicurezza del reattore AP600: come tali risultano proprietà intellettuale di Westinghouse.

Occorre sottolineare che l'introduzione delle modifiche apportate al modello ha comportato un notevole aumento dei tempi di calcolo necessari all'ottenimento dello stato di stazionario. La Figura 9 riporta l'andamento della pressione nel circuito primario, da essa si può evidenziare come il modello CATHARE modificato consenta una buona descrizione del comportamento della facility, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, consentendo di descrivere abbastanza bene i dati sperimentali sia per la fase di depressurizzazione violenta che subito dopo.

La Figura 10 mostra l'andamento della portata di fluido in uscita dal circuito primario attraverso la rottura, mentre la Figura 11 e la Figura 12 mostrano la portata iniettata nel circuito primario dalle due CMTs.

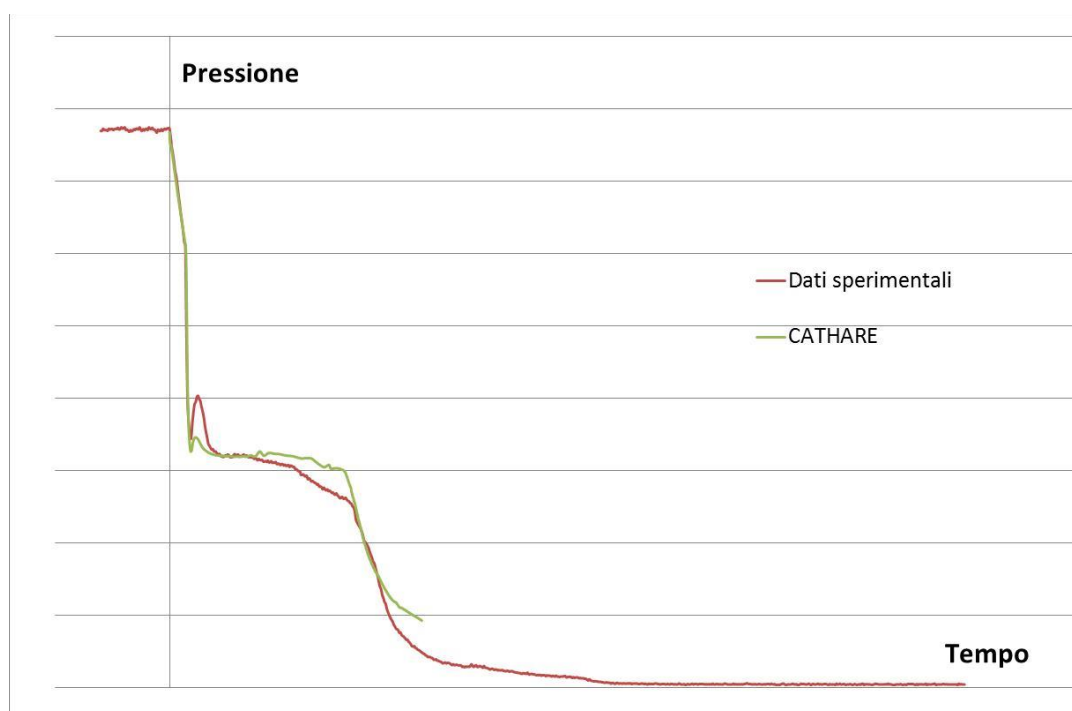


Figura 9: Andamento della pressione nel circuito primario.

Dall'esame di tali figure appare evidente come, la nuova nodalizzazione CATHARE qui utilizzata, consente di descrivere almeno dal punto di vista qualitativo il comportamento in condizioni incidentali dell'impianto.

Nonostante ciò, dall'esame della Figura 13, che riporta l'andamento della portata che fluisce dentro al PRHR e che consente di asportare il calore residuo di decadimento dal circuito primario, si nota come qualche centinaia di secondi dopo l'intervento di tale sistema la circolazione naturale si blocchi per riprendere subito dopo con valori di portata paragonabili a quelli sperimentali. Tale fenomeno non sembra avere risentito del remesh sia del downcomer anulare che dell'IRWST, potrebbe essere imputabile alla difficoltà, riscontrata nel codice CATHARE, di cambiare il valore della rugosità interna dei tubi: tale variabile

essendo utilizzata per il calcolo delle perdite di carico distribuite influisce fortemente sull'innescio della circolazione naturale.

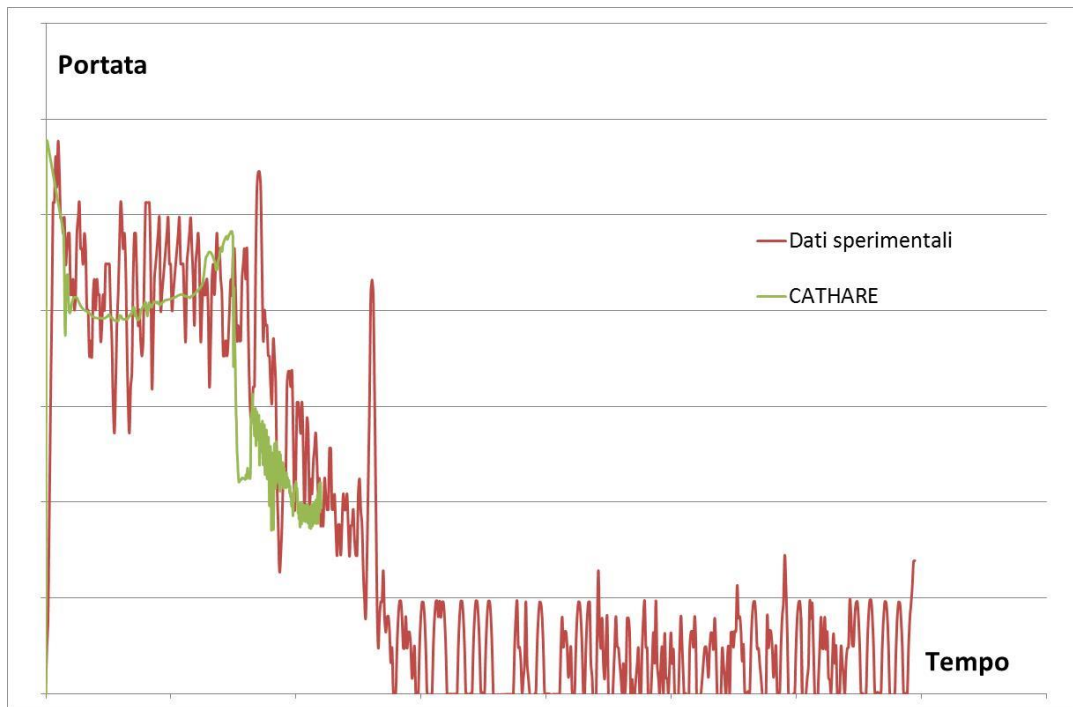


Figura 10: Portata in uscita dalla rottura.

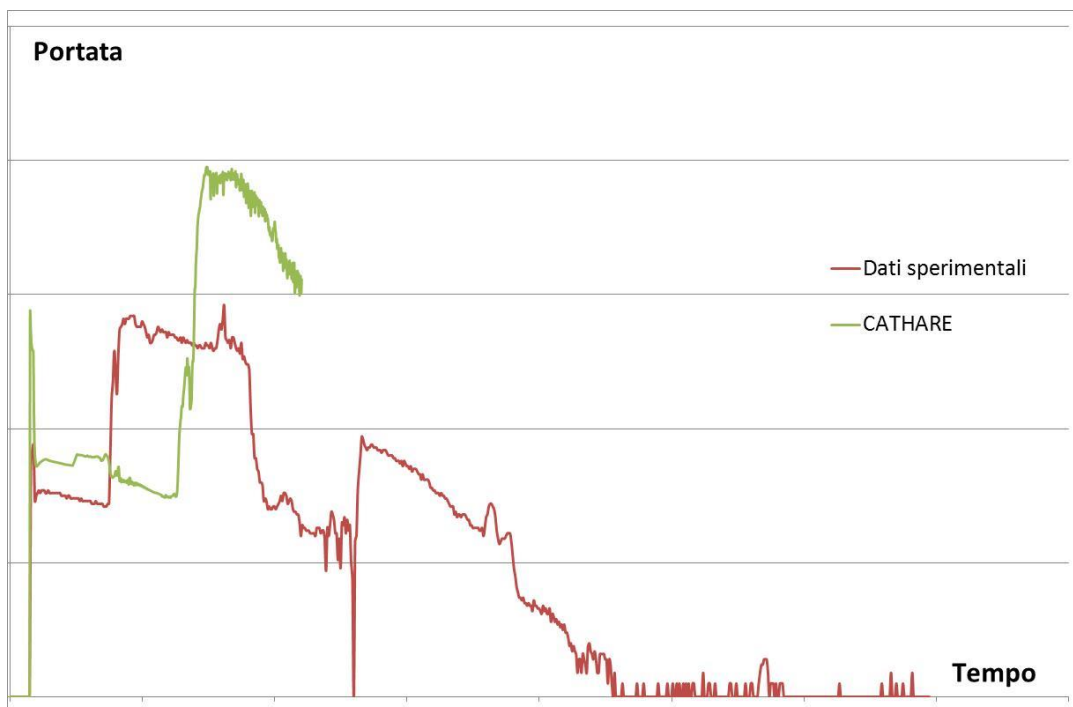


Figura 11: Portata di liquido iniettata dalla CMTA.

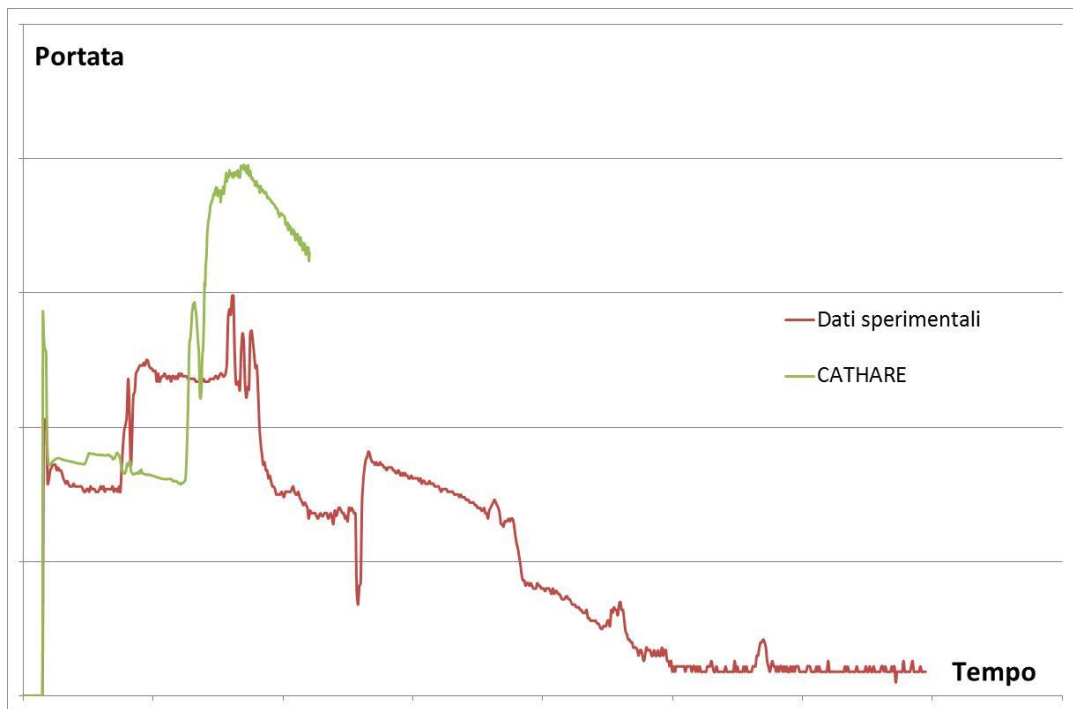


Figura 12: Portata di liquido iniettata dalla CMTB.

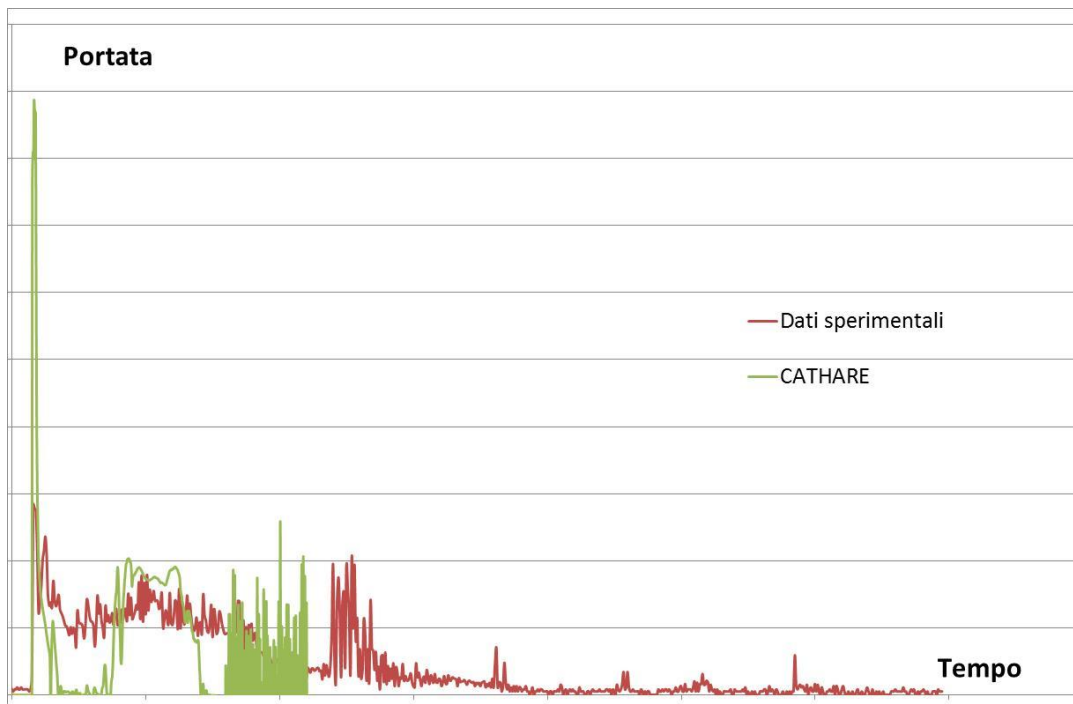


Figura 13: Portata attraverso il PRHR.

6. DESCRIZIONE DELLA FACILITY PERSEO

Il sistema PERSEO (in-Pool Energy Removal System for Emergency Operation) consiste principalmente di due piscine e un solo scambiatore di calore; lo schema generale dell'impianto è riportato in Figura 14.

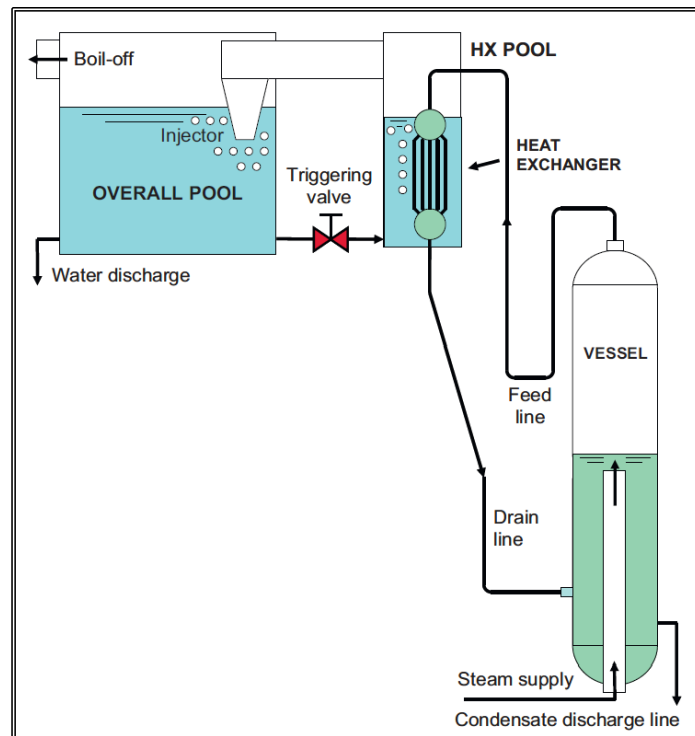


Figura 14 : Schema dell'impianto PERSEO.

Durante le condizioni di stand-by, la piscina contenente lo scambiatore di calore (HX Pool) è vuota mentre l'altra (Overall Pool) risulta piena di acqua fredda. Le due piscine sono connesse tra di loro sia nella parte inferiore che superiore in modo da assicurare, quando il sistema è in funzione, la circolazione naturale e garantire la rimozione del calore per lunghi periodi.

Nella linea di connessione posta in fondo alle due piscine, trova luogo una valvola (triggering valve) la cui apertura determina l'intervento del sistema. Durante le normali condizioni operative la valvola è chiusa e la sua apertura determina l'allagamento dello scambiatore di calore e il conseguente trasferimento di calore dal primario al pozzo termico costituito dalla piscina. È stato inserito un eiettore all'uscita della linea di connessione posta superiormente tra le due piscine, che risulta immerso nella Overall Pool per migliorare il mixing dell'acqua ed evitare la stratificazione termica [8].

L'impianto sperimentale PERSEO può suddividersi in due principali macro blocchi: il circuito primario e quello delle due piscine, lo schema generale di tali sotto sistemi è riportato rispettivamente nella Figura 15 e nella Figura 16.

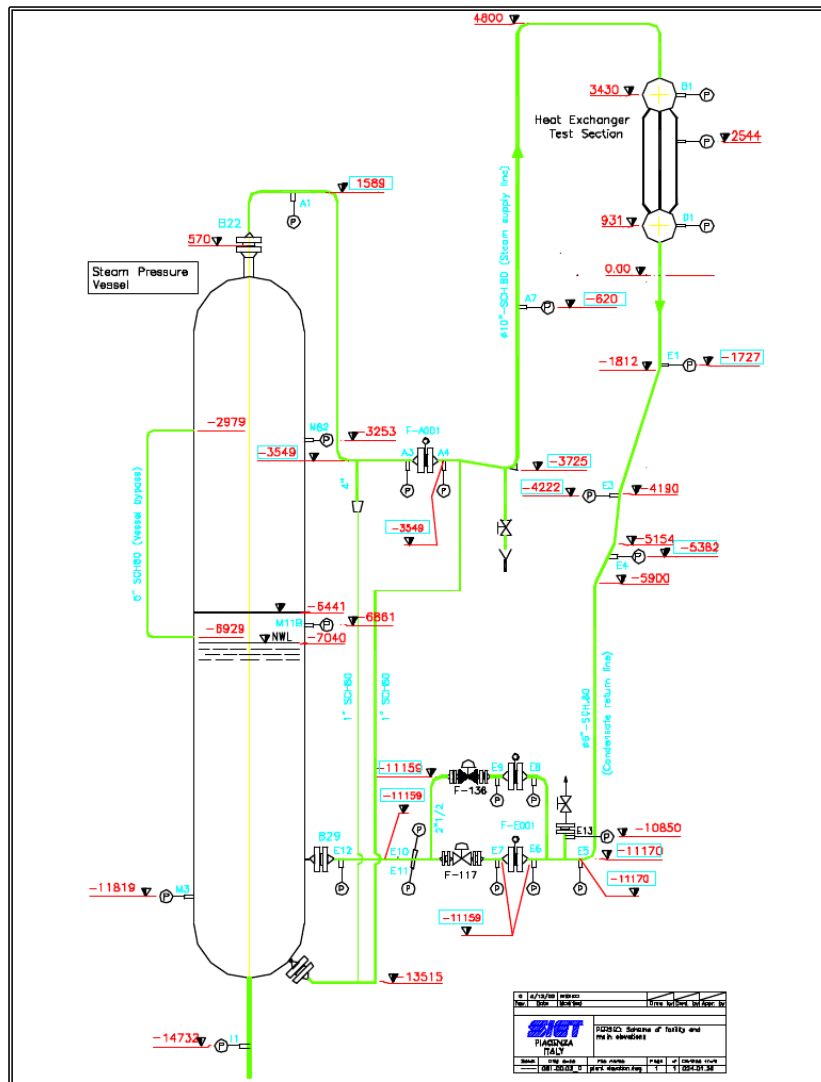


Figura 15: Schema del circuito primario di PERSEO.

Il recipiente in pressione opera nelle tipiche condizioni termodrauliche di un impianto nucleare di tipo BWR, oppure in quelle che caratterizzano il secondario di un generatore di vapore di un impianto PWR. Il volume del vessel è di circa 43 m³, l'altezza è di 13.41 m e si trova parzialmente pieno di liquido saturo ad un livello nominale di 6.275 m. Esso presenta al suo interno un riser verticale, un separatore di vapore e un essiccatore, si veda la Figura 15. Lo scambiatore di calore consiste di due collettori cilindrici realizzati in Inconel 600 e da 120 tubi verticali. il diametro interno dei collettori è di 0.63 m e lo spessore di 0.06 m, la lunghezza totale è di 2.48 m e il volume di 0.732 m³. Il diametro esterno dei tubi è di 0.0508 m e lo spessore di 0.0023 m, la lunghezza media è di 1.8 m. La steam line connette il recipiente in pressione con l'ingresso dello scambiatore, mentre la drain line collega l'uscita dello scambiatore di calore con la parte piena di liquido del vessel. La piscina in cui è inserito lo scambiatore di calore ha un volume di 28.7 m³ con un'area di base di 5.04 m² e un'altezza di 5.7 m, mentre la piscina che funge da riserva di acqua presenta un volume di 173 m³ con un'area di base di 29.84 m² e un'altezza di 5.8 m.

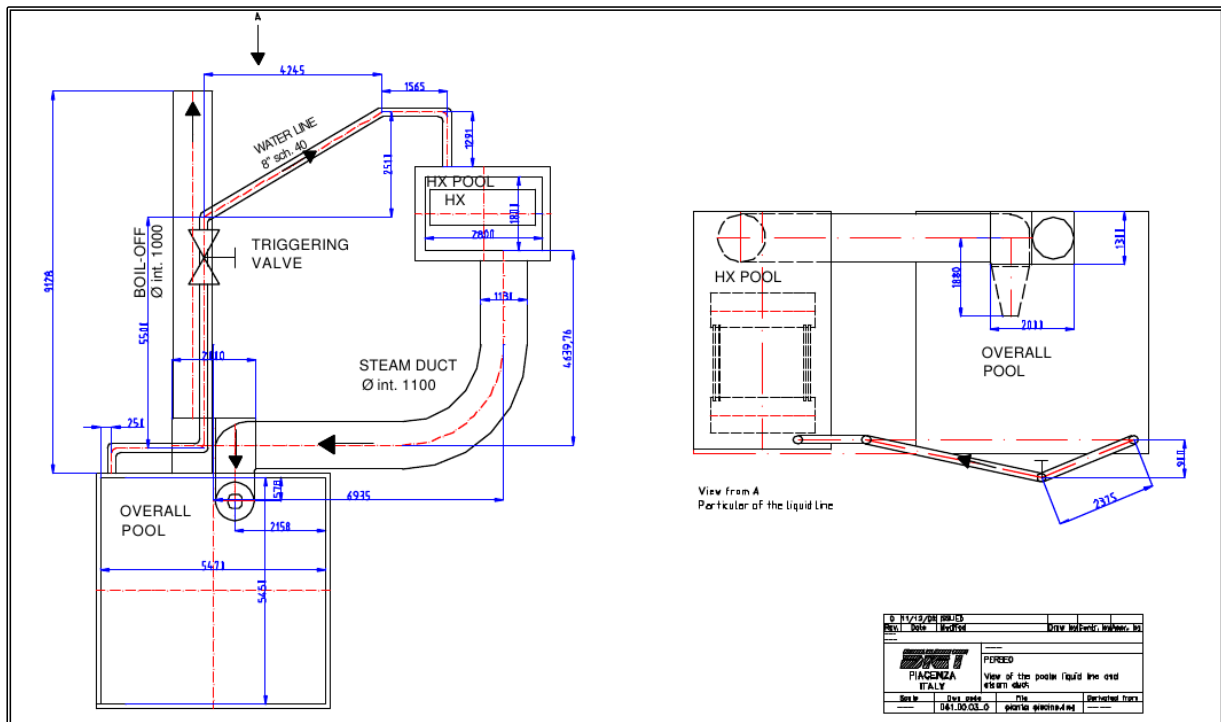


Figura 16: Lay-out dello steam duct e della liquid line tra le due piscine.

6.1 CONFIGURAZIONE DEL CIRCUITO E CONDIZIONI OPERATIVE

I parametri di progetto dell'impianto PERSEO sono riportati nella Tabella 7.

Caratteristiche di progetto dell'impianto PERSEO

Potenza [MW]	20
Pressione del vessel [MPa]	10
Temperatura del vessel [°C]	310
Pressione dello scambiatore di calore [MPa]	8.62
Temperatura dello scambiatore di calore [°C]	302
Portata di vapore surriscaldato [kg/s]	12
Portata di acqua per il de-surriscaldamento [kg/s]	3
Pressione delle piscine [MPa]	0.15
Temperatura della HX Pool [°C]	300
Temperatura della Overall Pool [°C]	130
Portata di acqua per il make up della piscina [kg/s]	25

Tabella 7: Parametri di progetto.

Prima di dar luogo all'esecuzione dei test, vengono imposte al sistema le opportune condizioni iniziali in accordo con quanto previsto dalla stessa matrice dei test sperimentali. In particolare, per il circuito primario, la pressione è mantenuta ad un valore di riferimento

regolando opportunamente la valvola di alimento che porta al vessel il vapore prodotto nella vicina centrale elettrica, mentre il livello di liquido viene controllato scaricando la necessaria portata di condensato dalla drain line posta in fondo al recipiente in pressione. Inoltre, prima dell'avvio dei test, lo scambiatore di calore deve trovarsi pieno di vapore saturo, l'Overall Pool piena di acqua fredda, la HX Pool piena di aria o di vapore in accordo con quanto previsto dalla matrice e la valvola di triggering chiusa.

Una volta raggiunte le adeguate condizioni iniziali, viene aperta la valvola di triggering e la HX Pool inizia a riempirsi con la conseguente condensazione del vapore all'interno dello scambiatore di calore e dunque il trasferimento di energia dal sistema primario al circuito delle piscine. Non appena l'acqua contenuta nella HX Pool si porta in condizioni di saturazione inizia a formarsi vapore che verrà guidato verso la Overall Pool mediante lo steam duct. L'iniettore dello steam duct è immerso per circa 1.3 m all'interno dell'acqua fredda contribuendo così a ridurre la stratificazione termica all'interno dell'Overall Pool. Ovviamente la progressiva condensazione di vapore all'interno di quest'ultima piscina ne determina un progressivo riscaldamento sino al raggiungimento delle condizioni di saturazione. Il vapore prodotto nella Overall Pool fluirà poi verso l'ambiente esterno mediante il boil-off. Non appena l'iniettore si scopre, il vapore prodotto nella HX Pool si muoverà direttamente verso l'ambiente tramite il boil-off e non vi sarà più alcuna condensazione.

Il sistema, mediante la circolazione naturale che si instaura sia nel circuito primario che in quello delle due piscine, è in grado di smaltire la potenza che gli viene conferita dalla vicina centrale elettrica per l'esecuzione del test.

6.2 MATRICE DEI TEST SPERIMENTALI

L'impianto sperimentale PERSEO è stato messo a punto per condurre una serie di test di shake down in modo da poter valutare la correttezza delle procedure operative messe a punto, di caratterizzare i principali parametri del sistema e ancora, più in particolare, lo svuotamento della Overall Pool ed il conseguente riempimento della HX Pool.

La matrice dei test sperimentali di shake down e una breve descrizione degli stessi è mostrata nella Tabella 8 .

PERSEO shake down test matrix		
Test	Principali caratteristiche del test	Descrizione
1	Pressione atmosferica, test condotto a freddo.	Svuotamento della Overall Pool e riempimento della HX Pool con le due piscine scoperte.
2	Pressione atmosferica, test condotto a freddo.	Svuotamento della Overall Pool e riempimento della HX Pool con le due piscine coperte.
3	Pressione nel circuito primario sino ai 6 MPa, test condotto in condizioni di saturazione.	Test in condizioni adiabatiche: pressurizzazione e riscaldamento del circuito primario eseguiti con la HX Pool vuota.
4	Pressione nel circuito primario pari a 4 MPa.	Test integrale.
5	Pressione nel circuito primario sino ai 9 MPa, test condotto a freddo.	Pressurizzazione del circuito primario.

Tabella 8: Matrice dei test di shake down.

Gli altri test, pensati per la validazione del progetto di PERSEO, possono suddividersi in due categorie: integrali e di stabilità. I test integrali mirano a descrivere il comportamento dell'impianto a seguito di particolari condizioni operative e durante tutte le fasi di un transitorio incidentale di lungo corso. Essi vengono eseguiti a due differenti pressioni del

circuito primario: 4 e 7 MPa. I test di stabilità, d'altro canto, sono finalizzati a studiare particolari criticità che si manifestano a seguito dell'improvvisa condensazione all'interfaccia liquido-vapore nell'iniettore o in caso di riapertura della valvola di triggering con conseguente acqua fredda che invade un ambiente in cui è presente vapore.

La matrice dei test sperimentali integrali e di stabilità e una breve descrizione degli stessi è mostrata nella Tabella 9.

PERSEO test matrix		
Test	Principali caratteristiche del test	Descrizione
6	Pressione nel circuito primario pari a 7 MPa.	Test integrale interrotto nella fase iniziale dello svuotamento della piscina.
7	Pressione nel circuito primario pari a 7 MPa.	Test integrale e di stabilità. Riempimento parziale e poi totale della HX Pool con raggiungimento delle condizioni di saturazione e successivo svuotamento della stessa piscina.
8	Pressione nel circuito primario pari a 7 MPa.	Test di stabilità. Riempimento parziale della HX Pool e raggiungimento delle condizioni di saturazione.
9	Pressione nel circuito primario pari a 4 MPa.	Test integrale.

Tabella 9: Matrice dei test integrali e di stabilità.

Le principali operazioni e fasi che caratterizzano un test integrale sono riportate nel seguito:

1. pressurizzazione del sistema primario al valore di riferimento;
2. apertura della valvola di triggering;
3. raggiungimento delle condizioni di saturazione nella HX Pool e nella Overall Pool;
4. diminuzione del livello sino a scoprire l'iniettore;
5. diminuzione del livello a circa 3 m, accelerato dall'apertura della linea di scarico;
6. chiusura della valvola di triggering e svuotamento della HX Pool per ebollizione;
7. depressurizzazione del circuito primario.

Inoltre, quelle che caratterizzano un test di stabilità sono:

1. la HX Pool è piena di aria;
2. pressurizzazione del sistema primario al valore di riferimento
3. apertura della valvola di triggering;
4. chiusura della valvola di triggering quando il livello di liquido nella HX Pool supera il collettore inferiore dello scambiatore di calore;
5. raggiungimento delle condizioni di saturazione e controllo del verificarsi di instabilità dovute alla condensazione;
6. riapertura della valvola di triggering;
7. osservazione della condensazione e di possibili instabilità che si manifestano a causa dell'acqua fredda che si immette nella HX Pool dove è presente vapore.

I test effettuati dimostrano l'efficacia dell'innovativo sistema costituito da PERSEO: la potenza termica viene trasferita dal sistema primario al circuito delle due piscine non appena viene aperta la valvola di triggering, risulta stabile e diminuisce come il livello di liquido nella HX Pool. Il vapore generato nella HX Pool è accelerato nella Overall Pool per mezzo dell'iniettore promuove la circolazione dell'acqua ed evita la stratificazione termica. Le instabilità dovute alla rapida condensazione del vapore, evidenziate dopo un'anticipata interruzione del trasferimento di calore e durante il riempimento della HX Pool per riattivare lo scambio termico, sono contrastate efficacemente dalla valvola del *vacuum breaker* posta in cima alla HX Pool o nello steam duct.

7. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA TRACE

Un codice di sistema è un programma, scritto in un determinato linguaggio di programmazione e compilato in un prescelto sistema operativo, avente per scopo la simulazione del comportamento complessivo, in condizioni stazionarie e transitorie, di un dato sistema complesso, delle sue parti e delle interazioni tra le stesse. Tale codice deve essere pertanto capace di predire quei particolari fenomeni che caratterizzano quella particolare geometria in postulate condizioni stazionarie e transitorie. Tale sistema complesso può essere un reattore nucleare già operativo, un prototipo non ancora costruito, un impianto sperimentale e così via.

Oggi tali codici di sistema, viste le loro capacità predittive, ampiamente studiate e validate negli ultimi anni, sono utilizzati nel processo di "licensing" dei reattori nucleari, nell'analisi di sicurezza, nell'analisi delle condizioni operative e nelle analisi di progetto, nell'analisi d'ottimizzazione del progetto, nel progetto dei reattori passivi, nelle analisi finalizzate all'ottimizzazione delle procedure di emergenza, per il training degli operatori, nelle operazioni di qualifica dei simulatori, nel progetto degli impianti sperimentali, etc.


Il primo codice utilizzato negli Stati Uniti, per le analisi di sicurezza nucleare, fu sviluppato da Westinghouse-Bettis, ed era basato su un approccio "node and branch" in cui in ogni nodo, che rappresentava un "control volume", venivano applicate e risolte le equazioni di conservazione della massa e dell'energia per un fluido monofase, mentre nelle linee di connessione venivano applicate e risolte le equazioni di conservazione della quantità di moto considerando le resistenze della linea; questo codice venne chiamato FLASH.

Nella metà degli anni sessanta, dopo la formulazione da parte di Zuber del "drift flux model", si è verificato un ulteriore sviluppo dei codici e, verso l'inizio degli anni settanta, l'USNRC supportò lo sviluppo di codici destinati all'analisi dei fenomeni che si destavano in transitori susseguenti a un evento di tipo LOCA. In questo contesto i codici RAMONA, RELAP5, TRAC-BWR e TRAC-PWR sono stati riconosciuti come i codici avanzati che sarebbero stati utilizzati per studiare il comportamento dei reattori LWR.

Il codice RELAP5 offre una rappresentazione monodimensionale del campo di moto nelle analisi degli LWR. Questo codice, al fine di realizzare anche simulazioni neutroniche utilizza una cinetica puntiforme. Il codice TRAC-P, utilizzato in modo particolare per i LBLOCA, offre un campo di moto multidimensionale nelle analisi dei PWR. Il codice RAMONA produce un campo di moto monodimensionale. Al fine di realizzare delle simulazioni neutroniche utilizza una cinetica tridimensionale. Il codice TRAC-B produce una dettagliata rappresentazione del campo di moto nelle analisi dei BWR.

Negli ultimi anni NRC sta sviluppando un moderno avanzato codice "best estimate" unendo le capacità dei precedenti codici, RAMONA, RELAP5, TRAC-PWR e TRAC-BWR.

Tale codice è il TRAC/RELAP Advanced Computational Engine (TRACE) ed è usato per studiare situazioni incidentali di LWR quali transitori operazionali, LOCA e caratterizzare i fenomeni che si destano negli impianti sperimentali atti a simulare il comportamento

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 - 067	1	L	28	43

termoidraulico di reattori nucleari in condizioni stazionarie e tempo dipendenti. Il TRACE [9] è un codice a volumi finiti, a due fluidi con capacità di simulazione tridimensionali. La Tabella 10 riportata in seguito consente di avere una panoramica generale su tutti i componenti utilizzati nel codice TRACE. Si sottolinea la presenza di un componente chiamato vessel, che permette, in particolare, un'analisi tridimensionale del core del reattore.

BREAK	Models pressure boundary conditions at the terminal junction of any 1D hydraulic component. Also specifies fluid properties for inflow from a boundary, for example, the containment building.
CHAN	Models a BWR fuel bundle or collection of fuel bundles
CONTAN	Models a reactor containment
EXTERIOR	Models a component that is non-existent in the current input file but does exist in another input file being run on a different processor. This component is only applicable to ECI-enabled simulations
FILL	Models mass flow/velocity boundary conditions at the terminal junction of any 1D hydraulic component. Also specifies fluid properties for inflow from a boundary, for example, for feedwater flow.
FLPOWER	Models power generated directly by the fluid. It was added to TRACE primarily to support accelerator transmutation of waste applications, but it can also be used to model the fluid work term of break flow into the containment.
HEATR	Models a feedwater heater or condenser
HTSTR	Models a solid cylinder, slab, or hemisphere for which the temperature distribution is to be computed. Most frequently used to model fuel rods and structural hardware inside a vessel and steam generator.
REPEAT-HTSTR	A user-convenience component designed to simplify the input requirements for the HTSTR component.
JETP	Models a BWR jet pump or collection of jet pumps
PIPE	Models flow in a 1D pipe or duct with direct energy deposition in the fluid or from the walls of the pipe. Serves as a general connector between components to model a system or parts of other structures such as a steam-generator and reactor-vessel down-comer. May be used to model pressurizers or accumulators.
PLENUM	Models a large volume connected to an arbitrary number of 1D hydraulic components. A singlecell component that acts like a momentum sink or a convector of momentum in one direction only
POWER	Models the power deposited/generated in solid structures (i.e., HTSTR components)
PRIZER	Models a PWR pressurizer in one dimension. Recommended for modeling the heater/ sprayer section of a pressurizer.
PUMP	Models the one-dimensional interaction of a fluid with a centrifugal pump that includes two-phase effects.
RADENC	Models radiation between two surfaces SEPD Models TEE-like geometry with a coolant
TEE	Models flow in two one-dimensional pipes or ducts and their common junction. Models either direct energy deposition in the fluid or through the walls of the pipe. Serves as a general connector between components where a 3-way branch capability is needed.
TURB	Models a single stage of a turbine device which extracts energy from the working fluid and produces power. A multistage turbine is modeled by coupling multiple TURB components.
VALVE	Models the flow through a one-dimensional pipe with the feature of an adjustable flow area. May be used to model various types of valves in both PWRs and BWRs, e.g., check, trip-controlled, and controller-activated valves.
VESSEL	Models a PWR vessel and its internals in Cartesian or cylindrical geometry and in one, two, or three dimensions. May be used to model any vessel-like structure in three dimensions but most applicable to the vessel of a nuclear reactor or a test facility modeling a nuclear reactor.

Tabella 10: Componenti utilizzati nel codice TRACE.

8. DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO PERSEO

La nodalizzazione TRACE dell'intero impianto sperimentale PERSEO è stata sviluppata dal gruppo di ricerca del Dipartimento DEIM dell'Università di Palermo ed è riportata nella Figura 17. La modellazione dei vari componenti che costituiscono il circuito primario e quello secondario, delle logiche di intervento e di regolazione è basata sui dati progettuali contenuti nel rapporto "PERSEO Project experimental data report", [8].

Per la simulazione dell'impianto sono stati utilizzati 58 componenti idraulici, 71 strutture termiche e 80 sistemi di controllo. La valutazione dei fattori di perdita di carico, sia distribuita che concentrata (gomiti, restringimenti, allargamenti, etc..) e necessari per una realistica riproduzione della distribuzione di pressione nell'impianto è stata eseguita laddove si conosce esattamente la configurazione geometrica del componente d'interesse [8],[10].

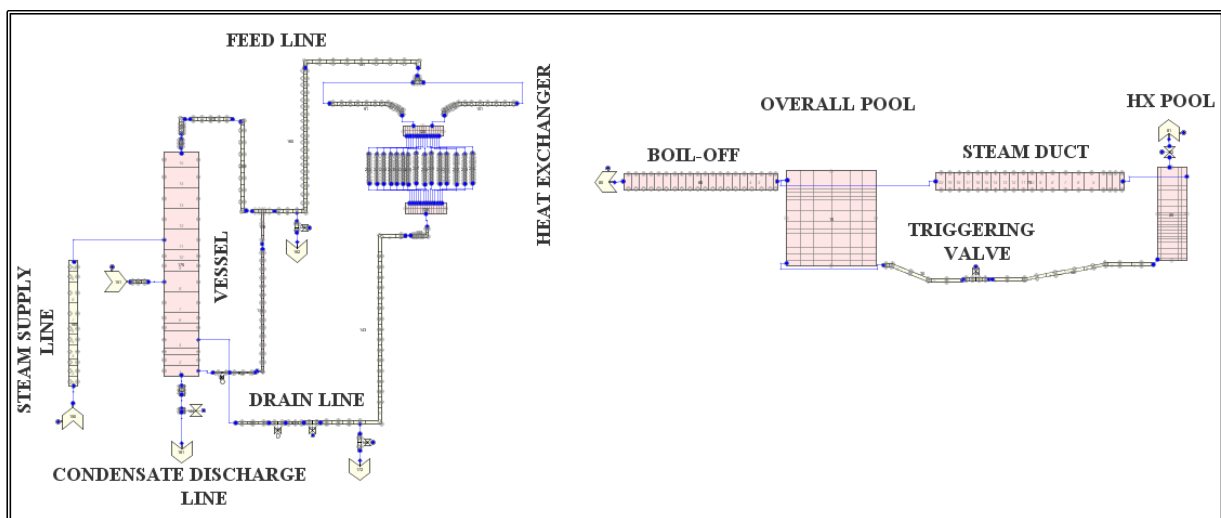


Figura 17: Vista generale della nodalizzazione TRACE di PERSEO.

Grazie all'esperienza maturata ([11],[12],[13]), si è deciso di utilizzare diversi modelli teorico-numeriche resi disponibili all'interno del codice TRACE e capaci di simulare in maniera più realistica alcuni particolari fenomeni fisici [6]. Ad esempio, per tutti i componenti verticali, 1-D e 3-D, si è adottato il modello del "level tracking" capace di localizzare, in maniera efficace, l'esatta localizzazione dell'interfaccia liquido-vapore, ove presente; tale modello ha come maggior pregio quello di sopperire agli errori che potrebbero insorgere per via di una discretizzazione che impiega volumi di controllo relativamente grandi.

8.1 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO

Il sistema primario è composto principalmente dal recipiente in pressione e dallo scambiatore di calore nonché da tutte le linee di servizio. La modellazione del sistema è stata fatta prevalentemente con componenti di tipo "PIPE", i quali consentono una descrizione monodimensionale del moto e ove necessario, sono stati utilizzati componenti "TEE", che simulano un moto pseudo-2D nelle giunzioni nelle quali si ha l'incrocio tra due tubazioni e componenti "VESSEL" che permettono una descrizione del moto 3D. Ad ogni componente è stata associata una o più strutture termiche (HEAT STRUCTURE) in modo tale da rispettare tutte le masse metalliche presenti nell'impianto.

8.1.1 RECIPIENTE IN PRESSIONE

Il recipiente in pressione (vedi Figura 18) è stato descritto utilizzando due componenti PIPE, uno che discretizza il riser e a cui si attacca la steam supply line ed un altro che modella il vessel vero e proprio e dalla cui sommità esce la feed line. Il PIPE utilizzato per discretizzare il riser è suddiviso in 10 livelli assiali, mentre quello relativo al vessel ne presenta 15. L'estremità verticale dell'ottavo livello assiale, nel PIPE che simula il vessel, rappresenta la quota relativa al livello di liquido saturo contenuto nel recipiente in pressione.

La linea di by-pass dello scambiatore di calore è stata pure modellata, in particolare si è fatto ricorso al componente TEE per discretizzare l'innesto nella feed line e al componente PIPE per la simulazione della linea in quanto tale, per un totale di 22 volumi.

La linea di scarico del condensato, che fuoriesce dal vessel è stata modellata attraverso un componente PIPE e una VALVE connessa ad un componente BREAK che simula l'ambiente in cui avviene lo scarico del liquido; in questo caso la nodalizzazione presenta 5 volumi. Il modello del recipiente in pressione è stato provvisto delle necessarie HEAT STRUCTURE per la simulazione delle masse metalliche e più specificatamente per lo scambio termico verso l'ambiente circostante.

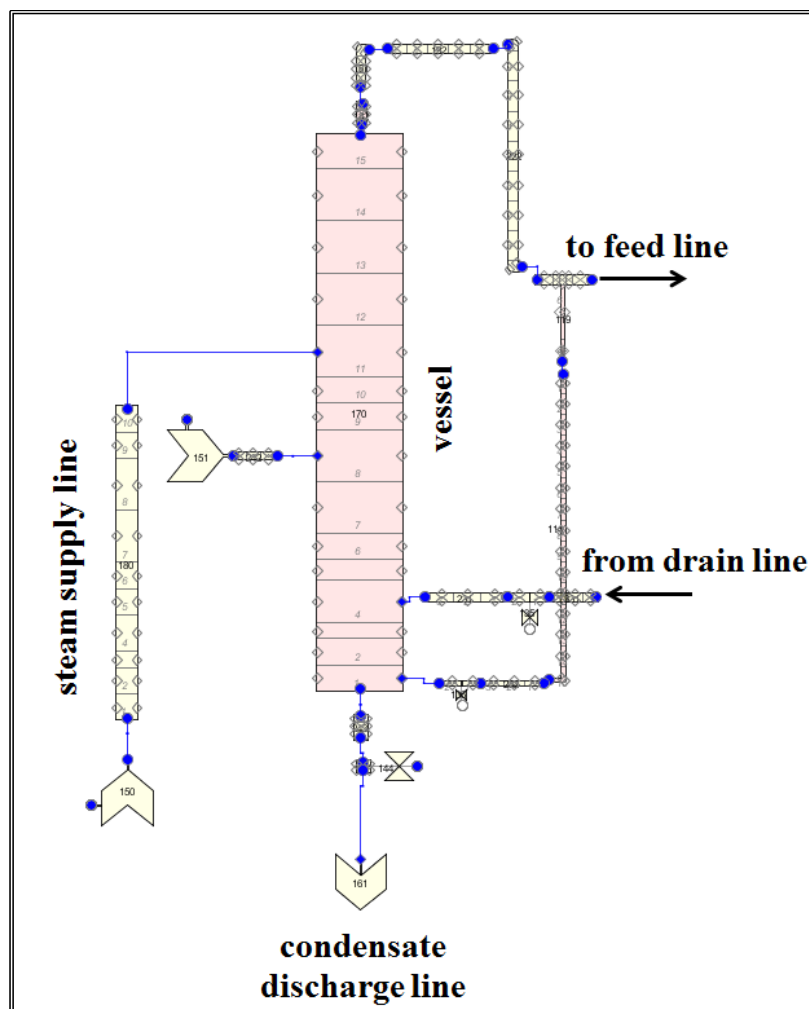


Figura 18: Recipiente in pressione.

8.1.2 SCAMBIATORE DI CALORE

La feed line, che porta il vapore dal recipiente in pressione allo scambiatore inserito nella HX Pool, è stata modellata in tutte le sue parti utilizzando 8 PIPE ed un componente TEE per un totale di 95 volumi. Il vapore è fatto fluire simmetricamente verso le estremità del collettore superiore mediante una biforcazione nella linea che è stata ugualmente simulata nel modello. I due collettori sono stati discretizzati utilizzando il componente VESSEL e presentano la medesima nodalizzazione nelle tre dimensioni, ovvero: due livelli assiali, uno solo lungo la direzione trasversale e 17 lungo quella longitudinale. I 200 tubi dello scambiatore di calore sono simulati da 15 PIPE, ognuno rappresentativo degli otto tubi presenti per fila. La drain line, da cui fluisce il condensato proveniente dallo scambiatore di calore, è stata modellata utilizzando 4 PIPE e 2 VALVE per un totale di 39 volumi. Lo scambio termico con il fluido presente nella HX Pool è stato simulato mediante 19 HEAT STRUCTURE. Ad ogni VESSEL simulante uno dei collettori sono state associate due strutture termiche: i due livelli assiali presenti nel componente comunicano termicamente con altrettanti livelli del modello della HX Pool. Ogni PIPE è connesso termicamente con l'opportuna regione del componente simulante la piscina mediante una struttura termica equivalente agli 8 tubi che ciascun PIPE dello scambiatore modella. Il modello dello scambiatore di calore è mostrato in Figura 19, mentre quelli della feed line e della drain line nelle Figura 20, Figura 21, rispettivamente.

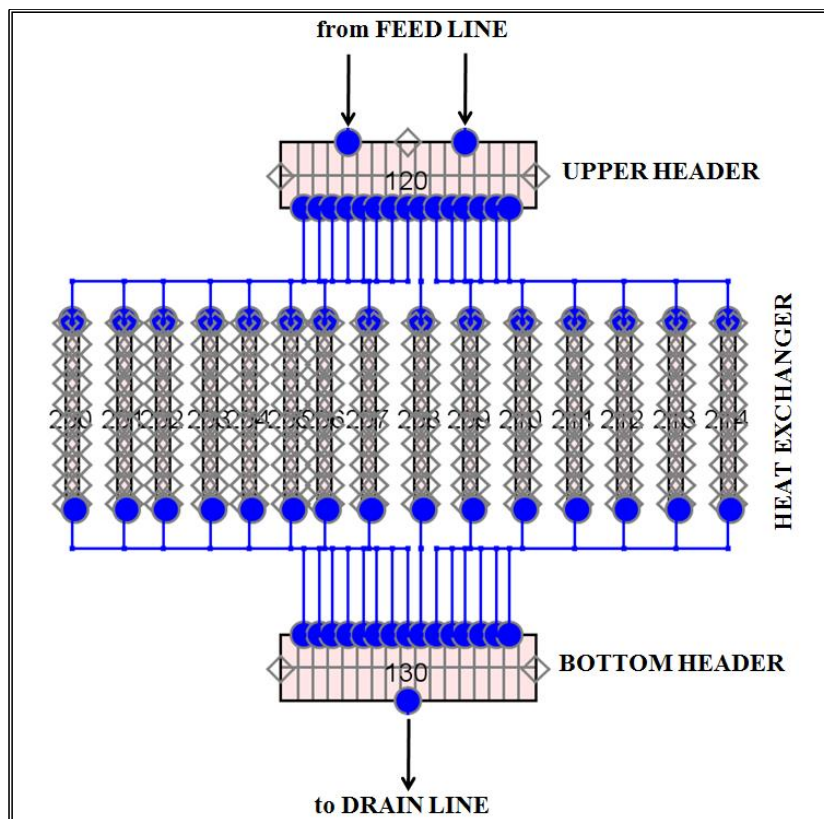


Figura 19: Modello dello scambiatore di calore.

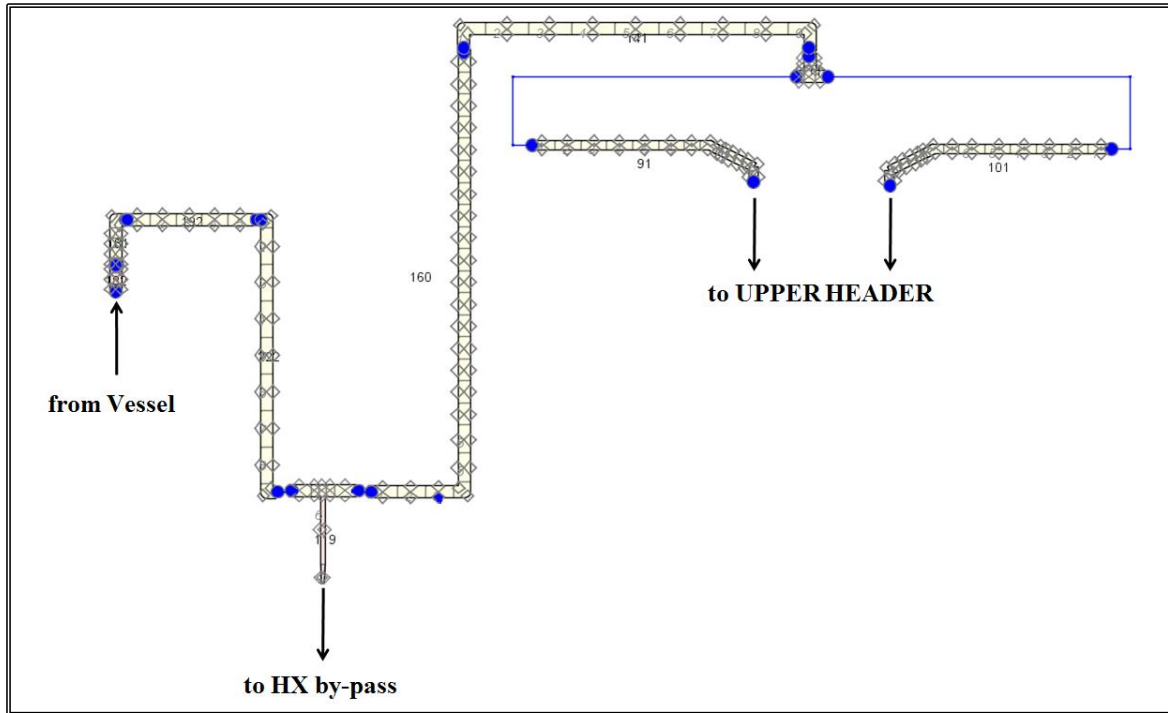


Figura 20: Modello della feed line.

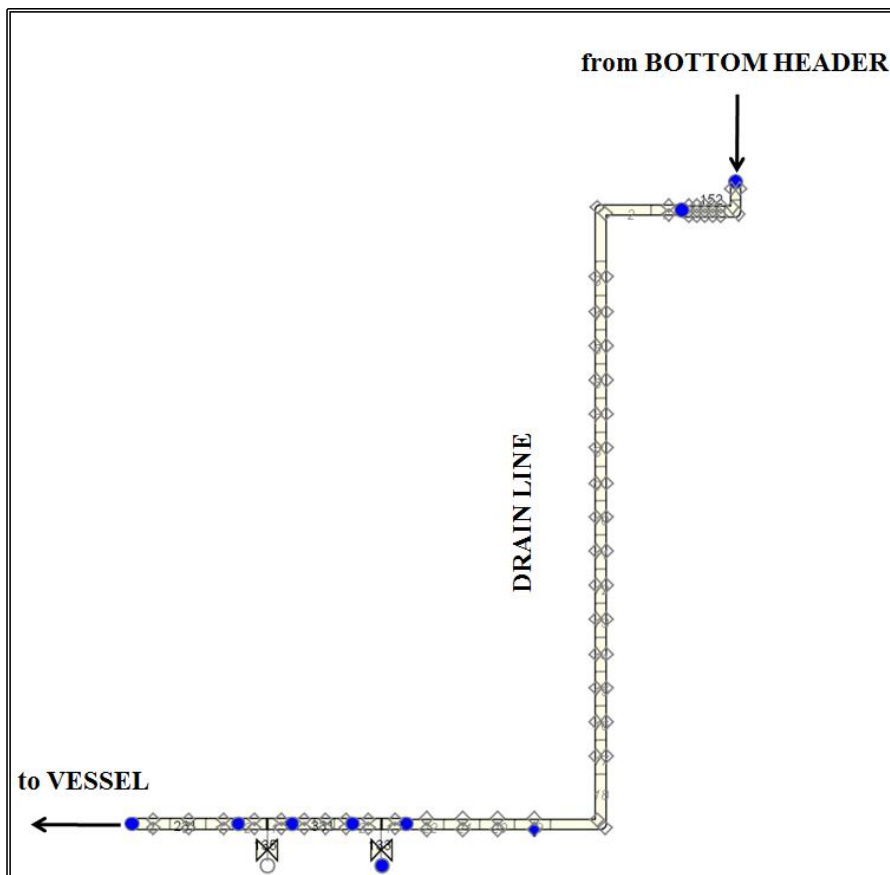


Figura 21: Modello della drain line.

8.2 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA COSTITUITO DALLE PISCINE

Il modello del sistema composto dalle due piscine, che rappresenta l'ultimo pozzo termico di PERSEO, è stato realizzato a partire dai dati reperibili in [8] e comprende l'Overall Pool, la HX Pool, lo steam duct, il boil-off, ovvero la linea di connessione inferiore delle due piscine attraverso cui fluisce l'acqua fredda durante il riempimento della HX Pool; in Figura 3-6 è mostrata la nodalizzazione di tale sistema.

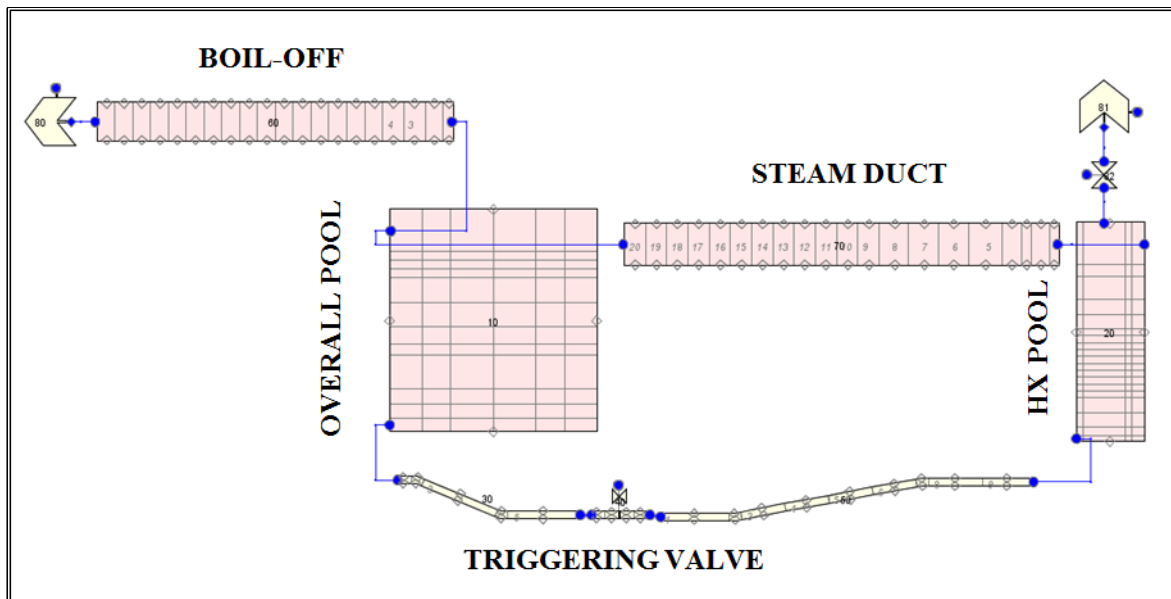


Figura 22: Modello delle piscine e delle linee di connessione.

Il modello della Overall Pool è stato realizzato mediante un VESSEL suddiviso in 12 livelli assiali, 6 livelli trasversali e 4 longitudinali per un totale di 288 volumi. Il volume totale, ovvero quello a disposizione del liquido, nel modello della piscina è stato ridotto per tenere conto dell'ingombro costituito da uno scambiatore di calore in funzione nell'impianto PANTHERS di cui PERSEO è il riadattamento e che, nella campagna sperimentale in esame, è disattivato. Lo scambio termico con l'ambiente esterno è stato simulato utilizzando 20 HEAT STRUCTURE, due per ciascun livello nelle quali sono state suddivise le dimensioni longitudinale e trasversale. La discretizzazione della HX Pool si è avvalsa anche del componente VESSEL e presenta un totale di 684 volumi suddivisi in 19 livelli assiali, 4 trasversali e 9 longitudinali. Allo stesso modo del modello della Overall Pool, anche qui il volume idraulico disponibile al fluido è stato ridotto per tenere in conto l'ingombro dello scambiatore di calore e le sezioni della feed line (in alto) e della drain line (in basso), che vi ricadono all'interno. Con lo stesso criterio adottato per il modello dell'altra piscina, lo scambio termico verso l'esterno è stato modellato per mezzo di 26 HEAT STRUCTURE. Ovviamente, gli appropriati volumi idraulici della HX Pool costituiranno la condizione al contorno esterna per quelle strutture termiche che simulano le pareti dello scambiatore di calore. La linea di connessione posta nella parte inferiore delle due piscine, nota come liquid line, è stata simulata per mezzo di 2 PIPE per un totale di 14 volumi, mentre si è fatto uso del componente VALVE, discretizzato con 4 volumi, per la simulazione della triggering valve. Lo steam duct costituisce, come già visto nella descrizione dell'impianto sperimentale, il collegamento superiore tra le due piscine ed è stato modellato con un PIPE da 20 volumi fino all'iniettore la cui geometria a tronco di cono, si veda Figura 23 è stata invece modellata nei volumi all'interno della Overall Pool, Figura 24.

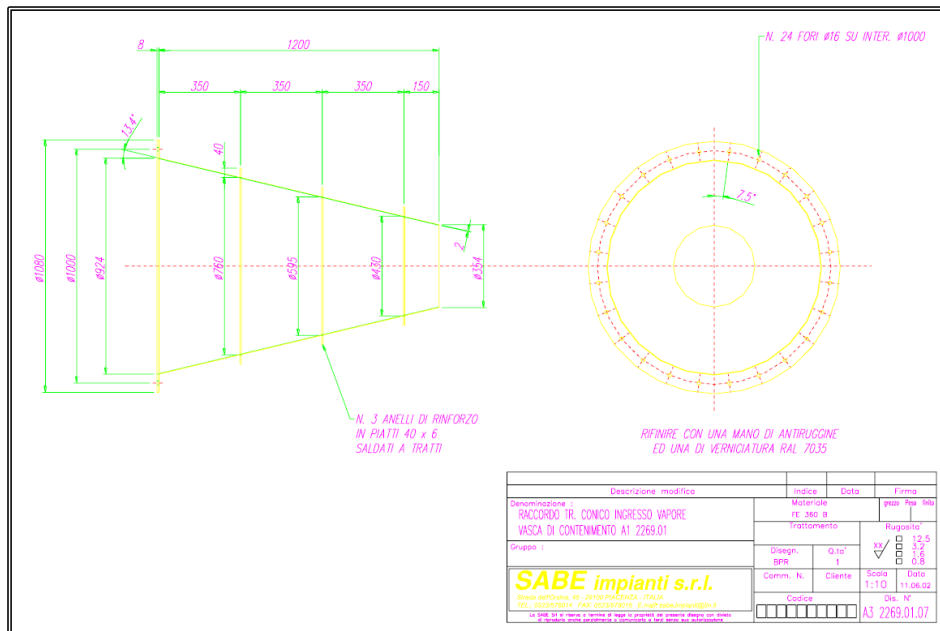


Figura 23: Particolare della geometria dell'iniettore.

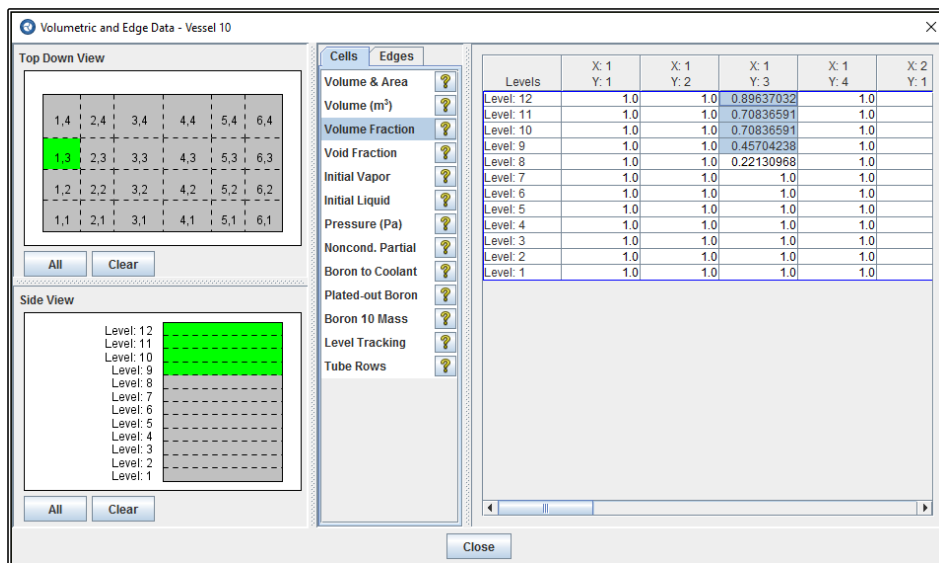


Figura 24: Particolare dei volumi simulanti l'iniettore.

Il Boil-off è stato modellato per intero attraverso un PIPE da 20 volumi e rappresenta l'unica via di connessione dell'intero sistema delle due piscine con l'ambiente esterno simulato tramite un BREAK.

9. ANALISI PRELIMINARI

Allo scopo di studiare la robustezza del modello di calcolo descritto nel precedente capitolo sono stati analizzati due diversi scenari. Il primo scenario consiste nel test 2 della matrice dei test sperimentali, si tratta di un test di shake down pensato per valutare la correttezza delle procedure operative messe a punto in fase progettuale, caratterizzare i principali parametri del sistema e ancora, più in particolare, lo svuotamento della Overall Pool ed il conseguente riempimento della HX Pool.

Il test viene condotto a pressione atmosferica, a freddo e coinvolge solo il circuito delle due piscine senza interessare il lato primario. È volto a caratterizzare lo svuotamento della Overall Pool e il conseguente riempimento della HX Pool, nonché le oscillazioni della portata di liquido tra le due piscine, osservabili nella linea di collegamento inferiore. L'esperimento viene condotto con le piscine coperte e ciò ha consentito di studiare la velocità di riempimento della HX Pool quando si manifesta l'effetto sifone nello steam duct, assente nel caso del riempimento effettuato con le piscine scoperte (test 1). Il test inizia con l'apertura della triggering valve che dura 17 s e termina quando il livello di liquido in entrambe le piscine si assesta intorno ai 3.75 m. Si fa osservare che il livello della HX Pool si mantiene più alto rispetto a quello della Overall Pool e questo potrebbe essere attribuito all'effetto sifone che si ha nell'iniettore dello steam duct. Nella simulazione numerica tale effetto è scarsamente apprezzabile e i due livelli tendono a coincidere; per una più accurata indagine del fenomeno occorrerebbe conoscere lo stato operativo delle valvole poste sulla sommità della HX Pool, ovvero delle condizioni iniziali. In Figura 25 è mostrato l'andamento sperimentale dei livelli, mentre nella Figura 26 si possono osservare i due livelli ottenuti mediante la simulazione con il codice di calcolo TRACE.

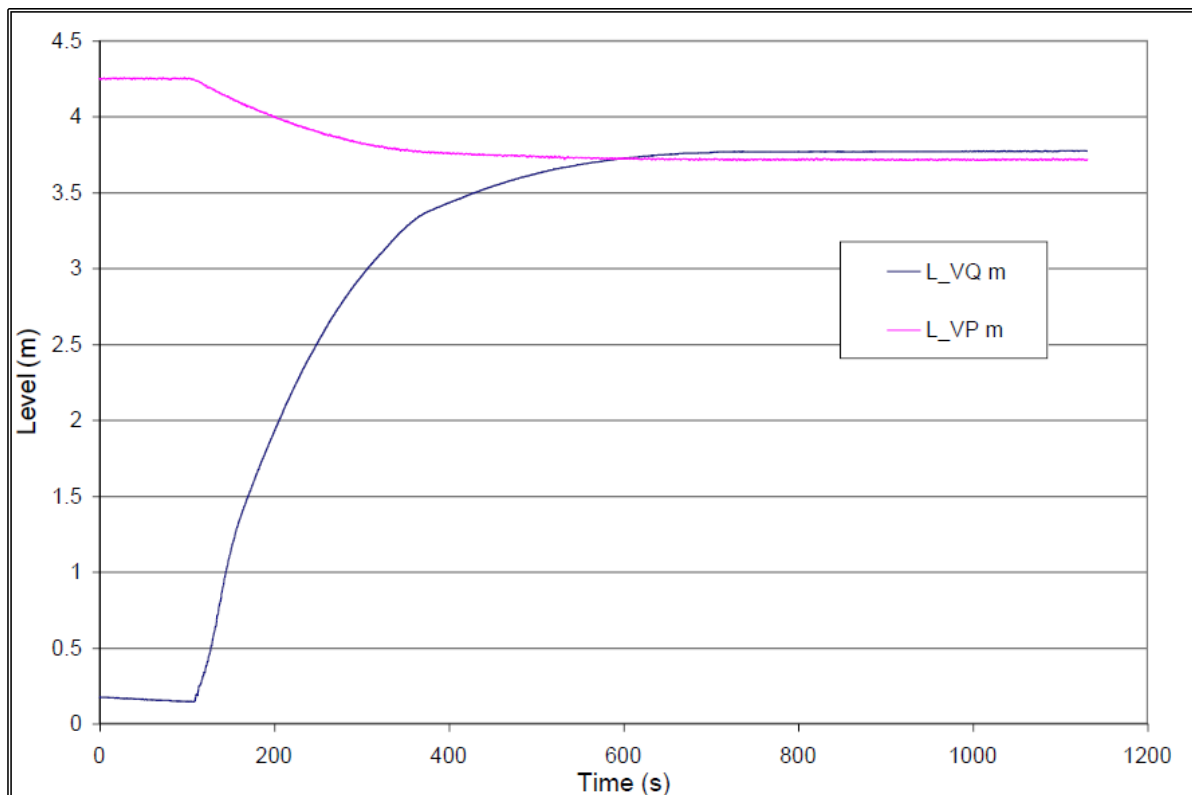


Figura 25: Andamento sperimentale dei livelli di liquido nelle piscine.

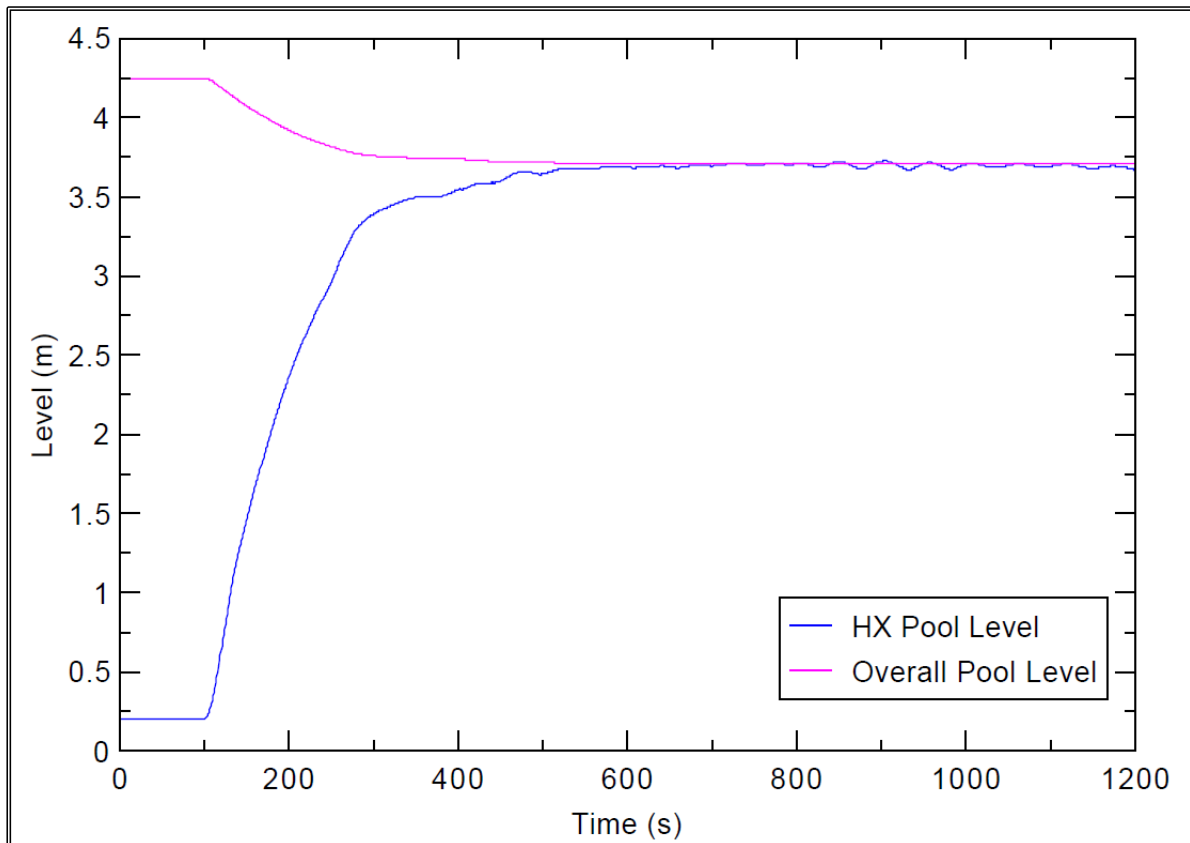


Figura 26: Andamento simulato dei livelli di liquido nelle piscine.

Successivamente, con l'intento di valutare l'accuratezza nella simulazione dello scambio termico tra il vapore che fluisce nello scambiatore di calore e il fluido contenuto nella HX Pool, si è deciso di simulare una particolare fase del test 6 previsto dalla matrice dei test. Si tratta, in questo caso, di un test integrale pensato per descrivere il comportamento dell'impianto a seguito di particolari condizioni operative e durante tutte le fasi di un transitorio incidentale di lungo corso.

Il test in esame può pensarsi suddiviso in 4 fasi principali, di seguito riportate:

1. fase preliminare: riscaldamento dell'aria contenuta nella HX Pool e successivo svuotamento dello scambiatore di calore;
2. fase di avvio: apertura della valvola di triggering e inseguimento della pressione per mantenerla a 7 MPa secondo quanto previsto per il test;
3. fase di verifica dello scambio termico: in questa fase si dimostra la validità del progetto PERSEO come sistema per la rimozione del calore residuo, tale fase si protrae oltre il raggiungimento delle condizioni di saturazione nella HX Pool e nella Overall Pool;
4. fase conclusiva: diminuzione del livello nella Overall Pool sino a scoprire l'iniettore.

La fase del test simulata mediante il codice TRACE consiste in quella di verifica dello scambio termico, più in dettaglio si tratta di tutta la fase temporale che va dal momento in cui si raggiungono le condizioni di saturazione in entrambe le piscine al momento in cui inizia lo svuotamento delle stesse. Ciò ha consentito lo studio dello scambio termico tra il primario, ovvero tra il vapore che fluisce all'interno dello scambiatore, e il fluido contenuto nella HX

Pool in assenza di gas incondensabile che, per le semplificazioni adottate dai modelli implementati nel codice, generano forti oscillazioni numeriche che appesantiscono l'onere computazionale, come del resto può osservarsi anche nei risultati mostrati in [14].

In Tabella 11 sono riportate le condizioni sperimentali che caratterizzano tale fase e i valori ottenuti attraverso la simulazione numerica.

PERSEO Test 6 @ fase 3		
Grandezza	Valore Sperimentale	Risultato
Pressione nel circuito primario [MPa]	~7.00	~7.00
Livello nell'Overall Pool [m]	~4.25	4.25
Livello nella HX Pool [m]	~2.75	2.75
Temperatura del fluido nelle due piscine [K]	~374.30	373.15
Portata di vapore nella feed line [kg/s]	~11.70	11.70
Portata di condensato nella drain line [kg/s]	~11.70	11.70
Potenza scambiata [MW]	~17.00	~17.00

Tabella 11: Principali grandezze caratterizzanti la fase esaminata.

Per poter simulare la potenza sperimentalmente scambiata dal sistema primario di PERSEO, è stato necessario modificare le strutture termiche dello scambiatore, ovvero supporre un fattore d'incrostazione delle pareti che consentisse di ottenere il valore riportato in Tabella 11. Un simile intervento sulle strutture termiche è stato messo a punto in un altro lavoro reperibile in letteratura [15]; in tale lavoro, dove sono stati simulati i test 7 e 9 della matrice dei test riportata in Tabella 9, per correggere la simulazione dello scambio termico viene opportunamente modificato il diametro riscaldato delle strutture termiche; più precisamente, quest'ultimo viene fatto variare a seconda del test simulato [15].

Nella Figura 27 viene riportato l'andamento sperimentale della pressione misurata nell'upper header dello scambiatore di calore, mentre a seguire viene mostrato il risultato ottenuto dalla simulazione, Figura 28.

Nella Figura 29 viene riportato l'andamento sperimentale della potenza scambiata dal circuito primario verso quello costituito dalle due piscine, mentre la Figura 30 mostra l'andamento simulato della medesima grandezza.

L'asse dei tempi, in entrambe le figure che riportano i risultati ottenuti dalla simulazione, è stato opportunamente scalato per rendere più agevole il confronto con i dati sperimentali. La fase temporale simulata, che va dal momento in cui si raggiungono le condizioni di saturazione in entrambe le piscine al momento in cui inizia lo svuotamento delle stesse, va sperimentalmente da circa 3900 s ai 4400 s.

Con il modello messo a punto, note che siano alcune informazioni relative al sistema di regolazione della pressione nel circuito primario, ovvero le condizioni operative del vacuum breaker e consapevoli delle problematiche cui si va incontro per la presenza di gas incondensabili, sarà possibile dar luogo ad una campagna di simulazioni volta a stabilire la capacità predittiva del codice TRACE nella simulazione di particolari fenomenologie di scambio termico e, se si procede alla simulazione dei test 7 e 9 della matrice riportata in Tabella 9, realizzare un benchmark numerico che coinvolga oltre ai dati sperimentali, i risultati ottenuti mediante altri codici termoidraulici quali CATHARE e RELAP5 [14],[15],[16].

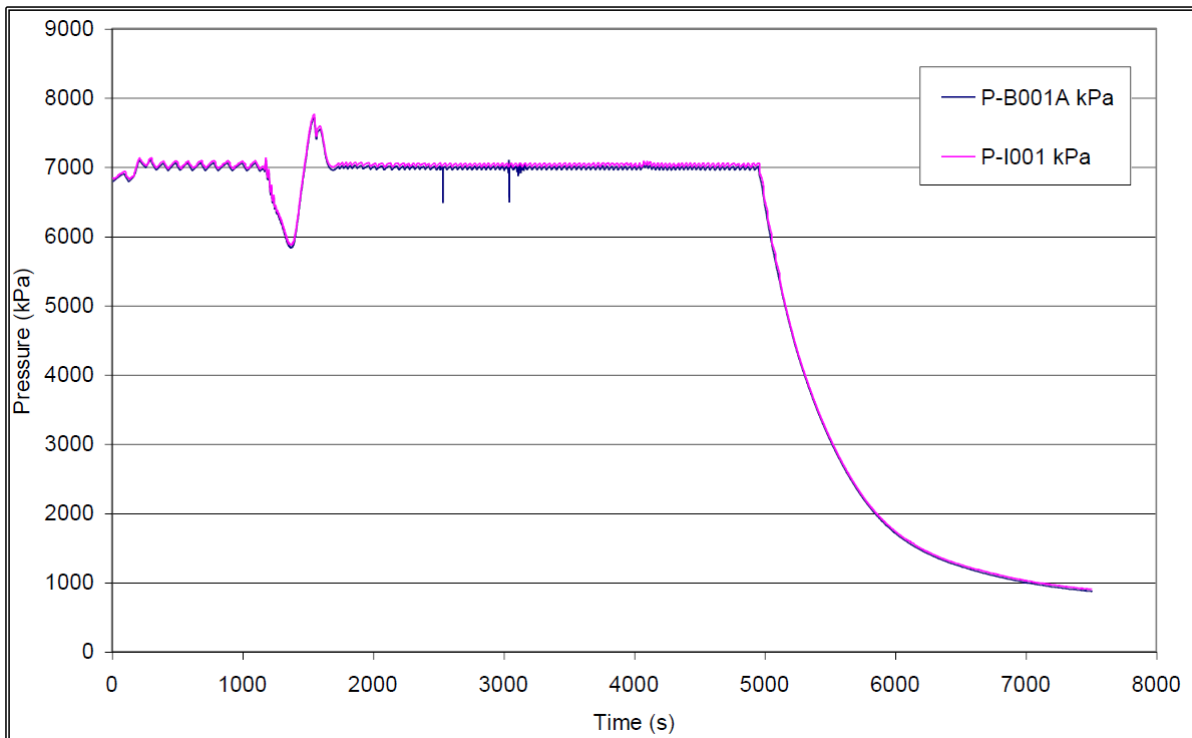


Figura 27: Andamento sperimentale della pressione nel circuito primario.

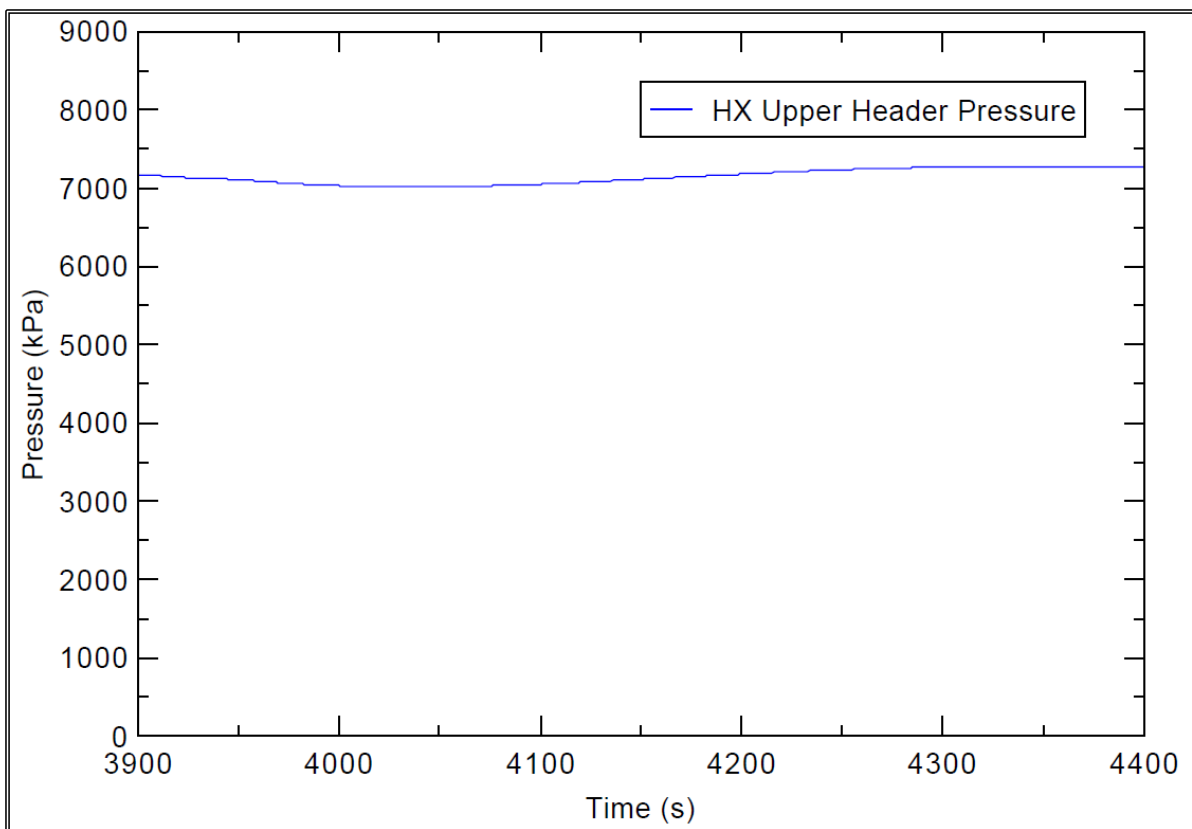


Figura 28: Andamento simulato della pressione nel circuito primario.

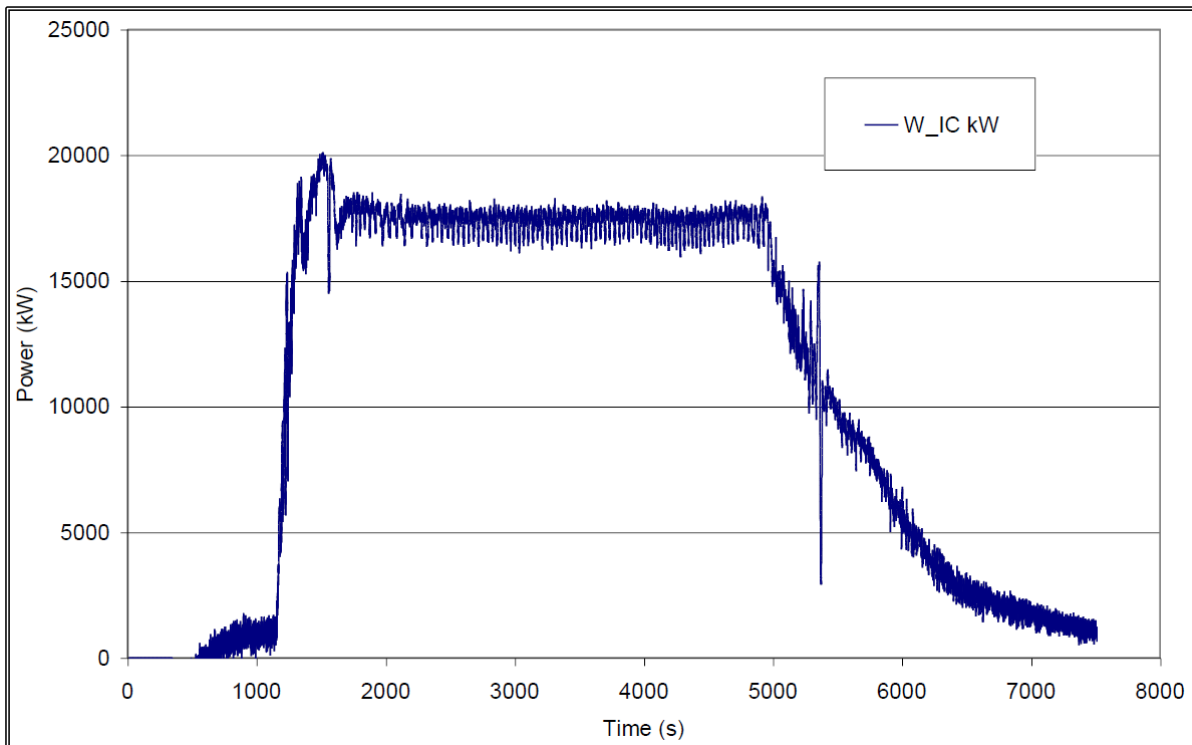


Figura 29: Andamento sperimentale della potenza scambiata dal primario.

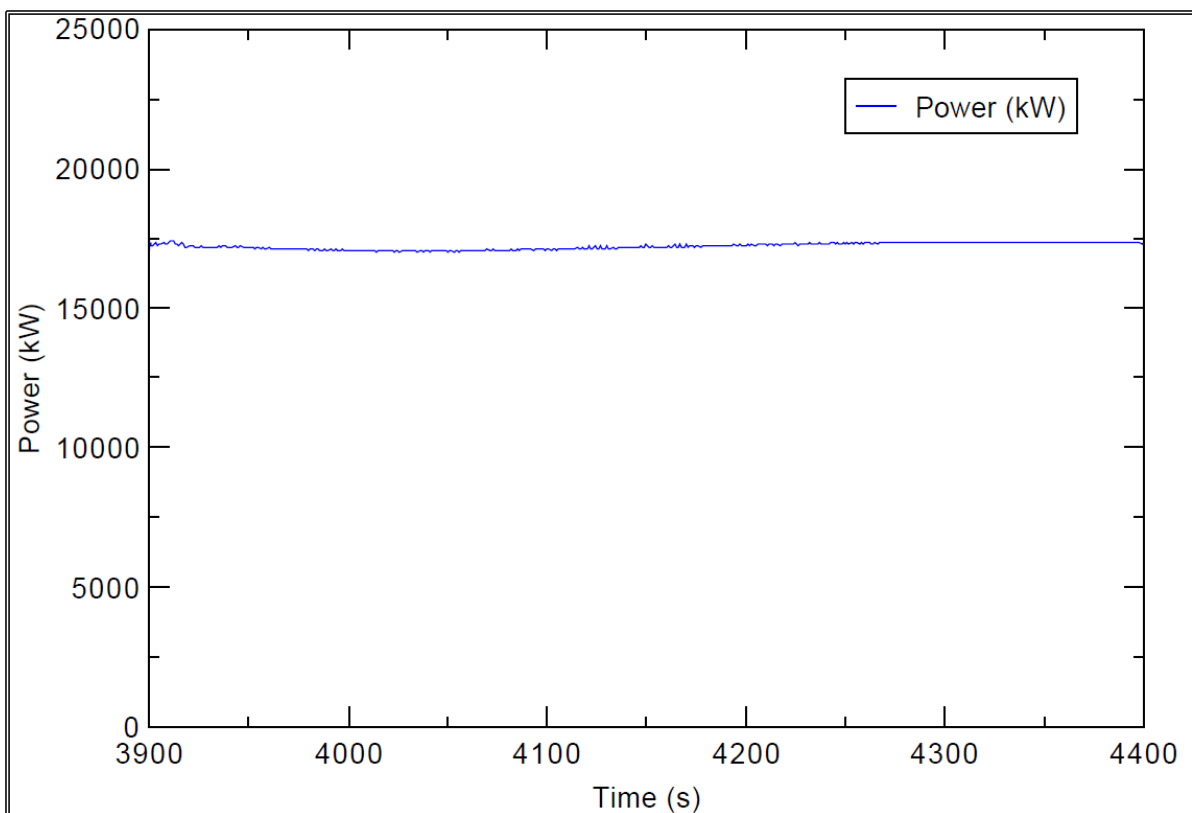


Figura 30: Andamento simulato della potenza scambiata dal primario.

10. CONCLUSIONI

Nel presente rapporto tecnico viene presentato il lavoro svolto nel corso della terza annualità dell'obiettivo C (SPERIMENTAZIONE E CALCOLO IN APPOGGIO AGLI STUDI SULLA SICUREZZA) della Linea Progettuale 1 (Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare) nel corso della seconda annualità dell'AdP ENEA-MSE.

In esso vengono presentate le migliori apportate al modello CATHARE dell'impianto sperimentale SPES-2 sviluppato da ENEA sulla base delle conclusioni presentate in [3]. Nel nuovo modello il downcomer anulare DWC_ANN, già nodalizzato con l'elemento 3D, è stato rimeschato sulla base dei consigli avuti dagli sviluppatori del codice durante l'ultimo CATHARE Users' CLUB, il noding della piscina che rappresenta l'IRWST è stato modificato per consentire di descrivere al meglio il fenomeno della circolazione naturale che in essa si viene ad instaurare. Tale modello è stato utilizzato per la simulazione di un transitorio incidentale del tipo LOCA.

Esso viene originato da una rottura di 2" sulla DVI che collega i sistemi di emergenza del loop B al downcomer anulare. I risultati dell'analisi condotta messi al confronto con i dati ottenuti dalla stessa simulazione effettuata con il vecchio noding della facility e con i dati sperimentali hanno permesso di mettere in luce la migliorata capacità del modello CATHARE di descrivere il comportamento dell'impianto in condizioni incidentali: nonostante ciò, dall'esame dell'andamento della portata che fluisce dentro al PRHR (che consente di asportare il calore residuo di decadimento dal circuito primario) si nota come qualche centinaia di secondi dopo l'intervento di tale sistema permanga il fenomeno del blocco della circolazione naturale. Ciò potrebbe essere imputabile alla difficoltà, riscontrata nel codice CATHARE, di cambiare il valore della rugosità interna dei tubi: tale variabile essendo utilizzata per il calcolo delle perdite di carico distribuite influisce fortemente sull'innesco della circolazione naturale.

Il DEIM dell'Università di Palermo ha realizzato un modello di calcolo per il codice TRACE dell'impianto sperimentale PERSEO.

La nodalizzazione messa a punto ricalca realisticamente le caratteristiche dell'impianto e di tutti i principali componenti e la sua robustezza è stata dimostrata dalle analisi preliminari. Sarebbe auspicabile, prima di procedere al lavoro di verifica e validazione del codice TRACE sulla campagna sperimentale condotta dalla SIET sull'impianto PERSEO, provvedere a colmare la mancanza di informazione relativa ai sistemi di controllo installati nel circuito primario e alle condizioni operative di alcune valvole poste sulla sommità della HX Pool. Si tratta di integrare il rapporto tecnico [8] con uno relativo ad una più accurata descrizione geometrica dell'impianto e degli strumenti di misura installati in PERSEO e un altro nel quale sia descritta la logica dei sistemi di controllo che agiscono sul sistema.

Allo scopo di testare le capacità predittive del codice TRACE nella simulazione di particolari fenomenologie di condensazione, sulla base dei dati sperimentali disponibili, si pensa di procedere alla simulazione dei test 7 e 9 in modo tale da mettere a punto un benchmark che coinvolga oltre ai dati sperimentali, i risultati ottenuti mediante altri codici termoidraulici [14], [15], [16].


Come già osservato nei precedenti lavori, la presenza di gas incondensabile a pressioni prossime a quella atmosferica fa sì che le simulazioni siano affette da instabilità numeriche che rendono difficoltoso il procedere del calcolo computazionale. Tuttavia, tali difficoltà si manifestano soltanto nelle prime fasi dei test sperimentali e possono superarsi aumentando l'onere computazionale della simulazione.

ABBREVIAZIONI

ACC	Accumulatore
ADS	Automatic Depressurization System
CDL	Condensate Discharge Line
DBE	Design Basis Events
CL	Cold Leg
CMT	Core Make-up Tank
CVCS	Chemical and Volume Control Systems
DBE	Design Basis Events
DC	Downcomer
DC-UH	Downcomer-Upper Head
DEIM	Dipartimento Energia, dell'Informazione e Modelli Matematici
DL	Drain Line
DVI	Direct Vessel Injection
ENEA	Agenzia nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo sviluppo economico sostenibile
FL	Feed Line
FW	Feed Water
GE-SBWR	General Electric - Small Simplified Boiling Water Reactor
HL	Hot Leg
IC	Isolation Condenser
ICAP	International Code Assessment program
IRWST	In-containment Refueling Water Storage Tank
LOCA	Loss Of Coolant Accident
LP	Lower Plenum
MFW	Main Feed Water
MSIV	Main Steam Isolation Valve
NRC	U.S. Nuclear Regulatory Commission
NRHR	Normal Residual Heat Removal
PANTHERS	Performance Analysis and Testing of Heat Removal System
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PC	Power Channel
PCC	Passive Containment Condenser
PERSEO	inPool Energy Removal System for Emergency Operation
PRHR	Passive Residual Heat Removal System
PRZ	Pressurizzatore
PV	Pressure Vessel
RPV	Reactor Pressure Vessel
SFW	Start-up Feed Water
SG	Steam Generator
SIET	Società Italiana Esperienze Termofluidodinamiche
SL	Steam Line
SPES	Simulatore Pressurizzato Esperienze di Sicurezza
SSL	Steam Supply Line
UH	Upper Head
WDL	Water Discharge Line
WL	Water Lin

BIBLIOGRAFIA

- [1] Senior Expert group report on facilities and programmes (SESAR/FAP): Major facilities and programmes at risk; Nuclear safety research in OECD countries; Draft 08 July 1999;
- [2] L. Burgazzi, Minutes of the 16th 2016, ENEA-IRSN meeting on STC Agreement N°10: Passive Systems, SICNUC – P000 - 006, Luglio 2016;
- [3] C. Lombardo, M. Polidori, P. Chiovaro, S. D'Amico, I. Moscato, G. Vella "Approfondimento delle problematiche di simulazione con i codici CATHARE2 e TRACE dei transitori SPES2". NNFISS – LP1 - 047, Settembre 2015.
- [4] M. Rigamonti, SPES-2 Facility description, SIET 00 183 RI 92, Rev.1. Piacenza, 6-12-95;
- [5] Bestion D., G. Geffraye, The CATHARE code, CEA, Grenoble (F), Apr. 2002.
- [6] C. Lombardo, M. Polidori, P. Chiovaro, S. D'Amico, I. Moscato, G. Vella, Validazione e Verifica (V&V) di CATHARE2 e TRACE sul Programma Sperimentale SPES2, NNFISS – LP1 - 027, Settembre 2014;
- [7] M. Tarantini, SPES – 2 input deck modifications and 3D analysis to support downcomer nodding, PT – ENI 00021, Marzo 1996.
- [8] R. Ferri, A. Achilli, S. Gandolfi, PERSEO Project, Experimental Data Report, SIET 01014RP02.TRACE V5.0, User's Manual Volume 1: Input Specification, Division of System Analysis Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, 2010.
- [9] TRACE V5.0, Theory Manual: Field Equations, Solution Methods, and Physical Models, Division of System Analysis Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 2010.
- [10] I.E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, Jaico Publishing House, 2003.
- [11] C. Lombardo, M. Polidori, P. Chiovaro, S. D'Amico, I. Moscato, G. Vella, Validazione e Verifica (V&V) di CATHARE2 e TRACE sul Programma Sperimentale SPES-2, CERSE-UNIPA RL- 1224/2014, Settembre 2014.
- [12] S. D'Amico, C. Lombardo, I. Moscato, M. Polidori, G. Vella, Transient analysis of "2 inch Direct Vessel Injection line break" in SPES-2 facility by using TRACE code, Proceedings of 33rd UIT Heat Transfer Conference, L'Aquila, 22-24 Giugno, 2015.
- [13] S. D'Amico, C. Lombardo, I. Moscato, M. Polidori, G. Vella, Transient analysis of "2 inch Cold Leg to Core Make-Up tank pressure balance line break" in SPES-2 facility by using TRACE code, Proceedings of ASME-ATI-UIT 2015 Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment, Napoli, 17-20 Maggio, 2015.
- [14] G. Bandini, P. Meloni, M. Polidori, C. Lombardo, Validation of CATHARE V2.5 thermal-hydraulic code against full-scale PERSEO tests for decay heat removal in LWRs, Nuclear Engineering and Design 241, pp 4662-4671, Dicembre 2010.
- [15] F. Bianchi, P. Meloni, R. Ferri, A. Achilli, G. Cattadori, Transient analysis of "2 inch cold leg to core make-up tank pressure balance line break" in SPES-2 facility by using TRACE code Design, experiments and RELAP5 code calculations for the PERSEO facility, Nuclear Engineering and Design 235, pp 1201–1214, Gennaio 2005.
- [16] F. Bianchi, P. Meloni, R. Ferri, A. Achilli, In-Pool Energy Removal System for Emergency Operation: Experiment and Analytical Assessment, International Conference Nuclear Energy for New Europe, Settembre 2003.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 - 067	1	L	43	43

Curriculum del personale CIRTEN

Il gruppo di lavoro impegnato nell'attività è costituito da un professore ordinario di Impianti nucleari dell'Università di Palermo (Dipartimento Energia, dell'Informazione e Modelli Matematici "DEIM"), Giuseppe Vella, da un ricercatore universitario dello stesso Dipartimento, Pierluigi Chiovaro e da due borsisti di ricerca presso il Dipartimento DEIM dell'Università degli Studi di Palermo, Salvatore D'Amico e Ivo Moscato.

Il prof. **Giuseppe Vella**, Ordinario del Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/19 Impianti Nucleari, è Responsabile del reattore nucleare di ricerca AGN 201 - COSTANZA dell'Università di Palermo. Ha coordinato diversi programmi di ricerca finanziati dal Ministero della Ricerca Scientifica e Tecnologica. E' stato Coordinatore nazionale di un progetto di ricerca di interesse nazionale PRIN-2007 finanziato dal MIUR. E' autore o coautore di più di 150 articoli pubblicati su riviste scientifiche nazionali ed internazionali e/o presentati a conferenze, congressi o simposi. E' anche coautore di diversi rapporti nell'ambito dei PAR trascorsi. L'attività scientifica del prof. Vella ha riguardato principalmente le seguenti tematiche: tubi di calore al sodio, problemi di ribagnamento di superfici ad elevata temperatura, efflussi critici bifase, analisi termoidrauliche relative alla sicurezza dei reattori nucleari a fissione, analisi neutroniche, termoidrauliche e termomeccaniche del mantello e di componenti ad alto flusso termico di un tipico reattore a fusione di tipo TOKAMAK. E' stato referee per la rivista "Fusion Engineering and Design" e "Nuclear Engineering and Design".

Pierluigi Chiovaro, ricercatore a tempo determinato del S.S.D. ING-IND/19, da circa un decennio svolge attività di ricerca su problematiche termomeccaniche, termoidrauliche e nucleari connesse allo sviluppo di componenti di reattori a fissione ed a fusione nucleare ed ha pubblicato oltre una ventina di memorie prevalentemente su riviste, atti di congressi e rapporti internazionali. E' anche coautore di diversi rapporti nell'ambito dei PAR trascorsi. Partecipa attivamente a programmi di ricerca nazionali nonché europei sulla fusione nucleare in collaborazione con l'ENEA, ITER, il CEA ed il KIT. E' stato referee per le riviste "Fusion Engineering and Design" e "Annals of Nuclear Energy".

Salvatore D'Amico e Ivo Moscato, borsisti di ricerca presso il Dipartimento DEIM dal novembre 2014, hanno conseguito la laurea magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare presentando la tesi "Analisi di test sperimentali nell'impianto SPES-2 e di progetto nell'impianto SPES-3 mediante codici di sistema best-estimate" nella quale in particolare si sono occupati della validazione del codice di calcolo TRACE rispetto alle fenomenologie termoidrauliche che caratterizzano gli Small-Break Loss of Coolant Accident (SBLOCA) simulati nell'impianto SPES-2 e di investigare, sempre mediante il codice TRACE, l'evoluzione e le conseguenze di uno Station Black Out nell'impianto SPES-3.