



Ricerca di Sistema elettrico

Approfondimento delle problematiche di simulazione dei test integrali SPES2 e PERSEO con i codici CATHARE e TRACE

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



APPROFONDIMENTO DELLE PROBLEMATICHE DI SIMULAZIONE DEI TEST INTEGRALI SPES2 E PERSEO CON I CODICI CATHARE E TRACE

C. Lombardo, M. Polidori (ENEA)

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

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

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

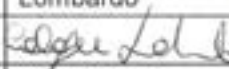
Obiettivo: Validazioni analitiche e verifiche sperimentali

Responsabile del Progetto: Federico Rocchi, 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 il nucleare di IV Generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Federico Rocchi

Responsabile scientifico CIRTEN: Marco Ricotti

 Ricerca Sistema Elettrico		Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 088		Distrib. L	Pag. di 1 53
Titolo Approfondimento delle problematiche di simulazione dei test integrali SPES2 e PERSEO con i codici CATHARE e TRACE.					
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 seconda 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 inerenti l'attività di ricerca condotta al fine di approfondire le problematiche di simulazione dei test integrali SPES2 e PERSEO con i codici CATHARE e TRACE					
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 410/2017					
Copia n.			In carico a:		
2			NOME		
			FIRMA		
1			NOME		
			FIRMA		
0	EMISSIONE	14/11/17	NOME	Calogera Lombardo	Paride Meloni
			FIRMA		
REV.	DESCRIZIONE	DATA	14/11/2017	REDAZIONE	CONVALIDA
					APPROVAZIONE



 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. di 2 58
--	--	------------------	----------------------	------------------------

INDICE

INDICE.....	2
LISTA DELLE FIGURE	3
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 DEL MODELLO CATHARE DELL'IMPIANTO SPES-2	14
5.1 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA COLD LEG B2.....	16
5.2 CONFRONTO TRA I RISULTATI CATHARE E I DATI SPERIMENTALI	16
6. DESCRIZIONE DELLA FACILITY PERSEO	20
6.1 CONFIGURAZIONE DEL CIRCUITO E CONDIZIONI OPERATIVE	22
6.2 MATRICE DEI TEST SPERIMENTALI	23
7. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA TRACE	25
8. DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO PERSEO	27
8.1 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO	27
8.1.1 <i>RECIPIENTE IN PRESSIONE</i>	28
8.1.2 <i>SCAMBIATORE DI CALORE</i>	29
8.1.3 <i>NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA COSTITUITO DALLE PISCINE</i>	31
9. ANALISI DEI TEST SPERIMENTALI MEDIANTE TRACE	33
9.1 ANALISI DEL TEST #7	33
9.2 ANALISI DEL TEST #9	35
9.3 CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI	36
10. CONCLUSIONI	55
BIBLIOGRAFIA	57
CURRICULUM DEL PERSONALE CIRTEN	58

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 3	di 58
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

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 e del loop A.	14
Figura 6: Andamento della pressione nel circuito primario.....	17
Figura 7: Portata di liquido iniettata dalla CMTA.	18
Figura 8: Portata di liquido iniettata dalla CMTB.	19
Figura 9: Portata attraverso il PRHR.	19
Figura 10 : Schema dell'impianto PERSEO.....	20
Figura 11: Schema del circuito primario di PERSEO.	21
Figura 12: Lay-out dello steam duct e della liquid line tra le due piscine.....	22
Figura 13: Vista generale della nodalizzazione TRACE di PERSEO.	27
Figura 14: Recipiente in pressione.	28
Figura 15: Modello dello scambiatore di calore.....	29
Figura 16: Modello della feed line.....	30
Figura 17: Modello della drain line.	30
Figura 18: Modello delle piscine e delle linee di connessione.	31
Figura 19: Particolare della geometria dell'iniettore.	32
Figura 20: Particolare dei volumi simulanti l'iniettore.	32
Figura 21: Andamento della pressione.	38
Figura 22: Andamento del livello nella HX pool.	38
Figura 23: Andamento del livello nella overall pool.	39
Figura 24: Andamento della portata nella triggering valve.	39
Figura 25: Andamento del livello nel recipiente in pressione.	40
Figura 26: Andamento della portata di vapore.	40
Figura 27: Andamento della portata di condensato.....	41
Figura 28: Andamento della potenza.	41
Figura 29: Andamento delle temperature nella overall pool.	42
Figura 30: Andamento della pressione.	43
Figura 31: Andamento del livello nella HX pool.	44
Figura 32: Andamento del livello nella overall pool.	44
Figura 33: Andamento della portata nella triggering valve.	45
Figura 34: Andamento del livello nel recipiente in pressione.	45
Figura 35: Andamento della portata di vapore.	46
Figura 36: Andamento della portata di condensato.....	46
Figura 37: Andamento della potenza.	47
Figura 38: Andamento delle temperature nella overall pool.	47
Figura 39: Andamento della potenza in funzione del livello nella HX pool.	48
Figura 40: Andamento della pressione.	49
Figura 41: Andamento del livello nella HX pool.	50
Figura 42: Andamento del livello nella overall pool.	50
Figura 43: Andamento della portata nella triggering valve.	51
Figura 44: Andamento del livello nel recipiente in pressione.	51
Figura 45: Andamento della portata di vapore.	52
Figura 46: : Andamento della portata di condensato.....	52
Figura 47: Andamento della potenza.	53
Figura 48: Andamento delle temperature nella overall pool.	53
Figura 49: Andamento della potenza in funzione del livello nella HX pool.	54

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. di 4 58
--	--	------------------	----------------------	------------------------

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1: Principali caratteristiche della facility SPES-2.	7
Tabella 2: Caratteristiche delle CMTs.	9
Tabella : Caratteristiche del PRHR e dell'IR ST.	10
Tabella 4: Matrice delle prove sperimentali condotte su SPES2.	11
Tabella 5: Condizioni di stazionario.	15
Tabella 6: Segnali di sicurezza e intervento dei sistemi di emergenza di SPES2.....	16
Tabella 7: Parametri di progetto.	22
Tabella 8: Matrice dei test di shake down.	23
Tabella 9: Matrice dei test integrali e di stabilità.....	24
Tabella 10: Componenti utilizzati nel codice TRACE.	26
Tabella 11: Principali grandezze per il test #7 phase I.....	37
Tabella 12: Principali grandezze per il test #7 phase I.....	37
Tabella 13: Principali grandezze per il test #7 phase II.....	43
Tabella 14: Principali grandezze per il test #9.	49

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. di 5 58
--	--	------------------	----------------------	------------------------

1. INTRODUZIONE

La gestione in sicurezza degli impianti nucleari (oggetto di un crescente interesse in tutto il mondo), ha messo in luce l'importanza di predire il loro comportamento, sia in condizioni di normale esercizio che incidentali. Come conseguenza, molte delle attività di ricerca condotte negli ultimi anni, sono state indirizzate 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 e 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 rinato 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'Ingegneria e Modelli Matematici "DEIM" dell'Università degli Studi di Palermo ha sviluppato il coding dell'impianto PERSEO 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) La necessità di testare ulteriormente la capacità del coding CATHARE, sin qui sviluppato, di simulare le principali fenomenologie che entrano in gioco durante l'intervento dei sistemi di sicurezza passivi della *facility* SPES2 in condizioni incidentali. Tale capacità verrà studiata sulla base del confronto tra i dati sperimentali e le previsioni del modello nei confronti di un incidente di perdita di refrigerante primario in seguito ad una rottura di un pollice sulla cold leg B2, posizionata tra la balance line e il vessel.

b) La necessità di testare le capacità predittive del codice TRACE nella simulazione di particolari fenomenologie di condensazione, sulla base dei dati sperimentali disponibili, 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.

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'AP 00.

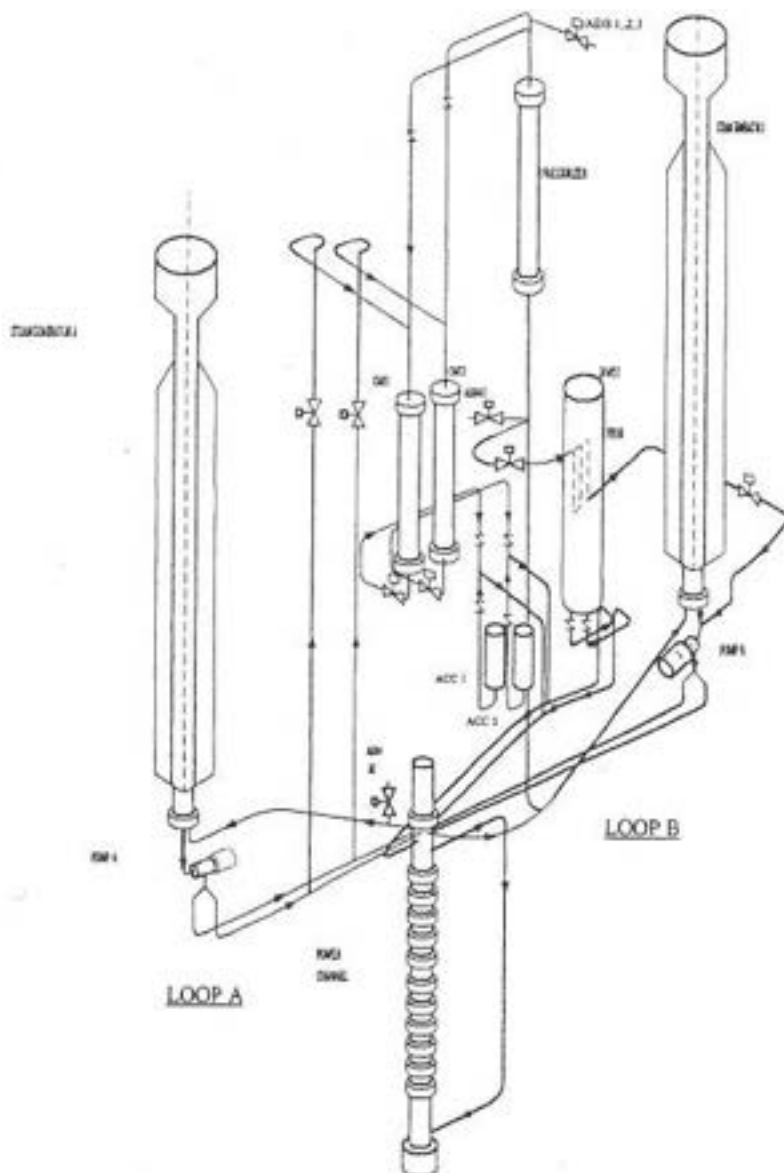


Figura 1: Schema semplificato della facility SPES-2.

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'AP 00. 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'AP 00 ino alla sommit 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 s erica 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-00. L'Azoto utilizzato nell'AP-600 per mettere in pressione gli accumulatori è stato sostituito con aria compressa. Inoltre una barretta scaldante stata posta all'interno del serbatoio per mantenere l'ac ua 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 sommit e uindi alle medesime condizioni di pressione e temperatura dell'edi cicio 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

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 8	di 58
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

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 termoidrauliche 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.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. di 9 58
--	--	------------------	----------------------	------------------------

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.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 10	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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

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.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 11	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 S TR e l'ultimo dalla rottura della linea principale del vapore in uscita dal generatore (Steam Line Break SLB).

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.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 12	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 β . 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 A (alias 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 raggiunto (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);

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 13	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 14	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

5. DESCRIZIONE DEL 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 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 [3] e [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.

Figura 5: Particolare della nodalizzazione del canale di potenza e del loop A.

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.

5.1 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA COLD LEG B2

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 un pollice sulla cold leg B2 (CLB2) tra la balance line ed il vessel.

La sequenza d'intervento 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	$P (PRZ) < 12.41 \text{ MPa} + 5.73s$
Intervento sistemi di emergenza	$P (PRZ) < 11.72 \text{ MPa}$
Chiusura linea vapore loop B	$P (PRZ) < 12.41 \text{ MPa} + 2s \text{ ritardo}$
Chiusura alimentazione secondario loop A	$P (PRZ) < 11.72 \text{ MPa} + 2 s \text{ ritardo}$
Chiusura alimentazione secondario loop B	$P (PRZ) < 11.72 \text{ MPa} + 2 s \text{ ritardo}$
Intervento CMT loop A/B	$P (PRZ) < 11.72 \text{ MPa} + 2 s \text{ ritardo}$
Intervento PRHR	$P (PRZ) < 11.72 \text{ MPa} + 2 s \text{ ritardo}$
Trip pompe loop A/B	$P (PRZ) < 11.72 \text{ MPa} + 16.2 s \text{ ritardo}$
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.

5.2 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 1" sulla CLB2 tra la balance line ed il vessel.

A causa della perdita di massa attraverso la rottura si assiste ad una depressurizzazione del circuito primario: con un ritardo di 5. 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 IR ST.

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.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 17	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 inserite 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: in virtù di ciò i dati sperimentali risultano proprietà intellettuale di Westinghouse.

Inoltre, si mette in evidenza che il calcolo si blocca a causa di un problema di convergenza nell'elemento D utilizzato per nodalizzare le complesse fenomenologie del downcomer anulare [7].

La Figura 6 riporta l'andamento della pressione nel circuito primario da essa si può evidenziare come il modello CATHARE consenta una buona descrizione del comportamento della facility, dal punto di vista qualitativo, consentendo di descrivere abbastanza bene i dati sperimentali nella fase di depressurizzazione violenta.

La Figura 7 e la Figura 8 mostrano la portata iniettata nel circuito primario dalle due CMTs.

Figura 6: 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 9 che riporta l'andamento della portata che fluisce dentro al PRHR e che consente di asportare il calore residuo di decadimento dal

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 18	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

circuito primario, si nota come qualche centinaia di secondi dopo l'intervento di tale sistema la circolazione naturale si blocchi mostrando una tendenza a riprendere subito dopo. La ripresa, in questo transitorio non viene evidenziata a causa del blocco del calcolo per motivi di convergenza. Il fenomeno del blocco della portata permane evidente, anche in questo transitorio, e conferma il dubbio già evidenziato inerente la 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 in luisce ortemente sull'innesco della circolazione naturale.

Figura 7: Portata di liquido iniettata dalla CMTA.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 19	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Figura 8: Portata di liquido iniettata dalla CMTB.

Figura 9: 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 riportato in Figura 10.



Figura 10: Schema dell'impianto PERSEO.

Durante le condizioni di stand-by, la piscina contenente lo scambiatore di calore (HX Pool) vuota mentre l'altra Overall Pool risulta piena di acqua calda. 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 Figura 11 e nella Figura 12.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 21	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

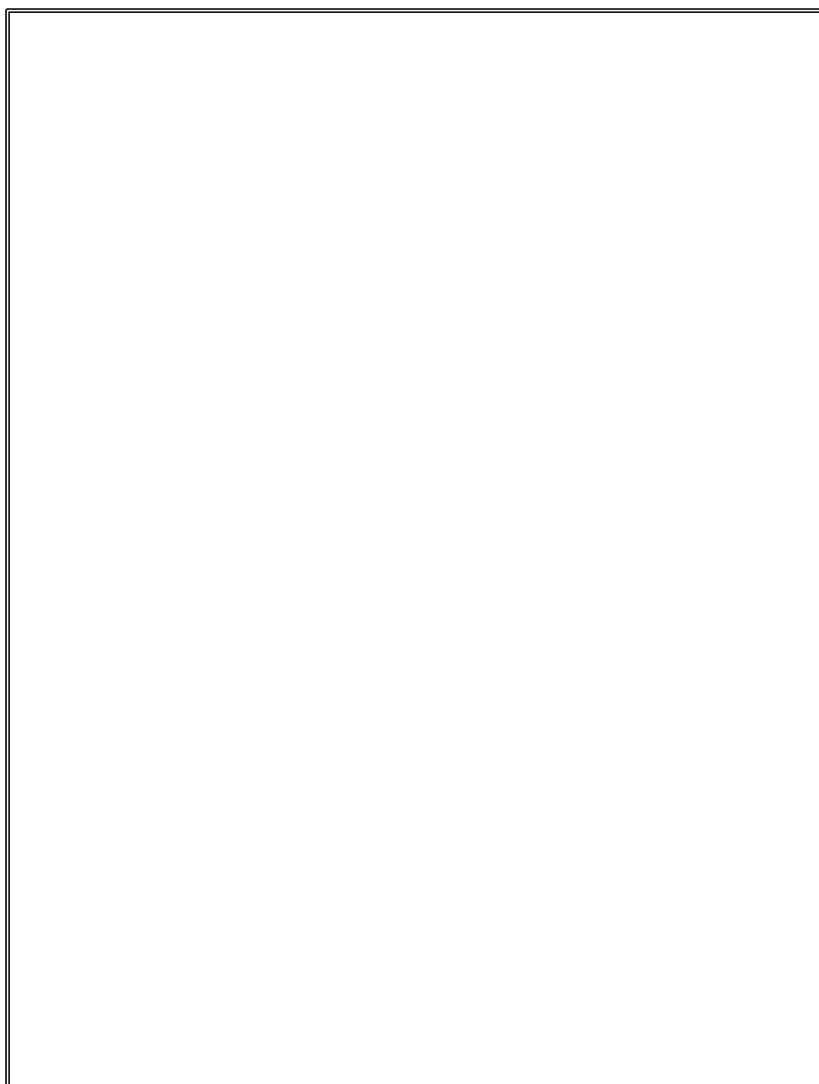


Figura 11: Schema del circuito primario di PERSEO.

Il recipiente in pressione opera nelle tipiche condizioni termoidrauliche 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 m^3 l'altezza di $1 \div 1 \text{ m}$ 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 11. 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 m^3 . 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 m^3 con un'area di base di 0 m^2 e un'altezza di 5.7 m, mentre la piscina che funge da riserva di acqua presenta un volume di 173 m^3 con un'area di base di 29 m^2 e un'altezza di m .



Figura 12: 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.

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

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 23	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 H 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 H 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 immerso per circa 1. m all'interno dell'acqua 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 fluisce poi verso l'ambiente esterno mediante il boil-off. Non appena l'iniettore si scopre il vapore prodotto nella H 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.

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

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 24	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

circuito primario: e 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.

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 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 calda che si immette nella HX Pool dove è presente vapore.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 25	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 *dri t lu model* si è verificato un ulteriore sviluppo dei codici e verso l'inizio degli anni settanta l' SNRC support 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 ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 26	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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.

Tabella 10: Componenti utilizzati nel codice TRACE.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 27	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 13. 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..) è necessaria 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],[12].



Figura 13: Vista generale della nodalizzazione TRACE di PERSEO.

Grazie all'esperienza maturata, si è deciso di utilizzare diversi modelli teorico-numericamente resi disponibili all'interno del codice TRACE e capaci di simulare in maniera più realistica alcuni particolari fenomeni fisici [11]. 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 ESSEL 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.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 28	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

8.1.1 *RECIPIENTE IN PRESSIONE*

Il recipiente in pressione (vedi Figura 14) 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 1. 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'innesco 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.

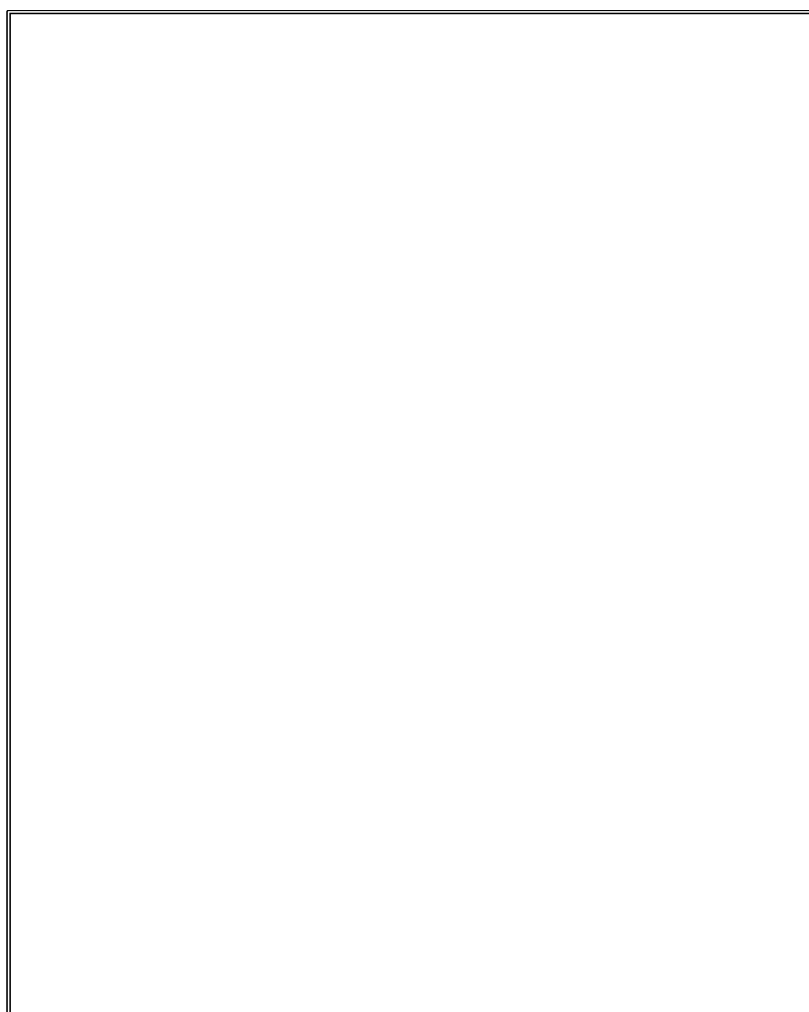


Figura 14: Recipiente in pressione.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 29	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 H Pool. Ogni PIPE 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 15, mentre quelli della feed line e della drain line nelle Figura 16 e Figura 17 rispettivamente.

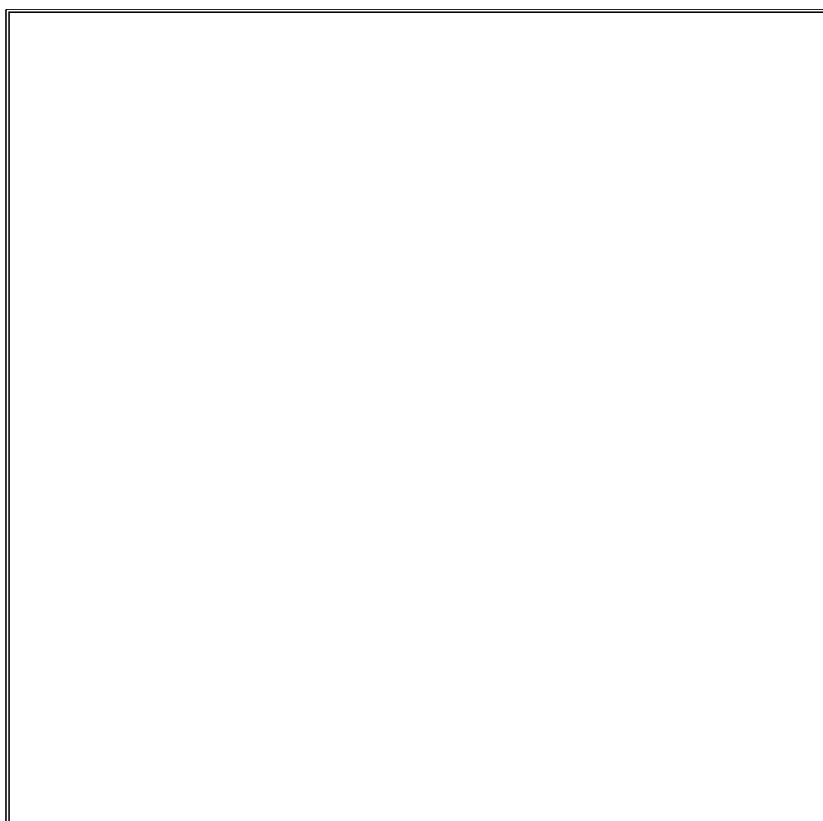


Figura 15: Modello dello scambiatore di calore.



Figura 16: Modello della feed line.

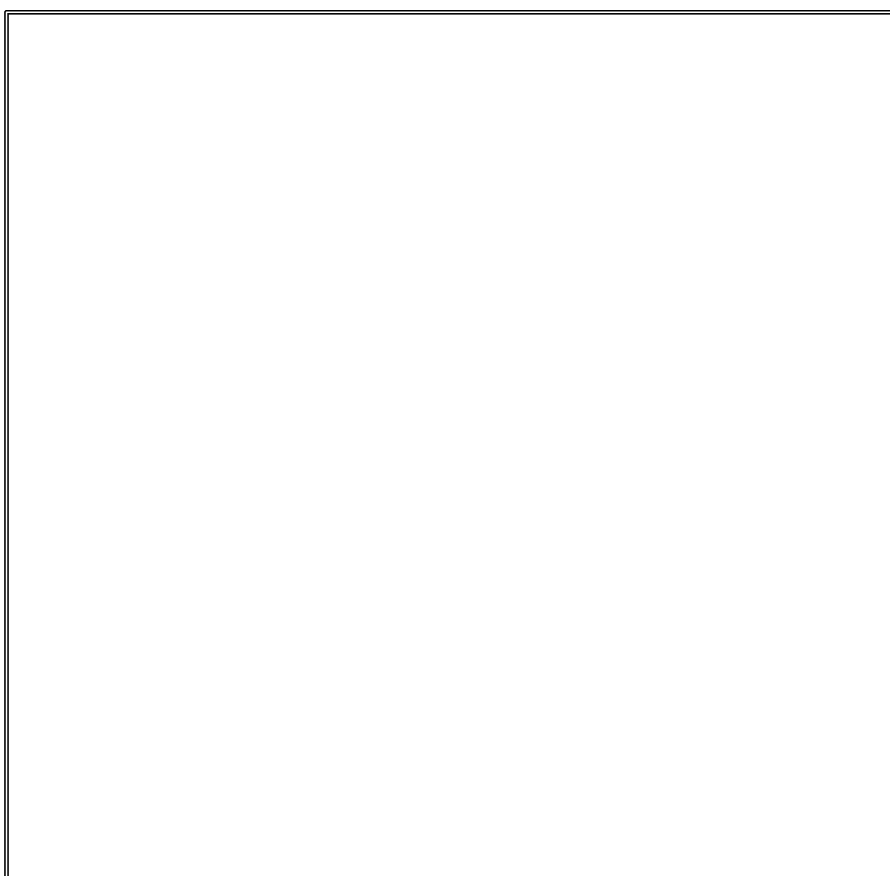


Figura 17: Modello della drain line.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 31	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

8.1.3 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 liscia l'acqua calda durante il riempimento della H Pool in Figura 18 è mostrata la nodalizzazione di tale sistema.



Figura 18: 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 unione 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 liquido 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 2 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 19 è stata invece modellata nei volumi all'interno della Overall Pool Figura 20.



Figura 19: Particolare della geometria dell'iniettore.



Figura 20: Particolare dei volumi simulanti l'iniettore.

Il Boil-o 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.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 33	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

9. ANALISI DEI TEST SPERIMENTALI MEDIANTE TRACE

Allo scopo di studiare la robustezza del modello di calcolo, descritto nel precedente capitolo ed al fine di riprodurre il comportamento di PERSEO in differenti condizioni transitorie, sono stati analizzati due ulteriori scenari. Il primo scenario consiste nel test #7 della matrice dei test sperimentali: si tratta di un test integrale e di stabilità pensato per valutare la bontà del sistema, in termini di efficacia nello scambio termico, a partire da differenti condizioni iniziali nella HX Pool; lo studio è stato fatto riempiendo parzialmente e poi totalmente la HX Pool sino al raggiungimento delle condizioni di saturazione e l'osservazione del successivo svuotamento della stessa piscina.

Il secondo test analizzato è il #9. Si tratta 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.

9.1 Analisi del Test #7

Il test viene condotto a 0 bar e l'avvio viene effettuato con la H Pool parzialmente riempita di acqua. Il test prevede il raggiungimento delle condizioni di saturazione e l'osservazione del successivo svuotamento della stessa piscina ed è stato pensato per studiare:

1. lo start-up del sistema e l'andamento della potenza con la H Pool parzialmente riempita sin dall'inizio
2. la presenza di instabilità dovute alla condensazione di vapore all'interfaccia tra l'acqua della Overall Pool e il vapore presente nell'iniettore dello Steam Duct
3. la riattivazione del sistema conseguente al riempimento della HX Pool e il raggiungimento delle condizioni termiche di regime in entrambi i sistemi;
4. l'efficacia dell'iniettore nel mixing dell'acqua della Overall Pool;
5. l'andamento della potenza a seguito della diminuzione del livello di acqua nella Overall Pool al di sotto dell'iniettore
6. l'andamento della potenza come funzione del livello di acqua nelle piscine e la diminuzione di quest'ultimo come effetto del vapore che lascia il sistema dal boil-off.

Test #7 fase I

Il test sperimentale inizia con l'apertura della triggering valve a 10 s quando viene fatta aprire lentamente. La prima apertura si conclude a 10608 s mentre una successiva apertura viene effettuata tra 10621 s e 10655 s; ve ne sarà una terza tra 11040 s e 11260 s che consentirà il riempimento della HX Pool. Il livello della piscina inizierà ad aumentare a 10483 s, portandosi a circa 10683 s ad un livello di circa 1.41 m per poi scendere a 1.40 m poco prima dell'ultima apertura della triggering valve. A 11000 s il livello inizia a crescere nuovamente giungendo a circa 3.4 m per poi scendere verso la fine del transitorio a 1.3 m. Il livello nella overall pool diminuisce durante i due intervalli di tempo in cui si procede al riempimento della HX pool, mentre risalirà leggermente a causa della conseguente variazione di densità per l'aumento della temperatura dell'acqua ivi contenuta.

Subito dopo la prima fase di riempimento della HX pool, la potenza scambiata dal primario con il secondario costituito dalle due piscine risulta abbastanza bassa, circa 3.5 MW a causa del basso livello di acqua e ovviamente aumenterà all'aumentare del livello di liquido fino al raggiungere un massimo nella potenza scambiata pari a circa 21 MW. Alla fine del test, quando il livello dell'acqua è circa 1. m la potenza scambiata attraverso lo scambiatore di calore è circa 2.5 MW

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 34	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Subito dopo la seconda apertura della triggering valve, quando cioè la potenza scambiata inizia a crescere rapidamente, la pressione nel primario diminuisce altrettanto rapidamente richiedendo l'intervento manuale nel sistema di controllo della pressione per riportare il sistema, dopo circa 550 s, al valore nominale di 70 bar.

Per quanto riguarda la portata di vapore immessa nello scambiatore di calore dal sistema primario si osserva come si assesti sui 1 g s. Prima dell'immissione dell'acqua calda proveniente dalla overall pool l'aria contenuta nella H Pool calda per effetto dell'irraggiamento dello scambiatore di calore. Successivamente la temperatura inizia a diminuire sino al raggiungimento nella fase avanzata del test e quando l'aria ormai lascia il posto al vapore, della temperatura di saturazione alla pressione che si instaura all'interno della piscina: ovvero 104 °C. Non appena la produzione di vapore è tale da far sì che si instauri un moto verso la Overall Pool attraverso lo steam-duct si osserva un significativo aumento della temperatura dell'acqua in tutta la piscina: segno dell'efficacia dell'iniettore nel mixing dell'acqua in essa contenuta prima che tale moto di vapore dalla H pool alla overall pool sia apprezzabile si verificano intensi fenomeni di rapida condensazione all'interfaccia dell'iniettore. Importante risulta il contributo del vacuum breaker nell'evitare di depressurizzare eccessivamente la H pool durante il repentino raffreddamento dell'aria nelle prime fasi di avvio del test. Sperimentalmente si osserva un aumento non desiderato del livello di liquido all'interno del recipiente in pressione a causa di un malfunzionamento del sistema di controllo preposto a tale compito tant' che a circa 12000 s risulta necessario intervenire attraverso il sistema di valvole che regola la pressione nel sistema.

Test #7 fase II

La seconda fase del test ha inizio con la HX pool piena di acqua in condizioni di saturazione e con un livello pari a 1.2 m, mentre la overall pool si trova piena di acqua calda. La pressione nel primario è mantenuta a 70 bar come nella fase precedente. Il transitorio ha inizio con l'apertura della triggering valve a 300 s (impiegando 26 s per aprirsi totalmente) e viene chiusa a 3338 s impiegando 123 s con l'intento di isolare le due piscine e investigare il trend della potenza come funzione del solo livello di acqua nella HX pool.

Il livello di liquido nella HX pool inizia ad aumentare intorno ai 310 s per raggiungere il massimo, pari a circa 3.25 m, a 531 s.

Dopo una prima diminuzione, a causa del riempimento della HX pool, il livello di liquido contenuto nella overall pool inizia ad oscillare a causa dell'intensa condensazione del vapore all'interfaccia con l'iniettore. A circa 1150 s, quando la temperatura dell'acqua è intorno agli 85 °C, il livello viene fatto scendere più velocemente grazie all'apertura della valvola di scarico presente nella base della overall pool; solo quando il livello raggiunge i 2.8 m (circa 3230 s) la valvola di scarico è chiusa: da questo momento in poi l'iniettore risulterà scoperto e il vapore che fluisce attraverso lo steam duct è scaricato direttamente nell'ambiente esterno attraverso il boil-off.

Come è ormai noto, una volta aperta la triggering valve il liquido freddo proveniente dalla overall pool inizia a lambire le pareti dello scambiatore di calore cosicché la potenza scambiata dal primario inizia a crescere richiedendo l'intervento manuale sul controllo della pressione per mantenerla al valore nominale di 70 bar.

La potenza scambiata presenta un andamento simile a quello del livello nella HX Pool e raggiunge un valore stabile di 20 MW per poi diminuire quando il liquido scende sotto i 2.2 m (a circa 2400 s); quando la valvola tra le due piscine viene chiusa il livello nella HX Pool inizia a decrescere molto più rapidamente e conseguentemente anche la stessa potenza scambiata.

Prima dell'immissione di acqua dall'overall pool, all'interno della HX Pool è presente vapore surriscaldato nella parte alta e acqua sottoraffreddata in basso. Dopo il suo riempimento e una volta raggiunte le condizioni di saturazione la temperatura si stabilizza intorno ai 104 °C:

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 35	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

ovvero la temperatura di saturazione corrispondente alla pressione che si instaura nella HX Pool.

La pressione nella HX Pool è sufficiente per guidare il vapore ivi prodotto nella overall pool attraverso lo steam duct. Il vapore accelerato dall'iniettore promuove il mixing dell'acqua ottenendo così una temperatura pressoché uniforme; tale fenomeno si verifica sino al raggiungimento nell'overall pool di un livello sottostante l'iniettore: a questo punto il vapore prodotto si dirige verso l'ambiente esterno.

9.2 Analisi del test #9

Il test viene condotto a 1 bar e l'avvio viene effettuato con la HX Pool parzialmente riempita di acqua. Il test prevede il raggiungimento delle condizioni di saturazione e l'osservazione del successivo svuotamento della stessa piscina ed è stato pensato per studiare:

1. l'attuazione del sistema con la HX Pool parzialmente riempita ed il raggiungimento delle condizioni termiche di regime in entrambe le piscine;
2. l'efficacia dell'iniettore nel mixing dell'acqua contenuta nella Overall Pool;
3. l'andamento della potenza e il regime di scambio termico che si instaura a seguito della diminuzione del livello di liquido nella Overall Pool al di sotto dell'iniettore;
4. l'andamento della potenza come funzione del livello di acqua nelle piscine e la diminuzione di quest'ultimo come effetto del vapore che lascia il sistema dal boil-off.

Il test sperimentale inizia con l'apertura della triggering valve a 12 s e impiega 21 s per aprirsi del tutto. La stessa valvola viene chiusa a 4887 s richiedendo 93 s, con l'obiettivo di isolare le due piscine e investigare il trend della potenza come funzione del solo livello di liquido nella HX Pool.

Il livello della piscina inizierà ad aumentare a 153 s, portandosi a circa 416 s ad un livello di circa 3.33 m per poi oscillare intorno ai 3 m per circa 3300 s.

Il livello nella overall pool diminuisce durante il riempimento della HX Pool, mentre risalirà leggermente a causa della conseguente variazione di densità per l'aumento della temperatura dell'acqua ivi contenuta con forti oscillazioni dovute alla condensazione del vapore che dalla HX Pool fluisce verso la overall pool attraverso lo steam duct.

A 2790 s, quando la temperatura dell'acqua contenuta nella overall pool è tra gli 80 °C e i 90 °C, la diminuzione del livello è facilitata dall'apertura della valvola di scarico; quest'ultima verrà chiusa quando il livello avrà raggiunto i 2.77 m (circa 4840 s) ovvero quando l'iniettore risulterà scoperto e il vapore che fluisce attraverso lo steam duct verrà scaricato direttamente nell'ambiente esterno attraverso il boil-off.

Contestualmente al rapido riempimento della HX Pool, la potenza scambiata dal primario con il secondario costituito dalle due piscine cresce e la pressione nel primario diminuisce altrettanto rapidamente richiedendo l'intervento manuale nel sistema di controllo della pressione per riportare il sistema al valore nominale di 41 bar.

Per quanto riguarda la portata di vapore immessa nello scambiatore di calore dal sistema primario, si fa osservare come si assesti a regime sui 8 kg/s, quando la potenza scambiata è di circa 14 MW.

Prima dell'immissione dell'acqua calda proveniente dalla Overall Pool il vapore contenuto nella parte superiore della HX Pool è surriscaldato per effetto dell'irraggiamento dello scambiatore di calore. Successivamente la temperatura inizia a diminuire sino al raggiungimento, nella fase avanzata del test della temperatura di saturazione alla pressione che si instaura all'interno della piscina: ovvero 103.5 °C. Non appena la produzione di vapore è tale da far sì che si instauri un moto verso la Overall Pool attraverso lo steam-duct si osserva un significativo aumento della temperatura dell'acqua in tutta la piscina: segno dell'efficacia dell'iniettore nel mixing dell'acqua in essa contenuta. Ancor prima che tale moto di vapore dalla HX Pool alla Overall Pool sia apprezzabile si osservano intensi fenomeni di condensazione all'interfaccia dell'iniettore.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 36	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Importante risulta il contributo del vacuum brea er nell'evitare di depressurizzare eccessivamente la HX Pool durante il repentino raffreddamento del vapore nelle prime fasi di avvio del test.

9.3 Confronto con i dati sperimentali

I risultati delle analisi termoidrauliche mostrate nel seguito sono stati ottenuti dal guppo di ricerca del DEIM utilizzando il modello TRACE della facility PERSEO descritto in 8. Allo scopo di migliorare le capacità predittive del modello, diverse nodalizzazioni dell'impianto sperimentale sono state investigate e i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli sperimentali disponibili [15], [16] e [17].

Sfortunatamente, è stato necessario ricorrere ad un controllo della pressione nella HX Pool per evitare le forti depressurizzazioni conseguenti al raffreddamento dell'aria in essa contenuta durante i primi istanti di apertura della triggering valve e causate da una trattazione semplificata dei gas incondensabili da parte del codice TRACE.

Inoltre, bisogna evidenziare un limite del modello nella simulazione della potenza scambiata attraverso l'HX senza dover ricorrere ad un appropriato fouling factor implementato nelle strutture termiche che simulano il fascio tubiero e i due collettori dello scambiatore. Tale difficoltà dipende dal criterio utilizzato dal codice nell'individuare le condizioni di scambio termico quando si tratta dei regimi pre-CHF (Critical Heat Flux) e condensazione [3]; questo significa che si osserva una sovrastima dei volumi coinvolti nello scambio termico in condizioni di ebollizione sottoraffreddata nella HX Pool: la sovrastima nella potenza scambiata dipenderà perciò dalla discretizzazione del componente simulante la piscina.

Grande importanza è stata data alla corretta simulazione della geometria che connette lo steam duct con l'Overall Pool dal momento che influenza la circolazione ed il mixing dell'acqua in essa contenuta e le instabilità che si osservano sperimentalmente nelle prime fasi di condensazione del vapore prodotto nella HX Pool, quando cioè non si è ancora instaurato un moto continuo tra le due piscine.

Test #7 fase I

La simulazione del test in esame utilizzando il modello TRACE di PERSEO messo a punto dal gruppo di ricerca del DEIM ha permesso di analizzare tutte le fasi del test sino all'apertura della valvola di scarico della overall pool. I risultati numerici mostrano che il modello realizzato è in grado di predire il comportamento dell'impianto, sebbene un ulteriore lavoro di perfezionamento risulta necessario per una più accurata riproduzione qualitativa e quantitativa di alcuni fenomeni che hanno luogo durante il transitorio.

Il test viene riprodotto a partire da una condizione stazionaria col primario a 70 bar e a seguito della quale viene simulata l'apertura della triggering valve secondo la tempistica riportata in Tabella 11 insieme alle principali grandezze che caratterizzano il test in esame, si veda anche la Tabella 12. L'andamento della pressione calcolata dal codice, Figura 21, risulta in accordo con l'andamento sperimentale, sebbene una prima leggera depressurizzazione si osserva già durante la prima fase di riempimento della HX pool. Il livello di liquido nelle due piscine predetto dal codice risulta qualitativamente ben simulato sebbene si osserva una leggera sottostima nella fase finale del test, si vedano la Figura 22 e la Figura 23. La portata tra le due piscine, durante le due fasi di riempimento, risulta qualitativamente e quantitativamente una grandezza da investigare per una migliore riproduzione, insieme all'andamento del livello nel recipiente in pressione, Figura 24 e Figura 25. Lo scostamento dai dati sperimentali si deve principalmente all'incertezza nella geometria delle valvole che interessano la linea di comunicazione delle due piscine e quella asservita al sistema di controllo del livello.

PERSEO Test 7 @fase I		
Grandezza	Valore Sperimentale	Risultato
Pressione nel circuito primario [MPa]	~ 7.00	~ 7.00
Livello nell'Overall Pool m	~ 4.65	4.60
Temperatura del fluido nelle due piscine [K]	~ 288.85	288.85
Riempimento parziale		
Livello massimo nella HX Pool [m]	~ 1.41	~ 1.38
Apertura - chiusura triggering valve [s]	10475 - 10608	10475 - 10608
Ri-apertura ri-chiusura triggering valve [s]	10621 - 10655	10621 - 10655
Massima potenza scambiata [MW]	3.50	~ 3.60
Riempimento totale		
Livello massimo nella HX Pool [m]	~ 3.45	~ 3.10
Massima portata di vapore [kg/s]	~ 13.63	~ 13.61
Massima potenza scambiata [MW]	~ 21.5	~ 21.5
Massima portata di condensato [kg/s]	~ 13.32	~ 13.28 (*)

Tabella 11: Principali grandezze per il test #7 phase I

PERSEO Test 7 @fase I		
Grandezza	Valore Sperimentale	Risultato
Livello minimo nella HX pool [m]	~ 1.25	~1.25
Istante livello minimo nella HX pool [s]	14800	14800
Temperatura inale nell'overall pool [K]	~ 323.25	~ 335.00
Massima portata tra le due piscine [kg/s]	~ 62.00	~ 70.00
Livello minimo nella overall pool [m]	~ 4.50	~ 4.42
Apertura discharge valve nel vessel [s]	12000	12000

Tabella 12: Principali grandezze per il test #7 phase I

La Figura 26 e la Figura 27 riportano l'andamento delle portate di vapore e di condensato che attraversano lo scambiatore di calore e anch'esse, nonostante alcune oscillazioni risultano in accordo con i dati sperimentali.



Figura 21: Andamento della pressione.



Figura 22: Andamento del livello nella HX pool.



Figura 23: Andamento del livello nella overall pool.



Figura 24: Andamento della portata nella triggering valve.



Figura 25: Andamento del livello nel recipiente in pressione.



Figura 26: Andamento della portata di vapore.

L'andamento della potenza scambiata è riportato nella Figura 28 e anch'esso, nonostante il limite di cui detto, mostra un buon accordo con quello sperimentale: nell'ultima fase del test si osserva una sottostima conseguente a quella osservata nell'andamento del livello nella HX pool.

La Figura 29 mostra invece la temperatura del liquido all'interno dell'overall pool: si evince come sia stata ben riprodotta l'efficacia dell'iniettore nel mixing dell'acqua in essa contenuta.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 41	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

In conclusione, il comportamento globale dell'impianto risulta ben riprodotto a riprova dell'efficacia del modello messo a punto di simulare i fenomeni termoidraulici che hanno luogo in questi sistemi di sicurezza avanzati.



Figura 27: Andamento della portata di condensato.



Figura 28: Andamento della potenza.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 42	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------



Figura 29: Andamento delle temperature nella overall pool.

Test #7 fase II

Anche in questo caso il transitorio è stato analizzato in tutte le sue fasi sino all'apertura della valvola di scarico nella overall pool. I risultati numerici mostrano che il modello realizzato è in grado di predire il comportamento dell'impianto, sebbene un ulteriore lavoro di perfezionamento risulta necessario per una più accurata riproduzione qualitativa e quantitativa di alcuni fenomeni che hanno luogo durante il transitorio. In particolare, rispetto al caso precedente, si evince un'incertezza sull'effettiva portata scaricata dall'overall pool e sulla logica di intervento del sistema di controllo del livello in quanto potrebbero variare da caso a caso.

Il test viene riprodotto a partire da una condizione stazionaria col primario a 70 bar e a seguito della quale viene simulata l'apertura della triggering valve secondo la tempistica riportata in Tabella 13 insieme alle principali grandezze che caratterizzano il test in esame. L'andamento della pressione calcolata dal codice, Figura 30, è in accordo con l'andamento sperimentale sebbene una depressurizzazione del sistema si osserva subito dopo l'apertura della triggering valve. Il livello di liquido nelle due piscine predetto dal codice risulta sia qualitativamente che quantitativamente discosto dall'andamento sperimentale, richiedendo pertanto una più attenta indagine su alcuni parametri che ne influenzano l'evoluzione temporale, si vedano la Figura 31 e la Figura 32. La portata tra le due piscine, durante le due fasi di riempimento, risulta qualitativamente e quantitativamente in buon accordo con i valori sperimentali, Figura 33. Il livello nel recipiente in pressione risulta sovrastimato rispetto al valore sperimentale richiedendo anch'esso un'indagine sulla logica d'intervento del sistema di controllo, Figura 34.

Le portate di vapore e quella di condensato che attraversano lo scambiatore risultano qualitativamente e quantitativamente in accordo con i valori sperimentali sebbene si osservano delle forti oscillazioni nella portata di condensato dovute all'intervento del sistema di controllo della pressione, Figura 35 e Figura 36.

PERSEO Test 7 @fase II		
Grandezza	Valore Sperimentale	Risultato
Livello nell'Overall Pool m	~4.25	4.25
Temperatura del fluido HX Pool [K]	~373.15	373.15
Livello massimo nella HX Pool [m]	~3.25	
Apertura - chiusura triggering valve [s]	326 - 3338	
Massima potenza scambiata [MW]	~11.70	11.70

Tabella 13: Principali grandezze per il test #7 phase II.

L'andamento della potenza scambiata è riportato nella Figura 37 e anch'esso, nonostante il limite di cui detto, mostra un buon accordo con quello sperimentale; nell'ultima fase del test si osserva una sovrastima conseguente a quella osservata nell'andamento del livello nella HX pool.



Figura 30: Andamento della pressione.

La Figura 38 mostra invece la temperatura del liquido all'interno dell'overall pool: si evince come sia stata ben riprodotta l'efficacia dell'iniettore nel mixing dell'acqua in essa contenuta. La Figura 39 riporta l'andamento della potenza scambiata in funzione del livello nella H pool: si evince da tale grafico come la grandezza in esame sia sovrastimata richiedendo una maggiore discretizzazione dei volumi per superare la difficoltà di cui detto all'inizio.



Figura 31: Andamento del livello nella HX pool.



Figura 32: Andamento del livello nella overall pool.



Figura 33: Andamento della portata nella triggering valve.



Figura 34: Andamento del livello nel recipiente in pressione.



Figura 35: Andamento della portata di vapore.



Figura 36: Andamento della portata di condensato.



Figura 37: Andamento della potenza.



Figura 38: Andamento delle temperature nella overall pool.



Figura 39: Andamento della potenza in funzione del livello nella HX pool.

In conclusione, il comportamento globale dell’impianto risulta riprodotto, a riprova dell’efficacia del modello messo a punto di simulare i fenomeni termoidraulici che hanno luogo in questi sistemi di sicurezza avanzati.

Test #9

Analogamente a quanto fatto per il test #7, anche in questo caso il transitorio è stato analizzato in tutte le sue fasi sino all’apertura della valvola di scarico dell’overall pool. I risultati numerici mostrano che il modello realizzato è in grado di predire il comportamento dell’impianto, richiedendo tuttavia un ulteriore lavoro di perfezionamento per una più accurata riproduzione qualitativa e quantitativa di alcuni fenomeni che hanno luogo durante il transitorio. In particolare, rispetto al test precedente bisognerà analizzare meglio la portata che attraversa la triggering valve ed il controllo del livello nel recipiente in pressione.

Il test viene riprodotto a partire da una condizione stazionaria col primario a 41 bar e a seguito della quale viene simulata l’apertura della triggering valve secondo la tempistica riportata in

Tabella 14 insieme alle principali grandezze che caratterizzano il test in esame. L’andamento della pressione calcolata dal codice, Figura 40, è in accordo con l’andamento sperimentale, sebbene una depressurizzazione del sistema si osserva subito dopo l’apertura della triggerig valve; il picco finale nell’andamento si deve alla repentina chiusura della valvola su cui agisce il sistema di controllo. Il livello di liquido nelle due piscine predetto dal codice risulta sia qualitativamente che quantitativamente in accordo con i valori sperimentali nella prima parte del test, mentre una sottostima si osserva nelle ultime fasi del test; nell’HX pool ciò è dovuto ad un aumento della pressione al suo interno e nell’overall pool è da

ascrivere ad una maggiore portata nella linea di scarico, si vedano la Figura 41 e la Figura 42. La portata tra le due piscine risulta essere un'altra grandezza che bisognerà investigare per una migliore riproduzione del dato sperimentale, Figura 43. Il livello nel recipiente in pressione risulta sovrastimato rispetto al valore sperimentale richiedendo anch'esso un'indagine sulla logica d'intervento del sistema di controllo Figura 44.

PERSEO Test 9		
Grandezza	Valore Sperimentale	Risultato
Livello nell'Overall Pool m	~4.5	4.5
Temperatura del fluido HX Pool [K]	~298.15	298.15
Livello massimo nella HX Pool [m]	~3.25	~3.12
Apertura - chiusura triggering valve [s]	142 - 163	142 - 163
Massima potenza scambiata [MW]	~15	14.85

Tabella 14: Principali grandezze per il test #9.



Figura 40: Andamento della pressione.

Le portate di vapore e quella di condensato che attraversano lo scambiatore risultano qualitativamente e quantitativamente in accordo con i valori sperimentali sebbene si osservano delle leggere oscillazioni nella portata di condensato dovute all'intervento del sistema di controllo della pressione, Figura 45 e Figura 46.



Figura 41: Andamento del livello nella HX pool.



Figura 42: Andamento del livello nella overall pool.

L'andamento della potenza scambiata è riportato nella Figura 47 e anch'esso, nonostante il limite di cui detto, mostra un buon accordo con quello sperimentale. La Figura 48 mostra invece la temperatura del liquido all'interno dell'overall pool, si vede come risulta

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 51	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

sottostimata l'efficacia dell'iniettore nel mixing dell'acqua in essa contenuta. La Figura 49 riporta l'andamento della potenza scambiata in funzione del livello nella HX pool e si presenta in buon accordo con i valori sperimentali.



Figura 43: Andamento della portata nella triggering valve.



Figura 44: Andamento del livello nel recipiente in pressione.



Figura 45: Andamento della portata di vapore.



Figura 46: : Andamento della portata di condensato.



Figura 47: Andamento della potenza.



Figura 48: Andamento delle temperature nella overall pool.



Figura 49: Andamento della potenza in funzione del livello nella HX pool.

In conclusione, il comportamento globale dell'impianto risulta riprodotto dal codice, sebbene un ulteriore lavoro di perfezionamento appare necessario per una migliore interpretazione di alcuni fenomeni termoidraulici che hanno luogo in questi sistemi di sicurezza avanzati

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 55	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 presentati i risultati dell'attività di ricerca condotta in seguito alla necessità, messa in luce nella scorsa annualità del PAR, di testare ulteriormente la capacità del nodding CATHARE, sin qui sviluppato, di simulare le principali fenomenologie che entrano in gioco durante l'intervento dei sistemi di sicurezza passivi della scilicet SPES2 in condizioni incidentali. Tale capacità è stata studiata sulla base del confronto tra i dati sperimentali e le previsioni del modello nei confronti di un incidente di perdita di refrigerante primario in seguito ad una rottura di un pollice sulla cold leg B2, posizionata tra la balance line e d il vessel. Tale confronto ha permesso di confermare capacità del modello CATHARE di descrivere il comportamento dell'impianto in condizioni incidentali, almeno dal punto di vista qualitativo. Infatti, dall'esame dell'andamento della portata che luisce 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, già messa in luce negli scorsi anni e 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 in luisce ortemente 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 simulando due test sperimentali. La nodalizzazione messa a punto ricalca realisticamente le caratteristiche dell'impianto e di tutti i principali componenti e la sua robustezza era già stata dimostrata dalle analisi preliminari riportate in [6]; in questo lavoro si è passati ad indagare la capacità del modello di simulare i fenomeni termoidraulici che hanno luogo in questi particolari sistemi di sicurezza, grazie anche all'esperienza acquisita nelle annualità precedenti [17]. Sarebbe auspicabile, prima di procedere al lavoro di benchmark che coinvolgerà oltre ai dati sperimentali anche quelli ottenuti mediante altri codici termoidraulici (CATHARE e RELAP5), un perfezionamento del modello TRACE allo scopo di risolvere alcune delle incertezze che sono state evidenziate nel precedente confronto [13],[14] e [15].

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 56	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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'In formazione 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

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 57	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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 Miglioramento dei modelli dei codici integrali CATHARE e TRACE per la simulazione di specifici aspetti della acilit integrale SPES2 . ADPFISS LP1 - 067, Settembre 2016.
- [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 analisys to support downcomer noding, PT ENI 00021, Marzo 1996.
- [8] R. Ferri, A. Achilli, S. Gandolfi, PERSEO Project, Experimental Data Report, SIET 01014RP02.TRACE .0 ser's Manual olume 1: Input Specication Division o 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] F. Bassenghi, Validation of the CFD code Neptune for a full scale simulator for decay heat removal systems with in-pool heat exchangers, Tesi di Dottorato, A.A. 2012/2013, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.
- [11] 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
- [12] I.E.Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, Jaico Publishing House, 2003.
- [13] 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.
- [14] 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
- [15] 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.
- [16] 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- 1227/2014, Settembre 2016.
- [17] S. D'Amico C. Lombardo I. Moscato M. Polidori, G. Vella, Analysis of a full-scale integral test in PERSEO facility by using TRACE code, UIT 2017, Giugno 2017

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS ó LP1 - 088	Rev. 1	Distrib. L	Pag. 58	di 58
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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'Ingegneria 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-200 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 responsabile 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 JET. E' stato responsabile 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.