



Ricerca di Sistema elettrico

Validazione e Verifica (V&V) di CATHARE2 e TRACE sul Programma Sperimentale SPES2

*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

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

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

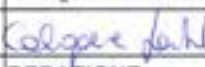
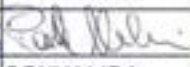
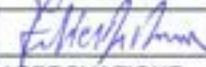
Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

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

Responsabile scientifico ENEA: Felice De Rosa

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi

 Ricerca Sistema Elettrico		Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027		Distrib. L	Pag. 1	di 45
Titolo Validazione e Verifica (V&V) di CATHARE2 e TRACE sul Programma Sperimentale SPES2						
Descrittori Tipologia del documento: Rapporto tecnico Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione Argomenti trattati: Reattori nucleari evolutivi Sicurezza nucleare						
Sommario Il presente documento è stato preparato nel corso della seconda annualità dell'AdP ENEA-MSE nell'ambito dell'obiettivo C (SPERIMENTAZIONE E CALCOLO IN APPOGGIO AGLI STUDI SULLA SICUREZZA) della Linea Progettuale 1 (Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare). Esso riporta i principali risultati dell'attività di validazione e verifica dei codici di sistema TRACE e CATHARE sulla base della campagna sperimentale condotta sull'impianto SPES 2.						
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 1224/2014						
 						
Copia n.			In carico a:			
2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	15/09/2014	NOME	Calogera Lombardo	Paride Meloni	Felice De Rosa
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 45
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

INDICE

INDICE.....	2
LISTA DELLE FIGURE	3
LISTA DELLE TABELLE	4
1. INTRODUZIONE.....	5
2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES2	6
3. CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI CONDOTTA SU SPES2.....	11
4. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA CATHARE	12
5. DESCRIZIONE DEL MODELLO CATHARE DELL'IMPIANTO SPES-2	14
5.1 DESCRIZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA.....	15
5.2 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA LINEA DVI.....	19
5.3 RISULTATI PRELIMINARI	19
6. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA TRACE	23
7. DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO SPES2	25
7.1 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO	25
7.1.1 CANALE DI POTENZA E DOWNCOMERS.....	26
7.1.2 PRESSURIZZATORE	27
7.1.3 LOOP PIPING E POMPE.....	27
7.1.4 TUBI AD U E CASSA DEI GENERATORI DI VAPORE	28
7.2 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA SECONDARIO.....	28
7.2.1 GENERATORI DI VAPORE.....	28
7.2.2 LOOP PIPING.....	29
7.3 NODALIZZAZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA	30
7.3.1 BALANCE LINES, CMTs.....	30
7.3.2 ACCUMULATORI.....	31
7.3.3 PRHR ED IRWST	31
7.3.4 ADS E DVI.....	32
7.4 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO E CALCOLO DELLE PERDITE TERMICHE.....	32
8. ANALISI DEL BL-CL BREAK 2" EQUIVALENT IN SPES-2 TRAMITE TRACE	33
8.1 CONFRONTO RISULTATI TRACE CON I DATI SPERIMENTALI	36
9. CONCLUSIONI	42
ACRONIMI	43
BIBLIOGRAFIA.....	44
CURRICULUM DEL PERSONALE CIRTEN	45

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 3	di 45
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1: Schema semplificato della facility SPES-2.....	6
Figura 2: Rappresentazione schematica dell'accoppiamento dei sistemi PRHR-IRWST.	8
Figura 3: Rappresentazione schematica della CMT.	9
Figura 4: Insieme dei sistemi d'emergenza dell'AP-600.....	10
Figura 5: Particolare della nodalizzazione del canale di potenza.	14
Figura 6: Particolare della nodalizzazione del loop A.....	15
Figura 7: Rappresentazione tramite GUTHARE della nodalizzazione del PRHR.	16
Figura 8: Rappresentazione tramite GUTHARE della nodalizzazione della CMTA.	16
Figura 9: Rappresentazione tramite GUTHARE della nodalizzazione dell'accumulatore.	17
Figura 10: Rappresentazione tramite GUTHARE della nodalizzazione dell'IRWST.	17
Figura 11: Andamento della pressione nel circuito primario.....	20
Figura 12: Portata in uscita dalla rottura.	21
Figura 13: Portata di liquido iniettata dalla CMTA.	21
Figura 14: Portata di liquido iniettata dalla CMTB.	22
Figura 15: Portata attraverso il PRHR.	22
Figura 16: Vista generale della nodalizzazione TRACE di SPES-2.	25
Figura 17: Canale di potenza.....	27
Figura 18: Generatore di vapore B.	29
Figura 19: CMT A e B.....	30
Figura 20: Accumulatore B.	31
Figura 21: IRWST e PRHR.....	32
Figura 22: Break line.	33
Figura 23: Andamento delle temperature misurate nelle cold legs B.	34
Figura 24: Andamento delle temperature misurate nelle cold legs A.	35
Figura 25: Andamento della pressione nel sistema primario.....	36
Figura 26: Andamento del livello nella CMT A.	37
Figura 27: Andamento del livello nella CMT B.	37
Figura 28: Andamento della portata nella CMT A.	38
Figura 29: Andamento della portata nella CMT B.	38
Figura 30: Andamento della portata nell'accumulatore A.....	39
Figura 31: Andamento della portata nell'accumulatore B.....	39
Figura 32: Andamento della portata nell'IRWST injection line A.	40
Figura 33: Andamento della portata nell'IRWST injection line B.	40
Figura 34: Andamento della temperatura nel canale di potenza.	41

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 4 45
--	--	------------------	----------------------	------------------------

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1: Principali caratteristiche della facility SPES-2.	7
Tabella 2: Caratteristiche delle CMTs.	9
Tabella 3: Caratteristiche del PRHR e dell'IRWST.	10
Tabella 4: Matrice delle prove sperimentali condotte su SPES2.	11
Tabella 5: Condizioni di stazionario.	18
Tabella 6: Segnali di sicurezza e intervento dei sistemi di emergenza di SPES2.....	19
Tabella 7: Componenti utilizzati nel codice TRACE.	24
Tabella 8: Condizioni iniziali.	26
Tabella 9: Condizioni iniziali.	34
Tabella 10: Setpoint di apertura delle valvole ADS.	35

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 5	di 45
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

1. INTRODUZIONE

Nella gestione degli impianti nucleari gli aspetti di sicurezza sono stati oggetto di un crescente interesse in tutto il mondo, al fine di prevenire e mitigare le conseguenze di eventuali scenari incidentali originati da eventi iniziatori indesiderati. Nell'eventualità che dovessero verificarsi tali incidenti l'importanza di predire il comportamento dell'impianto nucleare ha fatto sì che molte delle attività di ricerca, degli ultimi anni, siano state finalizzate alla messa a punto di codici di sistema affidabili per le analisi di sicurezza degli impianti nucleari. Tali codici di calcolo chiamati "best-estimate" necessitano di attività di validazione condotte sulla base del confronto con dati numerici provenienti da test effettuati su "facilities sperimentali".

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

A tale scopo in ENEA si è deciso di sviluppare il modello CATHARE di SPES-99 che è stato utilizzato per la reinterpretazione di una prova di perdita di refrigerante di medie dimensioni (IBLOCA) condotta sulla facility nella configurazione denominata SPES-99 [5]. Successivamente:

- da parte dell'Università di Palermo Dipartimento Energia, dell'Informazione e Modelli Matematici "DEIM" è stato sviluppato il noding dell'impianto SPES, nella configurazione SPES2, tramite l'impiego del codice di sistema TRACE
- da parte di ENEA sono stati aggiunti tutti i sistemi di sicurezza passivi al noding CATHARE di SPES99, ottenendo quindi il noding della configurazione integrale di SPES2.

Tali noding sono stati utilizzati per la simulazione di un transitorio di SBO de tipo Fukushima [3].

Sulla base dei risultati presentati in [3], i noding sono stati opportunamente rivisti e ulteriormente sviluppati e utilizzati nel corso della presente annualità del PAR per la simulazione di alcuni dei test della matrice di prova condotta su SPES2 intorno agli anni 90 [4]. In particolare:

- l' ENEA ha simulato, tramite l'impiego del noding CATHARE, il transitorio S06005: cioè un evento incidentale originato da una rottura di due pollici sulla linea di iniezione B dei sistemi di emergenza (Direct Vessel Injection DVI).
- il DEIM ha simulato, tramite l'impiego del noding TRACE, il transitorio denominato S01007: si tratta di una rottura di 2" sulla linea di collegamento tra Cold Leg (CL) to e la Core Make-up Tank.

Il presente rapporto tecnico riporta i principali risultati dell'attività sopra succintamente descritta. Tale attività ha consentito di mettere in luce le capacità dei modelli, CATHARE e TRACE ad oggi sviluppati, di predire il comportamento dell'impianto in condizioni incidentali. Si sono anche messe in evidenza eventuali potenziali migliorie da apportare ai modelli al fine di superare i limiti da essi presentati.

2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES2

La facility SPES-2 [5], il cui layout è presentato nella Figura 1, è stato progettato e costruito per simulare nella maniera più accurata possibile il comportamento termoidraulico dell'AP600. 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.

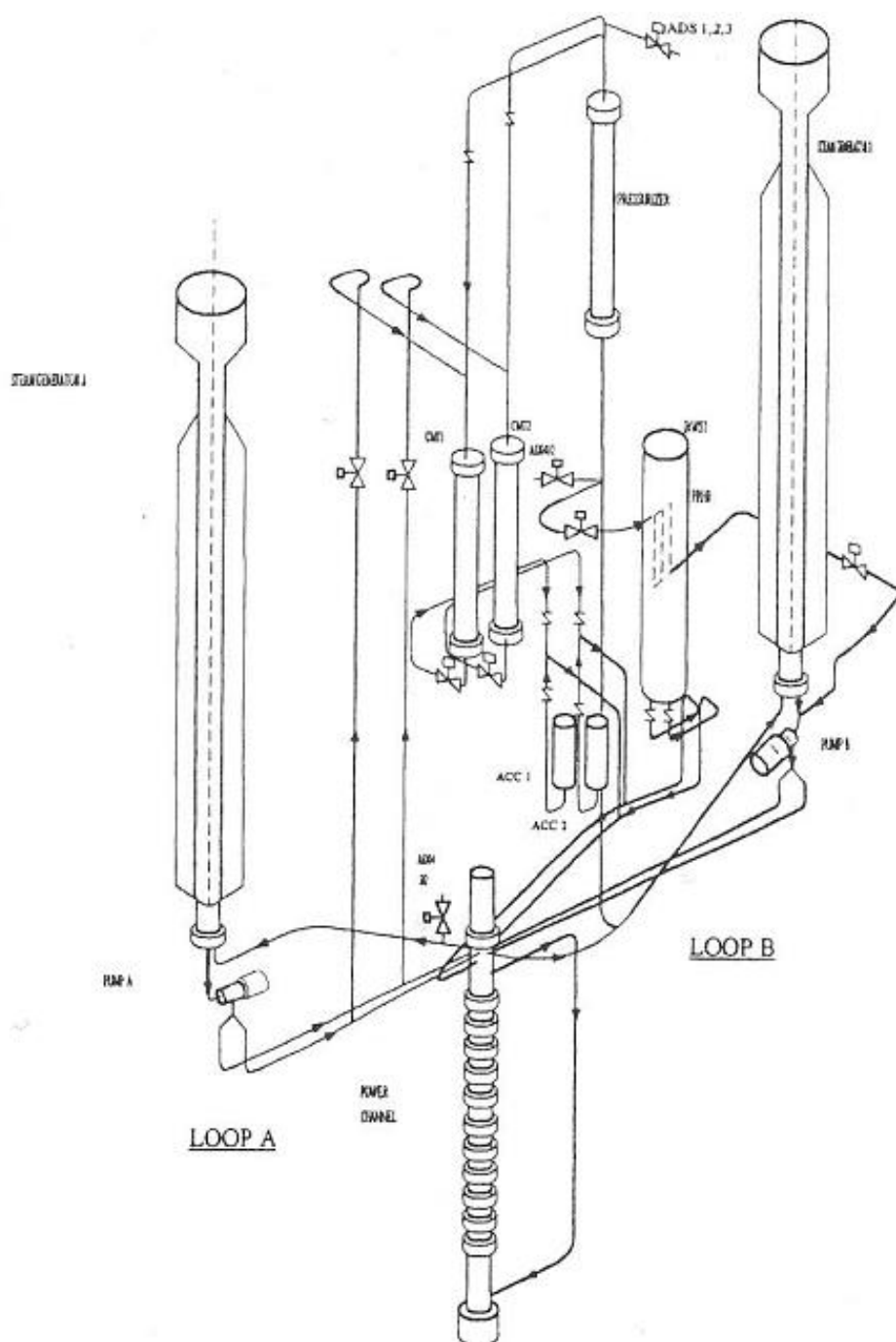


Figura 1: Schema semplificato della facility SPES-2.

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

Le caratteristiche principali dello SPES-2 sono riportate in

Tabella 1.

La descrizione dettagliata dei sistemi primario e secondario di SPES-2 è riportata in [6].

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

Tabella 1: Principali caratteristiche della facility SPES-2.

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

Tali sistemi sono costituiti da:

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

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

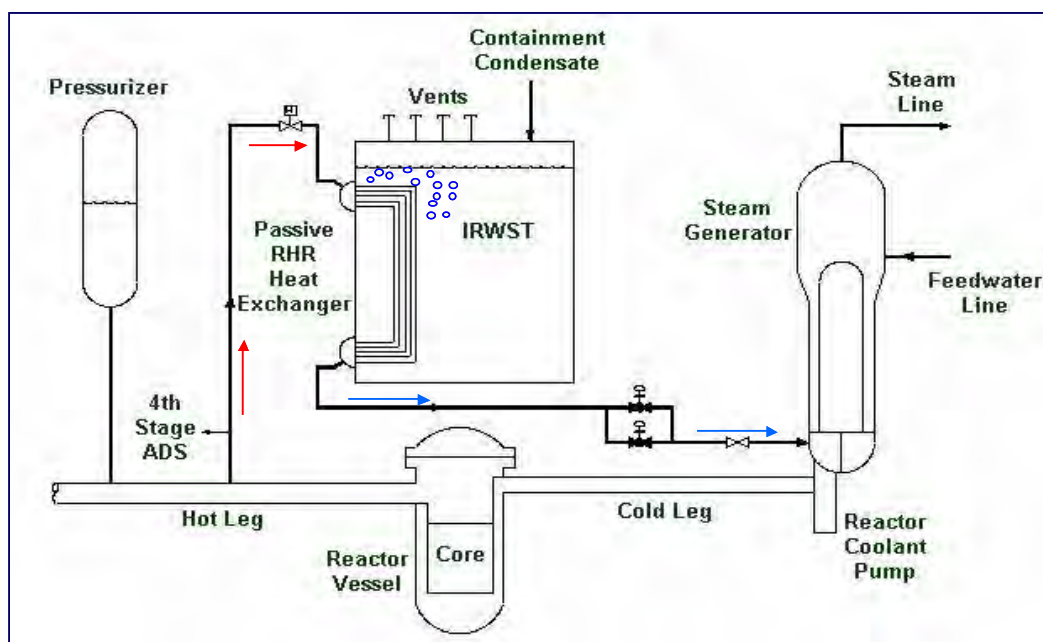


Figura 2: Rappresentazione schematica dell'accoppiamento dei sistemi PRHR-IRWST.

- Due Core Make-up Tanks (CMTs). Le CMT rappresentano per l'AP-600 i classici sistemi di iniezione di emergenza di alta pressione degli impianti PWR. Ciascuna delle due CMTs, riempite con acqua borata, è costituita da un grosso volume di acciaio collegato alla sua sommità, tramite una linea di ingresso, a una delle cold leg e alla sua base, tramite una linea di scarico, a una delle DVI. Ricordiamo poi che le DVIs sono direttamente collegate al downcomer del vessel. In condizioni di normali esercizio dell'impianto le valvole di controllo poste sulle linee di ingresso sono aperte in modo tale che ciascuna delle CMTs si trovi nelle medesime condizioni 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.

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

Tabella 2: Caratteristiche delle CMTs.

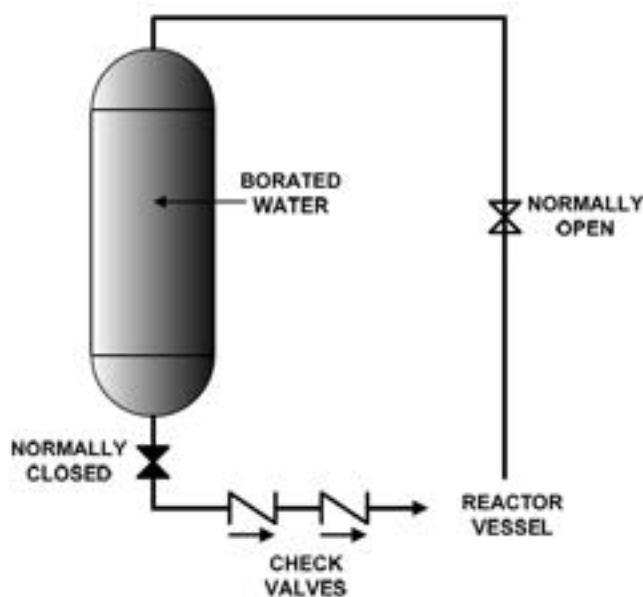


Figura 3: Rappresentazione schematica della CMT.

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

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

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

Tabella 3: Caratteristiche del PRHR e dell'IRWST.

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

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

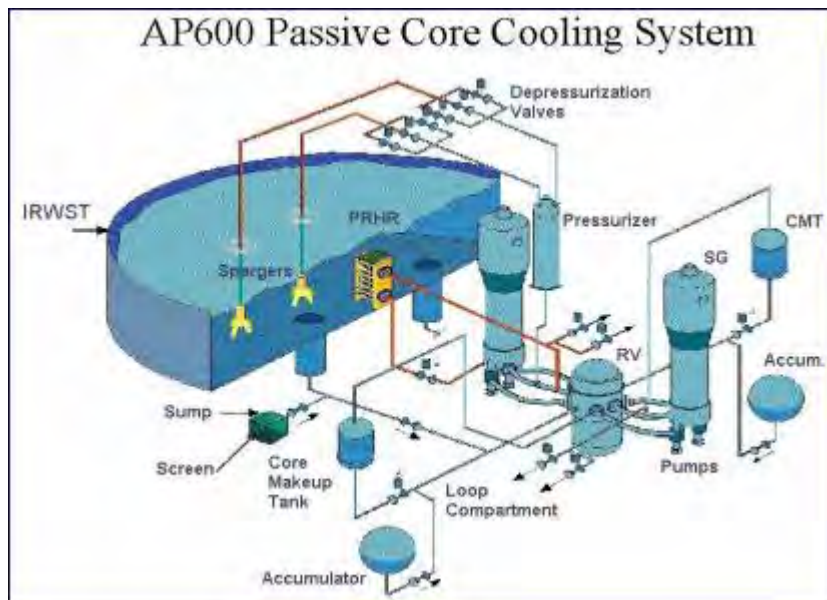


Figura 4: Insieme dei sistemi d'emergenza dell'AP-600.

3. CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI CONDOTTA SU SPES2

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

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

Tabella 4: Matrice delle prove sperimentali condotte su SPES2.

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

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 12	di 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

4. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA CATHARE

Il codice di sistema CATHARE 2 [7] utilizzato per lo sviluppo del modello numerico che verrà presentato nel Capitolo 5, rappresenta il codice di riferimento utilizzato per le analisi di sicurezza necessarie per il licensing dell'EPR (European Pressurized Reactor). Esso tratta la termoidraulica del fluido termovettore in una rete sostanzialmente monodimensionale tramite un modello a due fluidi (liquido e vapore) e 6 equazioni di bilancio (massa, quantità di moto ed energia) per le 6 principali variabili: entalpia di liquido e gas (H_l , H_g), velocità di liquido e gas (V_l , V_g), pressione (P) e grado di vuoto (α). Inoltre sono incluse le equazioni di trasporto per considerare fino a quattro tipi di gas incondensabili (x_i) e fino a dodici componenti radiochimici.

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

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

I moduli principali in esso contenuti sono:

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

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 13 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------------

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

5. DESCRIZIONE DEL MODELLO CATHARE DELL'IMPIANTO SPES-2

La nodalizzazione della facility, realizzata tramite l'impiego della versione V2.5_2 mod8.1 di Cathare, è stata 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 [5].

Va ricordato che le dimensioni in altezza della facility SPES sono in scala 1:1 mentre le sezioni di passaggio sono in scala 1:397 rispetto quelle del reattore AP-600.

Nella Figura 5 e nella Figura 6 vengono riportati gli schemi della nodalizzazione del canale di potenza e del loop A caratterizzato dalla presenza del pressurizzatore. Per la descrizione geometrica dettagliata del modello vedi [6], qui vogliamo semplicemente ricordare che molte delle scelte nella nodalizzazione della facility influenzano fortemente il risultato delle simulazioni. Va comunque messo in evidenza che è stata dedicata particolare attenzione alla nodalizzazione dei sistemi di emergenza di cui è dotato l'impianto, dal momento che tali sistemi sono del tipo passivo e il loro funzionamento è basato su fenomeni fisici quali la circolazione naturale...e che sulla esatta descrizione di tali fenomeni da parte dei codici di sistema si sta attualmente indagando.

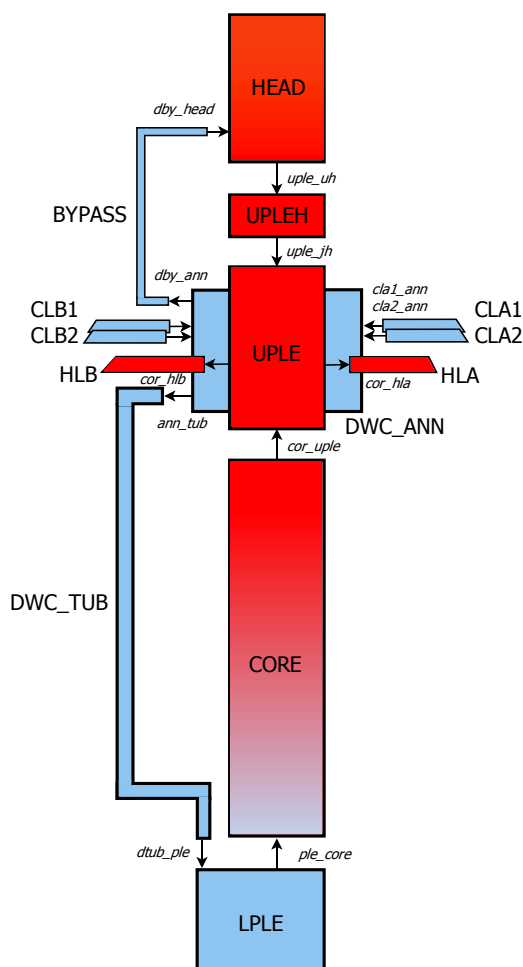


Figura 5: Particolare della nodalizzazione del canale di potenza.

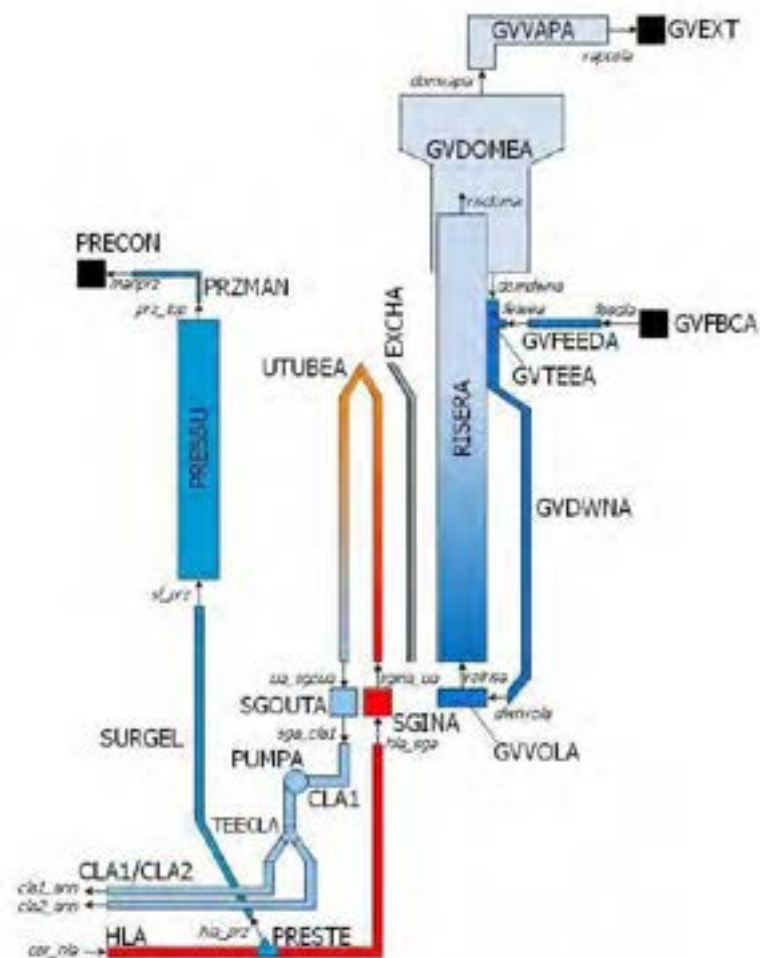


Figura 6: Particolare della nodalizzazione del loop A.

5.1 DESCRIZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA

In questo paragrafo riportiamo alcuni particolari della nodalizzazione dei sistemi di emergenza dell'AP 600.

Il PRHR è stato nodalizzato tramite (vedi Figura 7) :

- Un tee di innesto della supply line in hot leg A corredato di valvola di check e di control raggruppate tramite l'operatore ECHECK;
- Un axial che rappresenta la supply line (SLPR);
- Un axial che rappresenta lo scambiatore di calore a C (HXPR);
- Un axial che rappresenta la return line (RLPR);
- Un tee di innesto della return line in cold leg A1 corredato di valvola di check e di control raggruppate tramite l'operatore ECHECK.

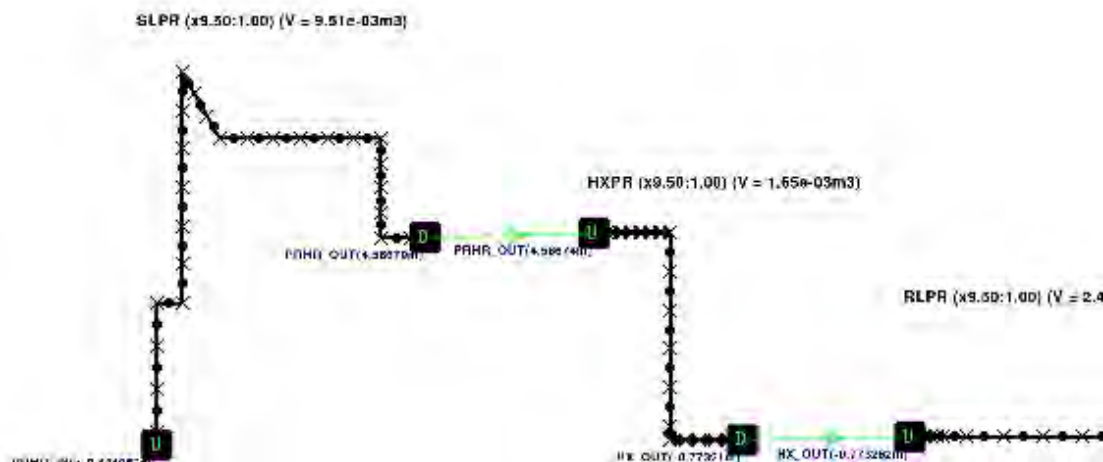


Figura 7: Rappresentazione tramite GUTHARE della nodalizzazione del PRHR.

Ciascuna delle due CMTs è stata nodalizzata tramite (vedi **Figura 8**) :

- Un tee d'innesto della ILCA in cold leg (B1 e B2)
- Un axial ILCA all'interno del quale, in stato stazionario, il fluido si trova in condizioni prossime a quelle del fluido primario,
- Un tee di innesto della CMT (A e B) in ILCA: il fluido all'interno delle CMT si trova in condizioni di pressione coincidente con quella del primario ma la sua temperatura è prossima ai 20 °C,
- Un tee di innesto in DVI (A e B).

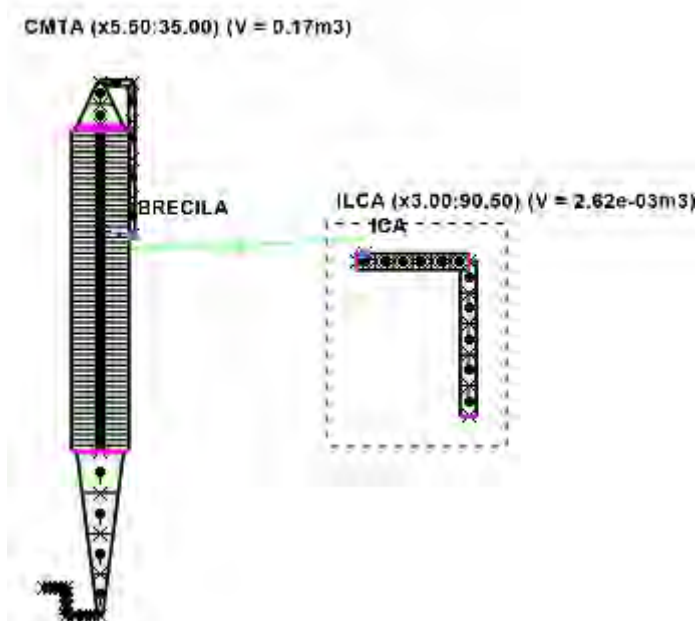


Figura 8: Rappresentazione tramite GUTHARE della nodalizzazione della CMTA

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 17 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------------

Ciascuno degli accumulatori è stato nodalizzato tramite (vedi **Figura 9**):

- Un volum che rappresenta l'accumulatore;
- Un axial che rappresenta la linea di scarico dell'accumulatore (DISCHL1);
- Una valvola di check e una di control raggruppate tramite l'operatore ECHECK (collegate sulla giunzione che collega la DISCHL1 alla DVI
- Una valvola di check e una di control raggruppate tramite l'operatore ECHECK (collegate sulla giunzione che collega la DVI al downcomer).

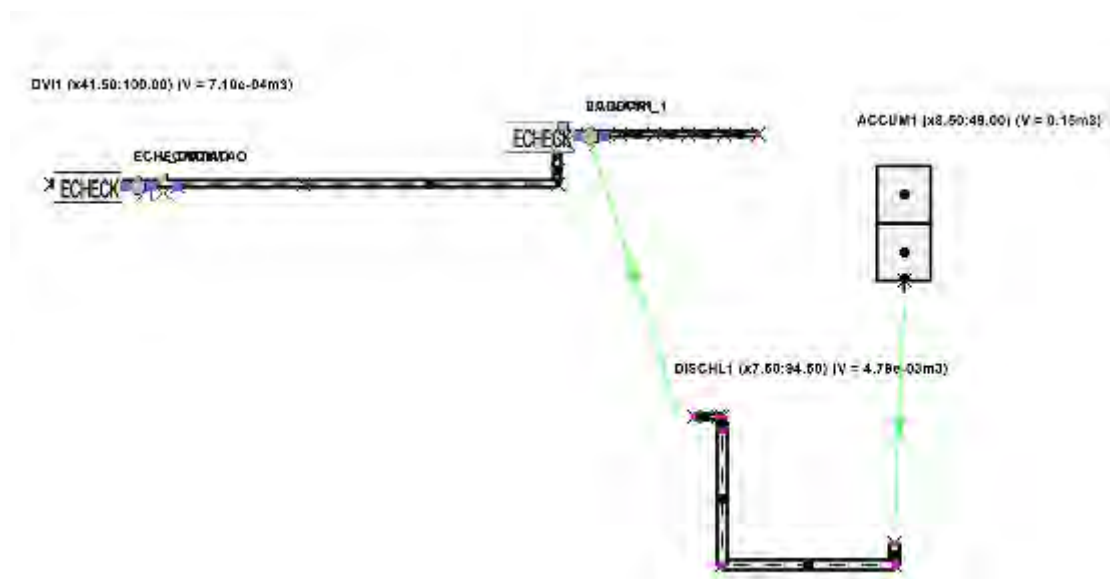


Figura 9: Rappresentazione tramite GUTHARE della nodalizzazione dell'accumulatore.

Il particolare della nodalizzazione dell'IRWST è presentato in **Figura 10**).

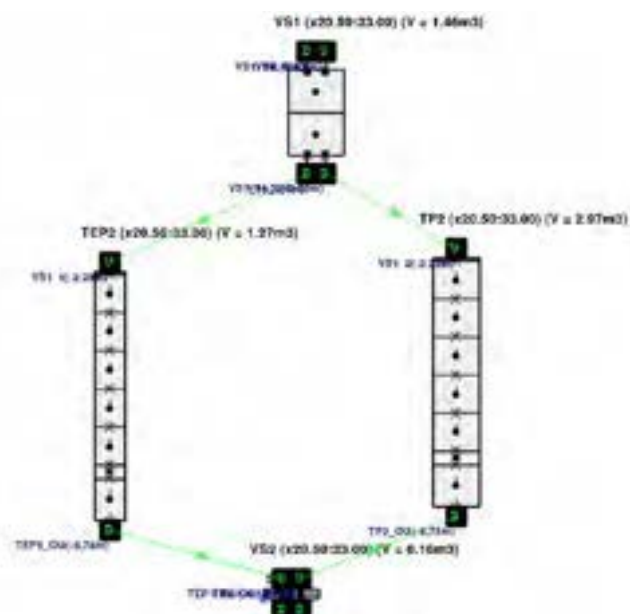


Figura 10: Rappresentazione tramite GUTHARE della nodalizzazione dell'IRWST.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 18	di 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Essa è costituita da:

- Due axial che rappresentano il tratto della piscina accoppiato termicamente allo scambiatore di calore dell'HXPR ;
- Un volum che rappresenta la base della piscina;
- Un volum che rappresenta la parte in alto della piscina supposta in collegamento con l'ambiente circostante.

La necessità di nodalizzare la piscina dell'IRWST nel modo sopra descritto è scaturita dal fatto che l'accoppiamento termico in CATHARE può realizzarsi solo tra due elementi del tipo axial. Inoltre la presenza degli operatori ECHECK è giustificata dal fatto che i sistemi di emergenza, sopra sommariamente descritti, in CATHARE vanno considerati come delle DEADZONE che necessitano quindi di essere isolati, tramite la chiusura della valvola di control, in fase di inizializzazione del sistema.

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

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

Tabella 5: Condizioni di stazionario.

5.2 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA LINEA DVI

Nel presente paragrafo vengono riportati i confronti tra i dati sperimentali e i risultati del transitorio simulato tramite l'impiego della nodalizzazione CATHARE sopra descritta. Si è deciso di analizzare il transitorio numero 6 riportato in Tabella 4: si tratta cioè di un evento incidentale originato da una rottura di due pollici sulla linea di iniezione B dei sistemi di emergenza (Direct Vessel Injection DVI). La sequenza dei segnali di sicurezza e delle azioni che da essi conseguono per l'impianto SPES2 vengono riportati in Tabella 6 :

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

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

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

5.3 RISULTATI PRELIMINARI

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

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

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

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

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

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

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

La Figura 11 riporta l'andamento della pressione nel circuito primario, da essa si può evidenziare come tale variabile predetta da CATHARE ricalchi, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, abbastanza bene i dati sperimentali per la fase di depressurizzazione violenta, mentre se ne discosti, dal punto di vista quantitativo, subito dopo.

La Figura 12 mostra l'andamento della portata di fluido in uscita dal circuito primario attraverso la rottura, mentre la Figura 13 e la Figura 14 mostrano la portata iniettata nel circuito primario dalle due CMTs.

Dall'esame di tali figure appare evidente come, la nodalizzazione CATHARE fino ad oggi sviluppata e qui utilizzata, non consente di descrivere esattamente il comportamento in condizioni incidentali dell'impianto. Ciò potrebbe essere dovuto:

- alla difficoltà di descrivere puntualmente le perdite di carico distribuite nell'intero circuito;
- alla non esatta conoscenza delle perdite termiche dell'impianto;
- alla necessità di nodalizzare in modo tridimensionale il downcomer anulare [8] , in virtù delle complesse fenomenologie che vengono ad instaurarsi in esso, in prossimità dell'attacco delle DVI, laddove del fluido freddo entra in contatto con un sistema sensibilmente più caldo.

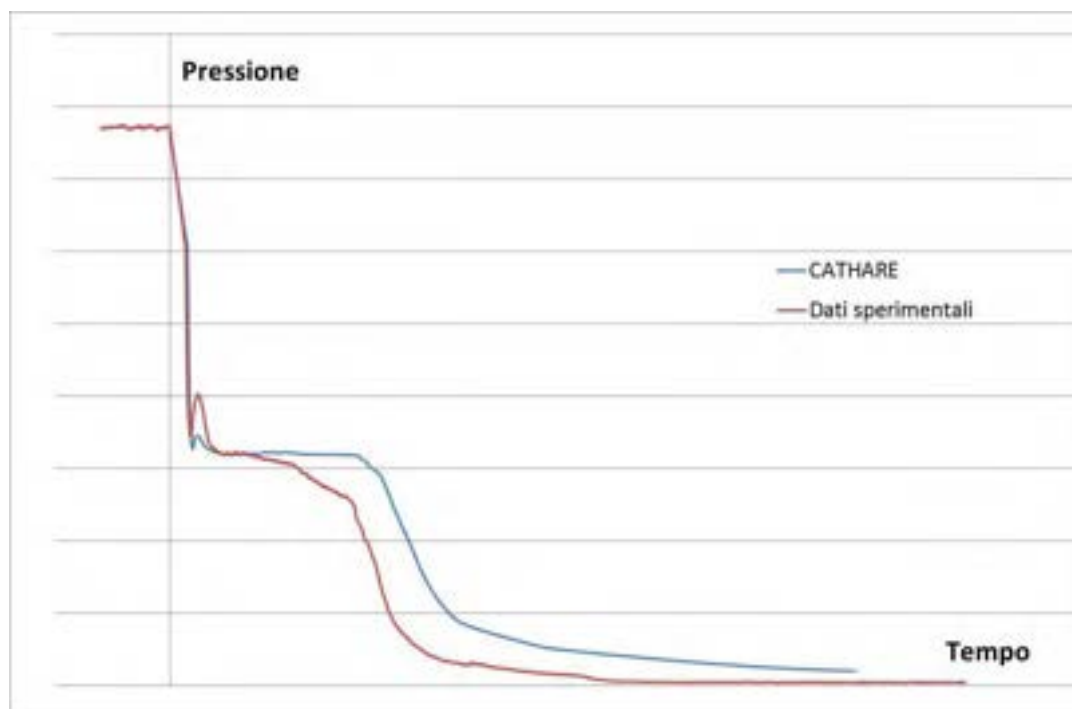


Figura 11: Andamento della pressione nel circuito primario.

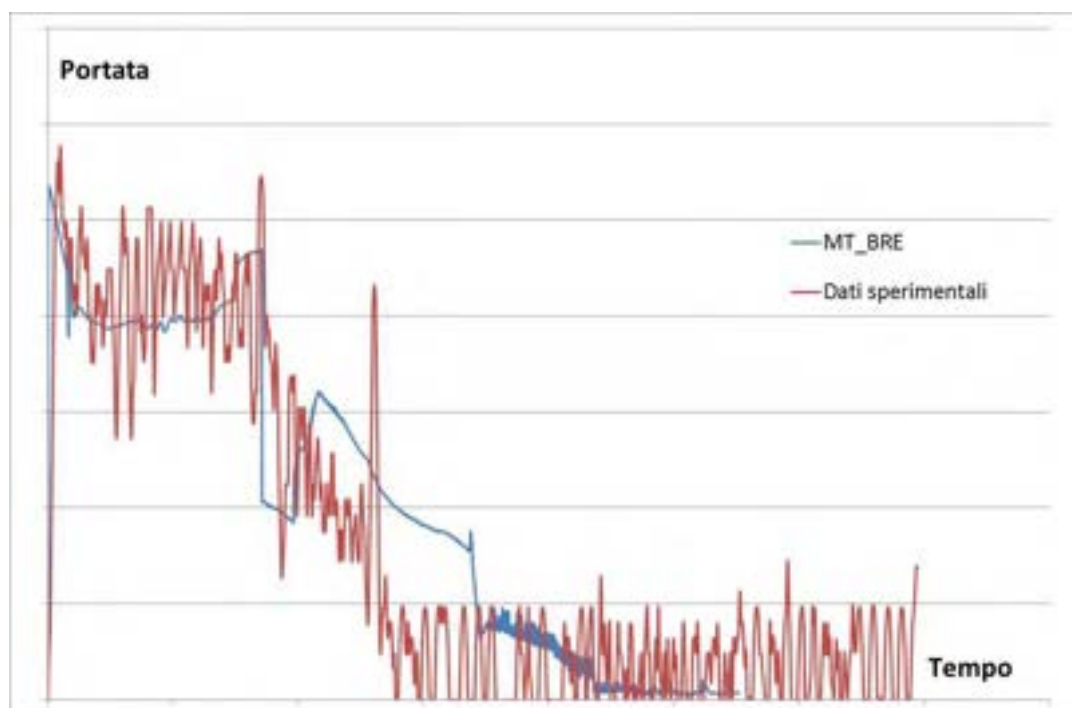


Figura 12: Portata in uscita dalla rottura.

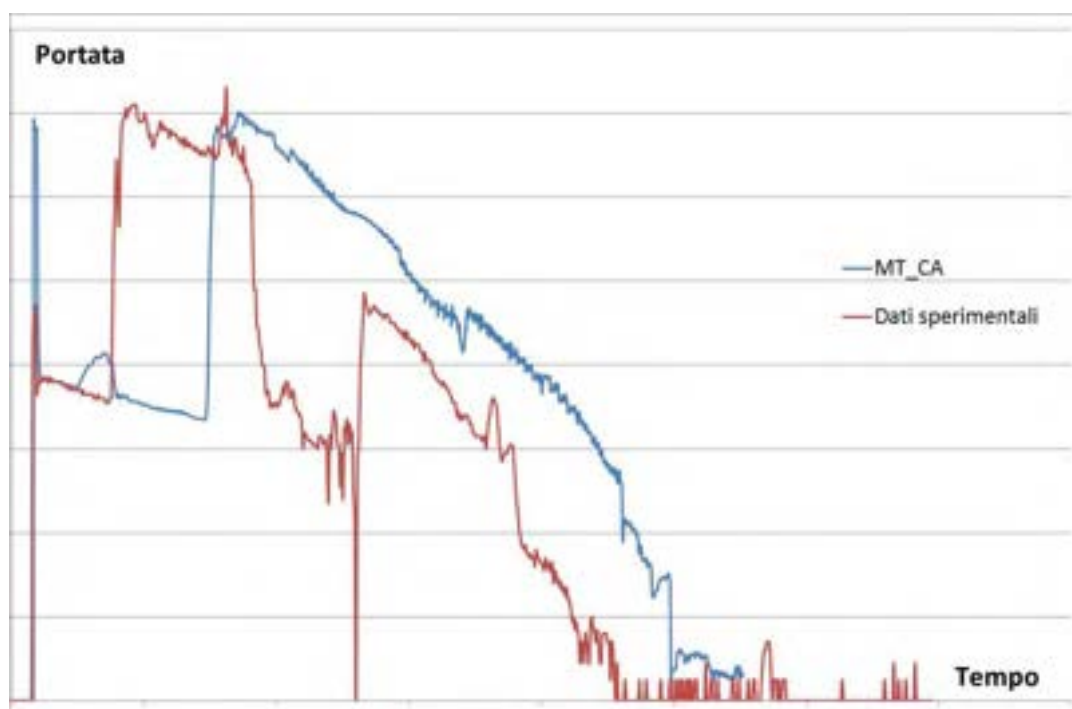


Figura 13: Portata di liquido iniettata dalla CMTA.

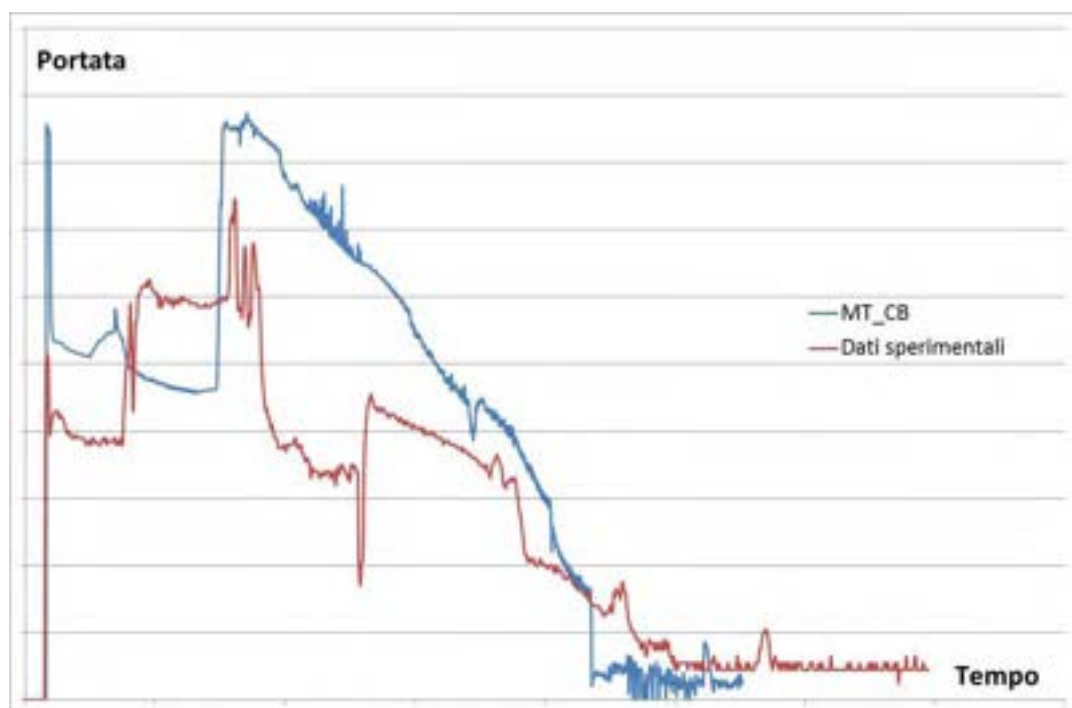


Figura 14: Portata di liquido iniettata dalla CMTB.

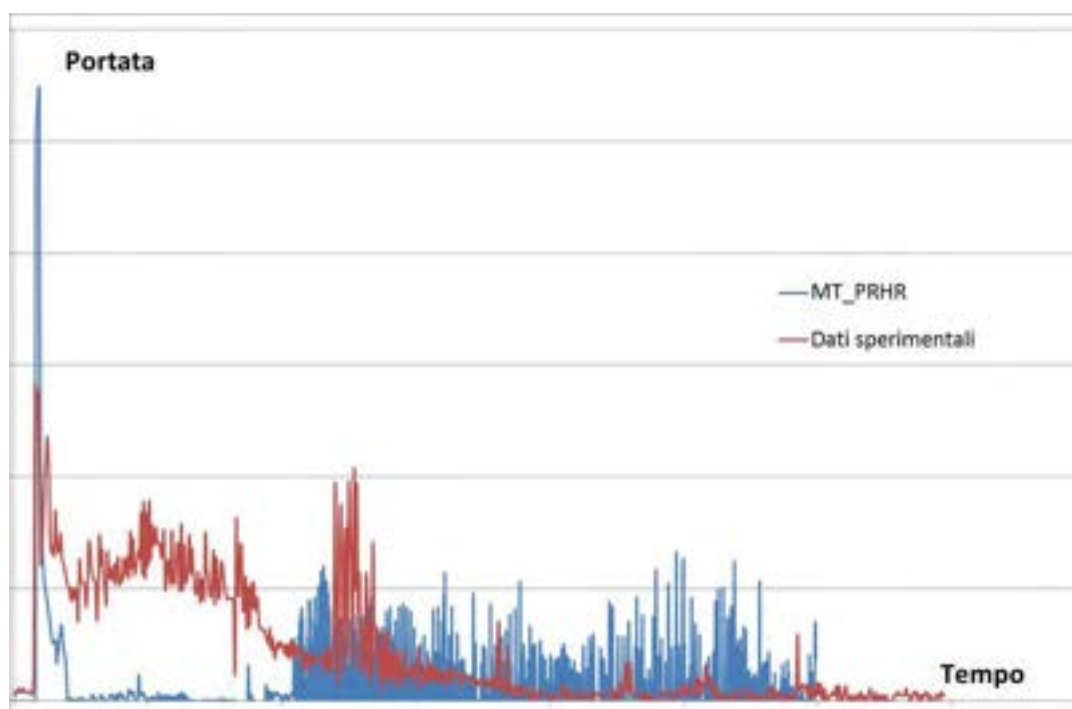


Figura 15: Portata attraverso il PRHR.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 23	di 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

6. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA TRACE

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

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

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

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

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

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

Tale codice è il TRAC/RELAP Advanced Computational Engine (TRACE) ed è usato per studiare situazioni incidentali di LWR quali transitori operazionali, LOCA e caratterizzare i fenomeni che si destano negli impianti sperimentali atti a simulare il comportamento 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 7 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 [10].

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 24 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------------

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

Tabella 7: Componenti utilizzati nel codice TRACE.

7. DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO SPES2

La nodalizzazione TRACE dell'intero impianto sperimentale SPES-2, sviluppata dal gruppo di ricerca del dipartimento DEIM dell'Università di Palermo è riportata Figura 16. La modellazione dei vari componenti dei circuiti primario e secondario e delle logiche di intervento e regolazione è basata sui dati progettuali contenuti nel rapporto "SPES-2 facility description", [5].

Per la simulazione dell'impianto sono stati utilizzati 158 componenti idraulici, 258 strutture termiche e 538 sistemi di controllo. Particolare cura è stata posta nella valutazione dei fattori di perdita di carico [11] sia distribuita sia concentrata (gomiti, restringimenti, allargamenti, etc..) tali da riprodurre realisticamente la distribuzione di pressione nell'impianto, sia in condizioni di stazionarietà a piena potenza sia nelle condizioni determinate dal transitorio esaminato.

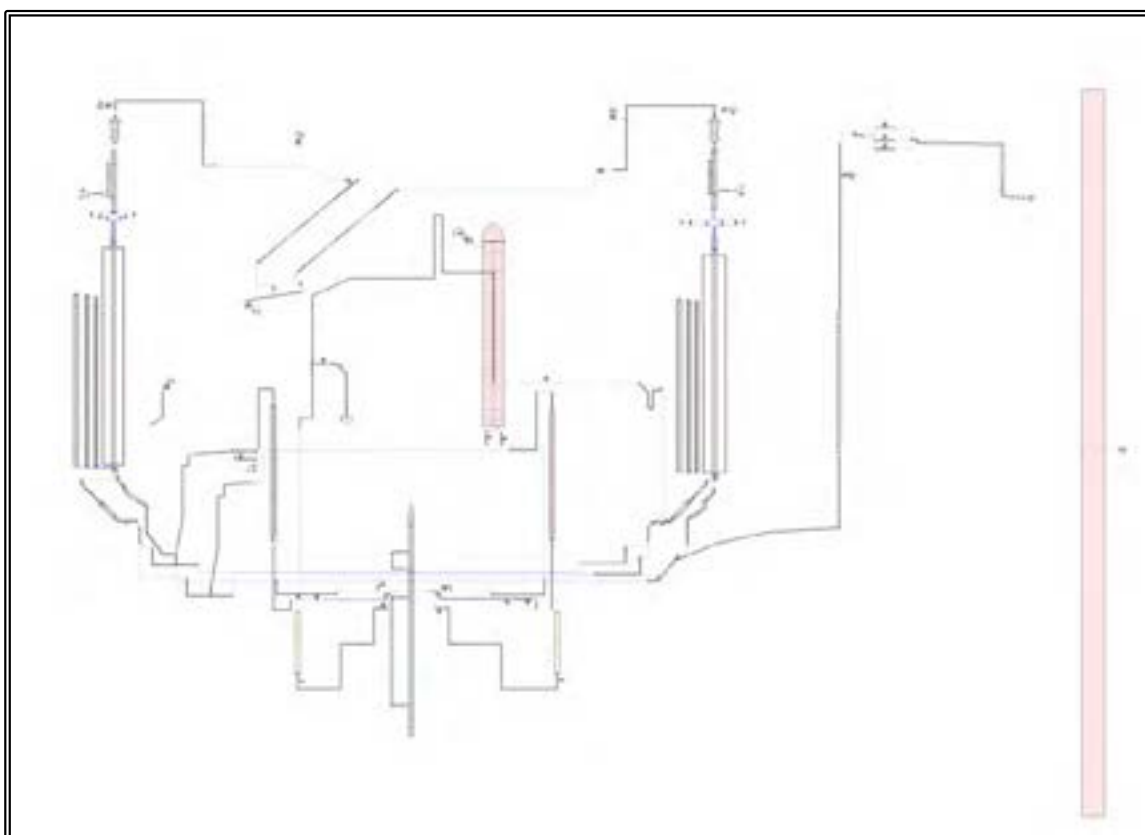


Figura 16: Vista generale della nodalizzazione TRACE di SPES-2.

7.1 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO

Il sistema primario comprende tutti i componenti presenti nell'impianto reale più tutte le linee di collegamento con i circuiti di emergenza. La modellazione dei componenti è stata fatta prevalentemente con componenti di tipo "PIPE" i quali consentono una descrizione monodimensionale del moto, ove necessario sono stati utilizzati componenti "TEE", che simulano un moto pseudo-2D nelle giunzioni nelle quali si ha l'incrocio tra due tubazioni, e componenti "VESSEL" i quali permettono una descrizione del moto 3D; naturalmente gli elementi "speciali" come pompe e valvole sono stati descritti nell'input con componenti

appositi. Ad ogni componente è stata associata una o più strutture termiche in modo tale da rispettare tutte le masse metalliche presenti nell'impianto.

Una volta messo a punto l'input, sono state condotte simulazioni in condizioni stazionarie e i risultati sono stati messi a confronto con quelli disponibili in letteratura [2]. La Tabella 8 riporta le principali grandezze dell'impianto in condizioni stazionarie.

INITIAL CONDITIONS				
Quantity	Recorded value	Specified value	TRACE value	Units
Heater rod power	4.97	4.99	4.99	MW
Pressurizer pressure	15.37	15.47	15.46	MPa
Cold leg temperature (A1, A2) (RPV connection) (B1, B2)	279.7, 279.4, 277.6, 277.6, (Ta = 278.5)	-	275.17, 275.17 274.28, 274.28	°C
Core inlet temperature	277.9	275.4	275.01	°C
Core outlet temperature	320.4	313.6	314.73	°C
Hot leg temperature (A, B)	315.8, 316.9 (Ta = 316.3)	-	314.13, 313.95	°C
Core flowrate	23.55	24	23.56	Kg/s
Cold leg flowrate (A1, A2, B1, B2)	6.06, 6.24 5.56, 5.82	6.035	6.07, 6.22 (A1,A2) 5.60, 5.81 (B1,B2)	Kg/s
Pump speed (A, B)	3057, 2769	-	2678.58, 2530.56	rpm
DC-UH Bypass flowrate	0.13	0.14	0.14	Kg/s
Pressurizer level	3.77	3.8	3.77	m
SG pressure (A,B)	4.97, 4.94	4.9	5.05, 5.05	MPa
SG DC level (A,B)	12.53, 12.70	13	12.62, 12.75	m
SG Main Feed Water temperature (A,B)	225.6, 226.9	227	227.85, 227.85	°C
SG Main Feed Water pressure (A/B)	5.16/5.08	-	5.16, 5.16	MPa
SG Main Feed Water flowrate (A,B)	2.0, 2.2	1.35	1.39, 1.31	Kg/s
ACC level (A,B)	2.33, 2.30	2.3	2.3, 2.3	m
ACC water temperature (A,B)	24.4, 23.4	20	20.9, 20.90	°C
ACC pressure (A,B)	4.93, 4.98	4.8	4.92, 4.92	MPa
Heat losses	-	-	0.17	MW

Tabella 8: Condizioni iniziali.

7.1.1 CANALE DI POTENZA E DOWNCOMERS

L'intero canale di potenza (PC), Figura 17, è stato descritto con un componente VESSEL discretizzato con 38 livelli assiali, 4 radiali e 8 azimutali. I primi quattro livelli assiali sono rappresentativi del lower plenum, i successivi 27 livelli comprendono riser, upper plenum e annular downcomer mentre gli ultimi 7 volumi includono l'upper head; radialmente la modellazione è stata effettuata in maniera tale da far cadere le parti interne del PC (riser, upper plenum) all'interno dei primi tre raggi mentre l'ultimo è servito alla nodalizzazione dell'annular downcomer, dei volumi del lower plenum e dell'upper head dove il PC presenta una sezione trasversale maggiore; gli otto settori azimutali sono stati utilizzati per modellare opportunamente i diversi imbocchi di entrata e di uscita presenti nel PC i quali, nel complesso, sono distribuiti secondo otto diverse angolazioni. Il tubular downcomer è stato modellato mediante due PIPE così come il downcomer-upper head by pass.

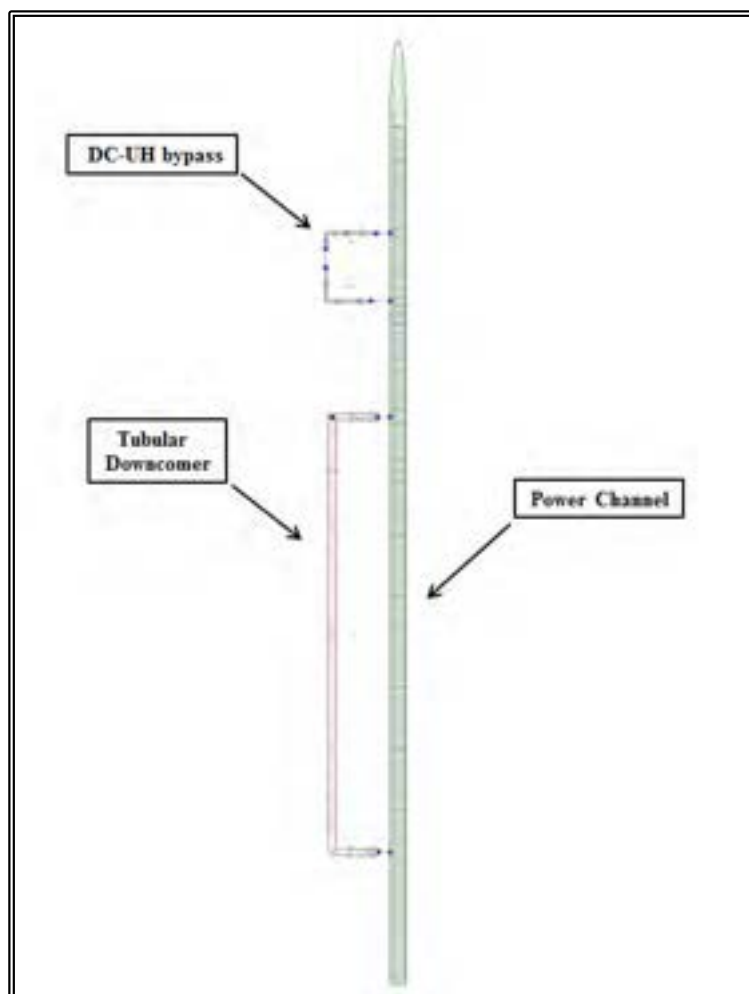


Figura 17: Canale di potenza.

7.1.2 PRESSURIZZATORE

Il pressurizzatore è stato modellato mediante due PIPE: il primo suddiviso in 24 volumi mentre il secondo, simulante la parte superiore di tale componente è stato nodalizzato con 2 volumi. La surge line che lo connette con la hot leg A è stata discretizzata mediante un PIPE con 36 volumi per meglio simulare lo svuotamento ed il riempimento del pressurizzatore durante uno scenario incidentale. La linea che collega il pressurizzatore ai primi tre stadi dell'ADS è stata simulata impiegando due PIPE, il primo suddiviso in 25 volumi mentre il secondo in 3; quest'ultimo PIPE si collega ad un componente VESSEL il quale simula il distributore che porta ai vari stadi dell'ADS.

7.1.3 LOOP PIPING E POMPE

La nodalizzazione del piping del sistema primario è stata effettuata impiegando componenti quali PIPE e TEE. Le cold legs del loop B sono state simulate mediante due TEE, entrambe suddivise in 19 volumi, i cui rami secondari costituiscono l'ingresso delle balance lines delle CMT mentre le cold legs del loop A, non avendo connessioni con rami secondari sono state

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 28	di 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

modellate con due PIPE suddivisi in 16 volumi . Le hot legs, oltre a presentare delle leggere differenze geometriche, differiscono poiché il ramo A vede raccordate alla hot leg la PRHR supply line nel tratto orizzontale subito a valle del bocchello di uscita del pressure channel e la surge line poco più avanti; è stato dunque necessario nodalizzare la hot leg A con due TEE ed un successivo PIPE che si immette nella cassa del generatore di vapore per un ammontare complessivo di 37 volumi mentre per quanto riguarda la hot leg B questa è costituita da un unico PIPE discretizzato in 34 volumi. Anche i pump suction presentano delle differenze poiché sempre sul ramo A, subito a monte della pompa, si immette la PRHR return line, quindi è stato necessario modellare questo elemento del loop A con un PIPE ed un TEE mentre per il medesimo componente presente nel ramo B si è utilizzato un PIPE utilizzando, nel primo e nel secondo caso rispettivamente, 27 e 24 nodi. Infine le pompe sono state descritte secondo l'apposito modello presente in TRACE rispettando tutte le caratteristiche geometriche e fluidodinamiche riportate nel report descrittivo dell'impianto [5].

7.1.4 TUBI AD U E CASSA DEI GENERATORI DI VAPORE

I fasci tubieri dei due rami sono stati discretizzati in maniera identica poiché non vi è alcuna differenza tra i generatori dell'impianto SPES-2. Si è deciso di modellare con 3 tubi equivalenti, e non con uno solo, i 13 tubi di ciascun ramo poiché questi, essendo disposti su tre file e presentando differenti altezze, potrebbero avere diversa attitudine a dar luogo a particolari fenomeni durante transitori incidentali; ogni tubo equivalente si compone di 48 volumi. Un approccio esclusivamente monodimensionale avrebbe creato delle difficoltà nell'accoppiamento dei tre PIPE simulanti il fascio tubiero con la cassa dei generatori di vapore, è stato quindi deciso di modellare questo elemento con un componente VESSEL suddiviso in 6 nodi assiali, 3 radiali e 2 azimutali.

7.2 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA SECONDARIO

Il modello del sistema secondario è stato costruito a partire dai dati reperibili in [5] e comprende parte delle main feedwaters A e B, i generatori di vapore A e B, le main steam lines A e B ed il main steam header; non essendovi quindi un vero e proprio circuito chiuso si impongono come condizioni al contorno fluidodinamiche le portate delle main feedwaters e la pressione a valle del main steam header.

7.2.1 GENERATORI DI VAPORE

I due generatori di vapore, Figura 18, sono stati modellati in maniera identica poiché non presentano differenze geometriche. Il riser contenente il fascio tubiero e la base del downcomer anulare sono stati discretizzati con un componente VESSEL suddiviso in 32 livelli assiali, 2 settori radiali e 2 settori azimutali; ogni downcomer tubolare è stato modellato con due PIPE per un totale di 17 volumi. La parte del generatore contenente la parte alta del riser, il separatore a ciclone, il downcomer anulare ed l'ingresso della main feedwater line è stata riprodotta mediante un componente VESSEL composto da 13 livelli assiali, 3 settori radiali ed un settore azimutale ed il componente "SEPARATOR", utilizzato in TRACE per la simulazione dei separatori a ciclone e dei dryer, il quale è stato suddiviso in 5 volumi; infine il duomo del generatore di vapore è stato modellato per mezzo di un PIPE comprendente 11 nodi.

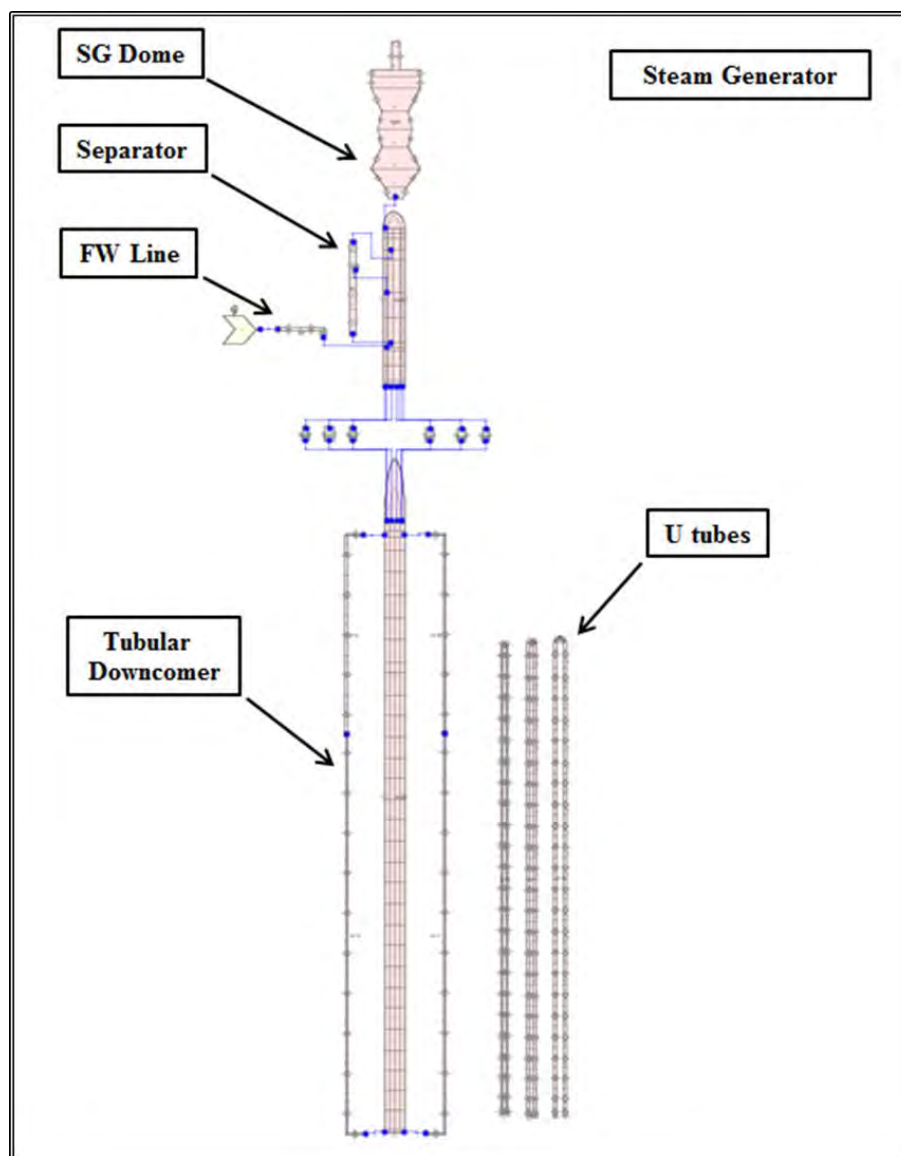


Figura 18: Generatore di vapore B.

7.2.2 LOOP PIPING

La nodalizzazione del piping del sistema secondario è stato effettuata utilizzando componenti monodimensionali.

Questa, per ogni ramo, comprende:

- Main feedwater (solo in parte) : PIPE, 3 volumi.
- Main steam line fino alla MSLIV : PIPE, 7 volumi.
- Main steam line fino al main steam header: PIPE, 3 volumi.
- Main steam header: PIPE, 1 volume.

7.3 NODALIZZAZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA

Tutti i sistemi di emergenza sono stati modellati nell'input TRACE. Per realizzare tali elementi sono stati utilizzati prevalentemente componenti quali PIPE e TEE ma ,ove ritenuto necessario, è stato utilizzato il componente VESSEL. Tutte le valvole sono state poi modellate mediante l'apposito componente presente nel codice di calcolo.

7.3.1 BALANCE LINES, CMTs

Le balance line connettono le cold legs B alle CMTs tramite due linee gemelle ma, poiché la linea B è provvista di giunzioni laterali per il posizionamento di elementi simulanti eventuali BREAK, si è ricorso ad una nodalizzazione leggermente differente delle stesse; la balance line A comprende due PIPE per un totale di 57 volumi mentre la linea B presenta due PIPE ed un TEE discretizzati con 62 nodi. Le CMTs, essendo identiche, sono state modellate alla stessa maniera, ciascuna mediante un PIPE da 64 volumi per poter simulare nel migliore dei modi il loro svuotamento ed i fenomeni di condensazione del vapore sulle pareti. Le linee di iniezione che collegano le CMTs alle DVI sono state modellate rispettando tutti i dati caratterizzanti la geometria che risulta essere leggermente differente tra le due; la linea di iniezione A, come la linea B è composta da due PIPE, due “VALVE” (una di isolamento e l'altra di tipo check) ed un TEE necessario per il collegamento con la linea di scarico degli accumulatori; entrambe sono suddivise complessivamente in 23 volumi. La Figura 19 mostra un insieme degli elementi sopra descritti.

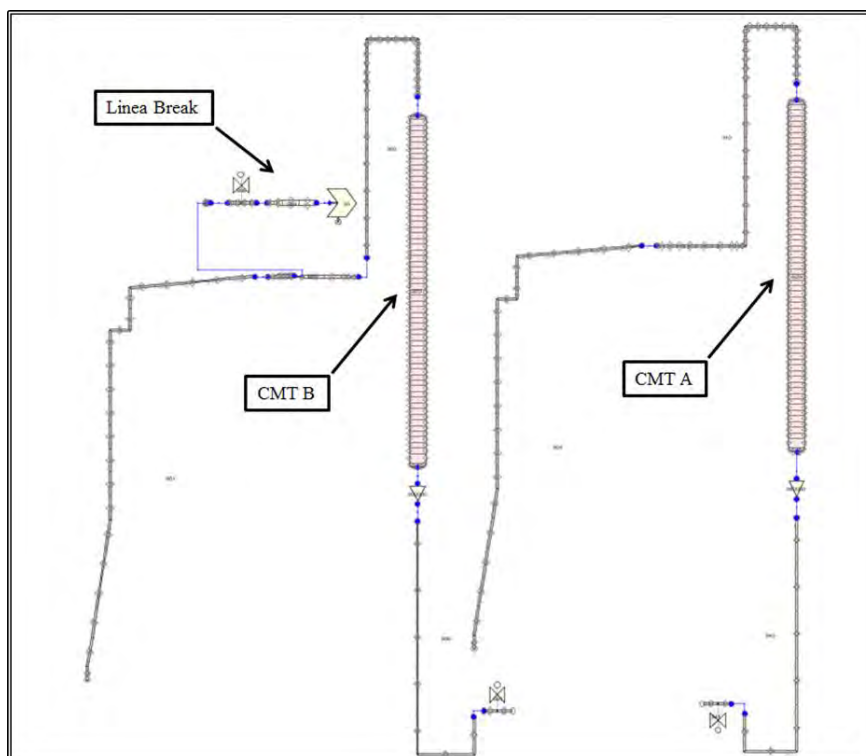


Figura 19: CMT A e B.

7.3.2 ACCUMULATORI

Anche gli accumulatori, Figura 20, presentano, tra loro, le medesime caratteristiche quindi sono stati descritti nell'input nello stesso modo sfruttando una speciale opzione del componente PIPE; nonostante le dimensioni relativamente grandi il particolare modello adottato da TRACE impone l'utilizzo di un solo volume per assicurare il corretto comportamento dell'accumulatore durante la fase di iniezione. Le linee di scarico presentano delle leggere differenze e sono state modellate ciascuna con un componente PIPE e due componenti VALVE (una globe valve ed una di tipo check) e rispettivamente suddivise in 27 volumi (linea A) e 25 volumi (linea B).

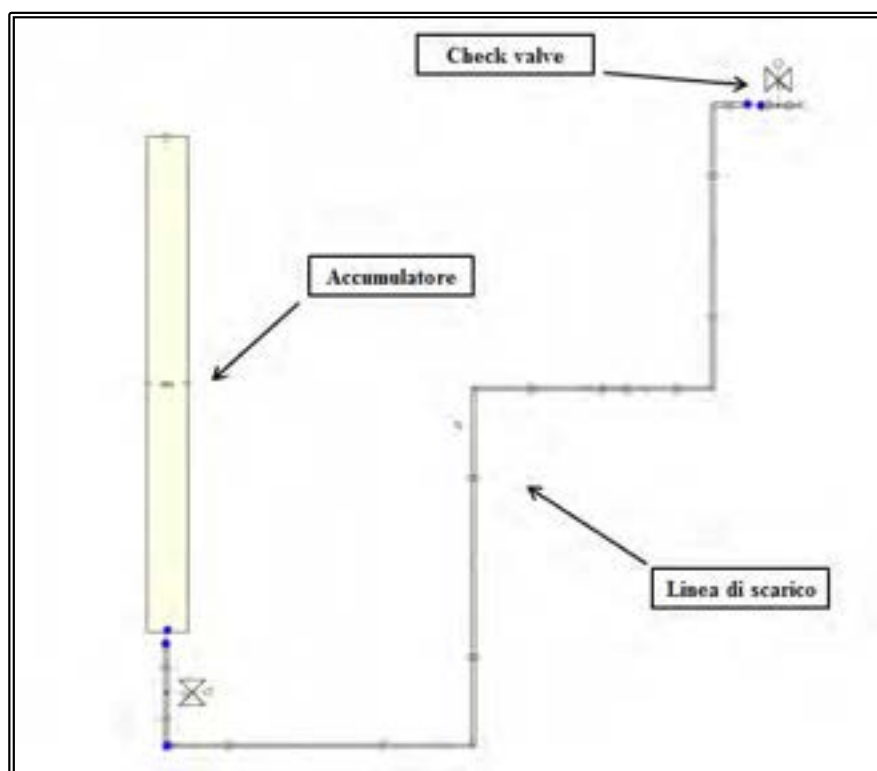


Figura 20: Accumulatore B.

7.3.3 PRHR ed IRWST

Il PRHR e l'IRWST, Figura 21, sono stati modellati rispettivamente con un PIPE (24 volumi) ed un VESSEL (23 livelli assiali, 3 settori radiali, 1 settore azimutale); nonostante i tubi del PRHR immersi nell'IRWST siano due (un terzo è di riserva), solo uno di questi viene utilizzato durante i transitori quindi non è stato necessario dover ricorrere a tubi equivalenti. L'utilizzo di un VESSEL per la modellazione della IRWST è stato deciso dopo aver effettuato diverse prove dell'effettiva efficacia dello scambio termico anche con modelli prevalentemente monodimensionali come PIPE con giunzioni laterali. La nodalizzazione delle linee di ingresso e mandata del PRHR ha richiesto per la prima l'utilizzo di tre PIPE ed un TEE mentre la seconda di un VALVE ed un PIPE: l'insieme è composto da 116 volumi. Le linee di iniezione dell'IRWST sono costituite entrambe da due VALVE ed un PIPE e, complessivamente, ciascuna linea è suddivisa in 15 volumi.

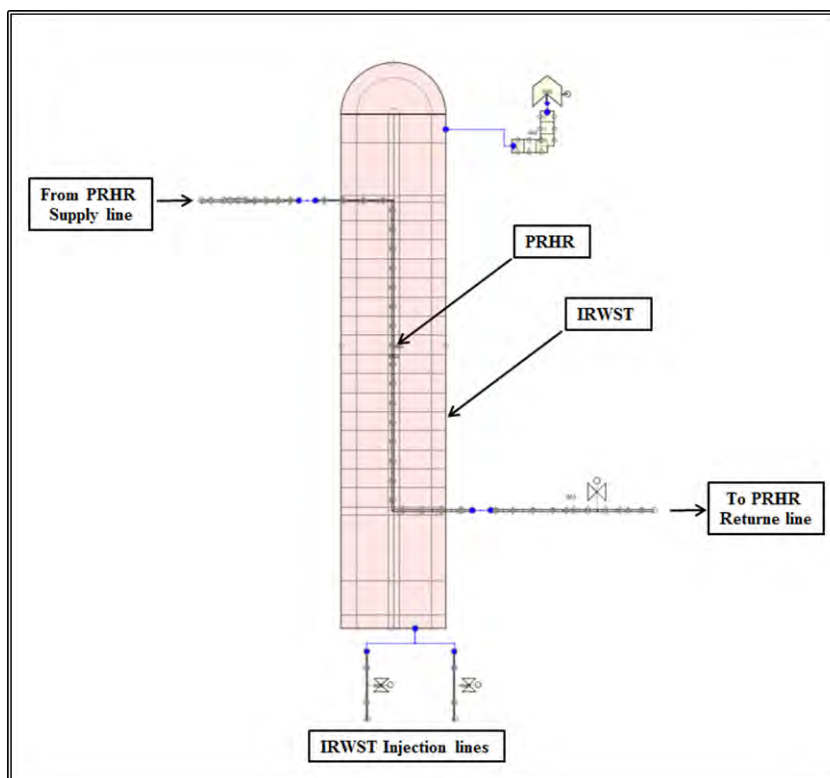


Figura 21: IRWST e PRHR.

7.3.4 ADS e DVI

L'ADS è composto da quattro stadi, i primi tre posti sulla testa del pressurizzatore mentre il quarto, a sua volta suddiviso in A e B, è posto nella linea di immissione del PRHR (4th stage A) ed in una linea che si dipana dal tratto orizzontale della hot leg B (4th stage B). Ogni stadio è stato simulato con un VALVE ed a valle di queste vi è la linea (comune nei primi tre stadi) che porta ai recipienti di scarico; anche il collettore di scarico dei primi tre stadi dell'ADS è stato simulato per mezzo del componente VESSEL. Il numero totale di nodi ammonta a 87. Le DVIs A e B sono identiche e costituiscono il ramo comune di iniezione di CMTs, accumulatori e IRWST: sono state descritte nell'input con due TEE identici ciascuno discretizzato con 12 volumi.

7.4 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO E CALCOLO DELLE PERDITE TERMICHE

Nell'impianto SPES-2 non è simulato il sistema di contenimento quindi non è stato necessario dover modellare tale elemento; esiste però nell'input TRACE un PIPE monovolume di grandi dimensioni il quale serve ad imporre le condizioni al contorno termodinamiche per la simulazione delle perdite termiche dell'impianto; i coefficienti di scambio termico verso l'ambiente sono calcolate da TRACE mediante l'utilizzo di opportune tabelle che consentono, per data temperatura di parete, di associare l'appropriato coefficiente di scambio termico alle differenti strutture termiche interessate. Le stime sui coefficienti di scambio termico sono state fatte a "priori" calcolando i numeri di Nusselt in convezione naturale mediante le correlazioni per le varie geometrie presenti nella facility [11] [12]; le valutazioni riguardano uno spettro di temperature adeguato sia durante le condizioni di funzionamento nominale dell'impianto sia durante i principali scenari incidentali.

8. ANALISI DEL BL-CL BREAK 2" EQUIVALENT IN SPES-2 TRAMITE TRACE

Lo scenario incidentale simulato consiste in un break di 2" equivalenti nel tratto orizzontale della balance line che connette la cold leg B2 con la sommità della CMT B, operato mediante l'apertura di un'apposita valvola ivi posta, Figura 22; tale prova era prevista nella matrice dei test sperimentali, atti ad investigare il comportamento dei sistemi di emergenza della facility, Tabella 4; il transitorio in esame mostra, almeno nella prima fase, un comportamento asimmetrico del drenaggio delle due CMTs.

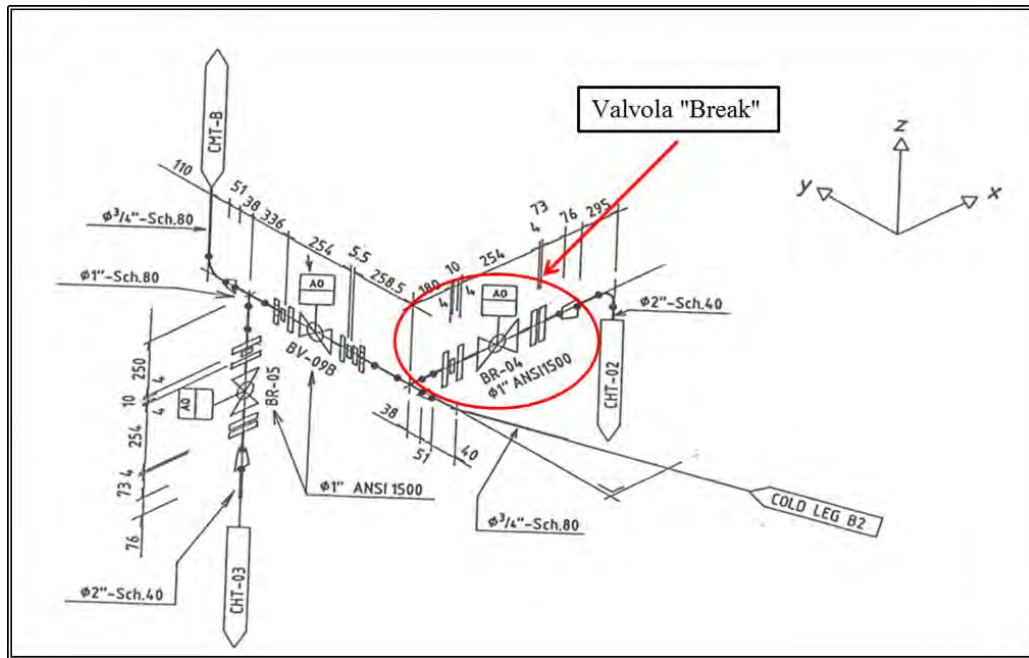


Figura 22: Break line.

Le condizioni iniziali di riferimento sono state desunte dai valori riportati in [13] e da quelli forniti da ENEA. Le condizioni stazionarie sono state simulate per un periodo di 500 s e i risultati ottenuti sono soddisfacenti, tenuto conto delle incertezze caratterizzanti le grandezze misurate sperimentalmente. Nella Tabella 9 sotto riportata, sono messi a confronto i valori ottenuti per le principali grandezze di interesse.

Il transitorio ha inizio con l'apertura della valvola simulante il break e per l'elevata massa fuoriuscita ha luogo la repentina depressurizzazione del sistema primario con il conseguente svuotamento del pressurizzatore. Raggiunta la pressione di 12,41 MPa, ovvero l'attuazione dell' R signal, vengono chiuse con due secondi di ritardo le MSL isolation valves dei due generatori di vapore. Con un ritardo di circa sei secondi dall'attuazione di tale segnale viene eseguito lo SCRAM del reattore e quando la pressione in testa al pressurizzatore raggiunge gli 11,72 MPa (S signal), sempre con un ritardo di due secondi, si chiudono le MFW isolation valves e si aprono le valvole di isolamento delle due CMT e quella del PRHR. Nella CMT A si instaura la circolazione naturale permettendo l'immissione di acqua fredda nel sistema primario, mentre l'altra CMT per effetto della depressione creata dal break nella pertinente balance line non riesce a scaricare liquido in DVI. Anche nelle linee del PRHR si instaura la circolazione naturale grazie al forte raffreddamento dovuto allo scambio termico con l'IRWST. Il coastdown delle pompe è avviato dopo 16,2 secondi dall'S signal e dalla conseguente riduzione della portata nel core ne scaturisce la formazione di vapore nella parte alta del core. Il vapore presente nell'upper plenum tra i bocchelli delle hot legs e la piastra dell'upper head rende difficoltosa la percolazione di liquido dalla testa del power

channel verso il core. Dopo circa 6 minuti dall'inizio del transitorio compare vapore nelle cold legs B (come si può dedurre dall'andamento delle temperature misurate nelle stesse, riportato nella Figura 23). Il vapore ora può risalire lungo le balance lines interrompendone la vena liquida: la CMT A inizia a svuotarsi, mentre la presenza di fluido bifase al break ne riduce la portata specifica critica e permette l'instaurarsi della circolazione naturale, benché in maniera oscillante, nella CMT B. Poco dopo il livello del liquido nell'UH scende alla quota di ingresso dell'UH-DC by pass permettendo una rapida fuoriuscita di vapore dalla testa del PC all'annular downcomer; la distribuzione azimutale del vapore all'interno dell'annular downcomer dà luogo ad un comportamento antisimmetrico nelle portate delle cold legs del loop A poiché in una (CL-A2) transita verso il downcomer liquido freddo mentre l'altra (CL-A1) fa risalire miscela bifase dal downcomer verso la pompa (come si può dedurre dall'andamento delle temperature misurate nelle stesse, riportato nella Figura 24).

INITIAL CONDITIONS				
Quantity	Units	Specified	Actual	TRACE value
Rod Power	MW	4.99 ± 0.1	4.915	4.99
Pressurizer pressure	MPa	15.51 ± 0.2	15.4	15.46
Average HL temperature	°C	315.5 ± 5	318.4	314.45
Core inlet temperature	°C	276.4 ± 5	283	274.95
Core flowrate	kg/s	23.2 ± 0.25	23.3	23.21
Cold leg flowrate	kg/s	5.86 ± 0.1	5.8	5.84
DC-UH bypass flowrate	kg/s	0.18 ± 0.05	0.19	0.18
Pressurizer level	m	3.78 ± 0.38	3.7	3.75
Accumulator pressure	MPa	4.9 ± 0.1	4.9	4.91
IRWST level	m	8.5 ± 0.1	8.5	8.53
PRHR supply line temperature	°C	> 100	107	126.85
UH average temperature	°C	296 ± 5	269	269.45
Balance line temperature	°C	> 165	255	256.85
CMT level	-	full	full	full
CMT temperature	°C	20 ± 5	28.35	21.5
SG level	m	1.48 ± 0.15	1.3	1.52
SG pressure	MPa	4.9 ± 0.2	5.05	5.05
SG MFW temperature	°C	226 ± 7	233	233.85

Tabella 9: Condizioni iniziali.

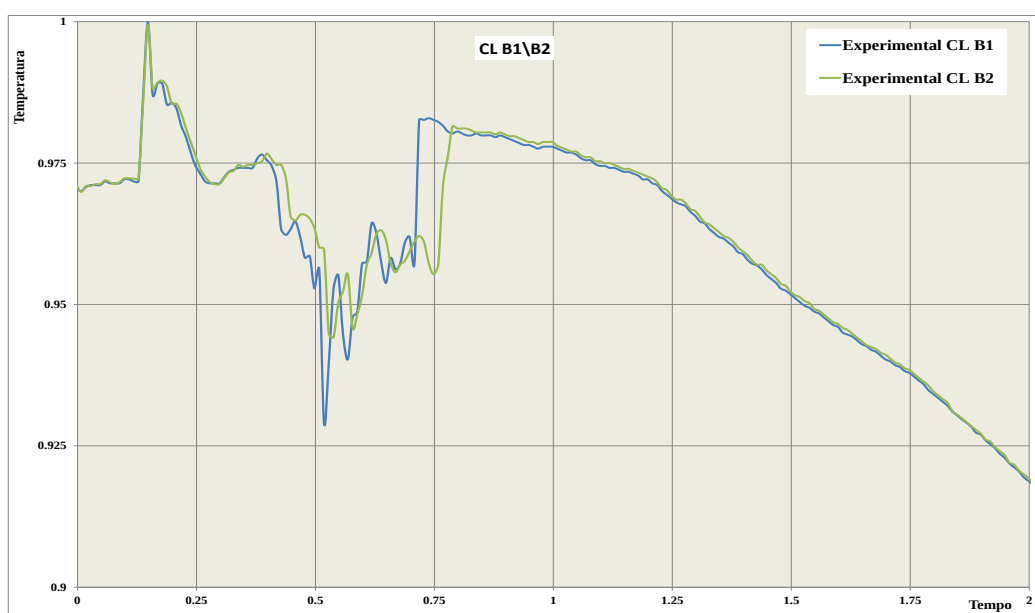


Figura 23: Andamento delle temperature misurate nelle cold legs B.

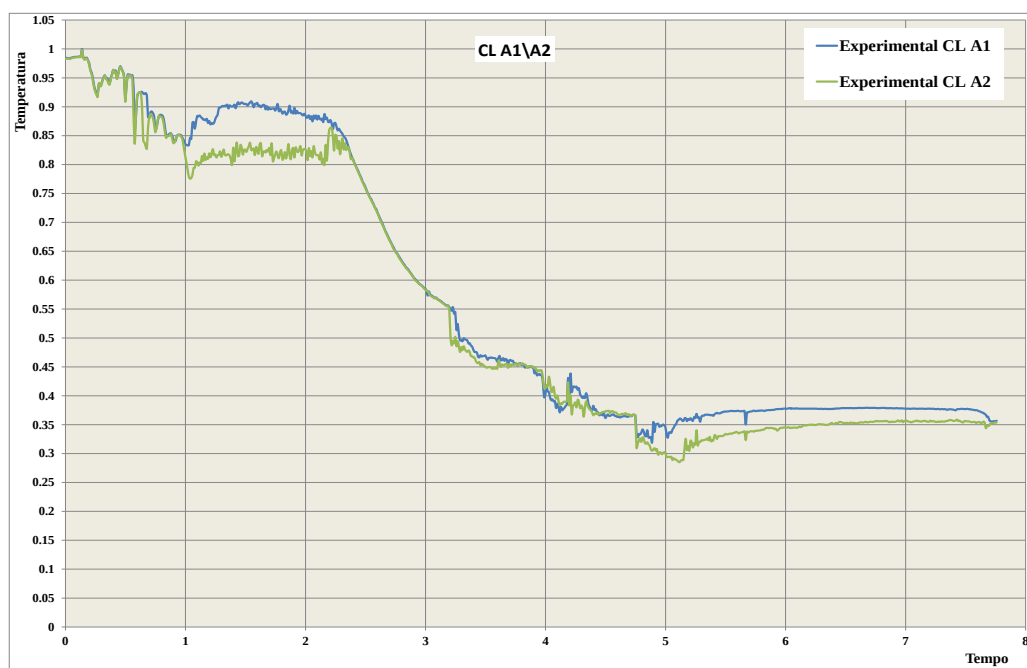


Figura 24: Andamento delle temperature misurate nelle cold legs A.

Dopo circa cinque minuti il livello di liquido nella CMT A raggiunge il 67% del livello totale, setpoint per l'attuazione dell'apertura dei primi tre stadi dell'ADS con la tempistica mostrata in Tabella 10. Una volta apertosi il primo stadio dell'ADS il sistema si porta velocemente ad una pressione tale da permettere l'iniezione dell'accumulatore, il quale raggiungerà la portata massima scaricata dopo l'apertura del terzo stadio dell'ADS. Con l'apertura delle valvole dell'ADS, diminuendo la portata al break, si riducono le oscillazioni nella portata scaricata dalla CMT B che inizia a comportarsi analogamente all'altra CMT mentre il livello di liquido nel pressurizzatore risale fino a valori superiori a quelli nominali. Durante la fase di iniezione dell'accumulatore la portata nel core aumenta notevolmente producendo un forte raffreddamento del sistema ed una crescita del livello di liquido nel core tale da coprire tutta la parte attiva.

	Livello [%]	Ritardo [s]
ADS 1	67	30
ADS 2	67	125
ADS 3	67	245
ADS 4 a/b	20	60

Tabella 10: Setpoint di apertura delle valvole ADS.

Una volta esauritosi l'inventario di massa nell'accumulatore la portata nel power channel si riduce ed il core torna in ebollizione. Dopo circa trentacinque minuti dall'inizio del transitorio si apre il quarto stadio dell'ADS portando rapidamente la pressione del sistema primario sotto gli 0.18 MPa, valore di pressione necessario per l'immissione di liquido dall'IRWST. Con l'intervento dell'IRWST ha inizio il raffreddamento a lungo termine che porta in sicurezza l'impianto.

8.1 CONFRONTO RISULTATI TRACE CON I DATI SPERIMENTALI

A partire dai dati sperimentali reperibili in letteratura è stato effettuato il confronto con i risultati ottenuti dalla simulazione TRACE; come si può osservare dai grafici sotto riportati il codice riesce globalmente a predire bene il transitorio dal punto di vista fenomenologico e nei tempi di attuazione dei sistemi di emergenza passivi.

L'andamento della pressione nel circuito primario risulta essere ben predetto, sebbene si riscontra un leggero ritardo nella fase di depressurizzazione dovuta all'apertura dell'ADS, Figura 25; tale ritardo è da attribuire al più lento svuotamento della CMT A rispetto a quanto avviene sperimentalmente, Figura 26; il codice predice tutte le fenomenologie che interessano le fasi di iniezione delle CMTs nonostante, come si vede nella figure Figura 27, Figura 28 e Figura 29 i valori delle portate non sempre ricalcano i dati sperimentali.

L'iniezione degli accumulatori è in accordo con il comportamento sperimentale di tale sistema, Figura 30 e Figura 31; allo stesso modo la portata iniettata e la tempistica d'intervento dell'IRWST è ben predetta, Figura 32 e Figura 33.

La temperatura delle barre scaldanti è in accordo con quanto osservato sperimentalmente, Figura 34. In tutte le figure che riportano dati sperimentali, tutte le scale sono normalizzate; i valori delle ordinate sono normalizzati ai pertinenti valori massimi, mentre i valori dei tempi del transitorio sono stati resi adimensionali con un prescelto fattore di scala.

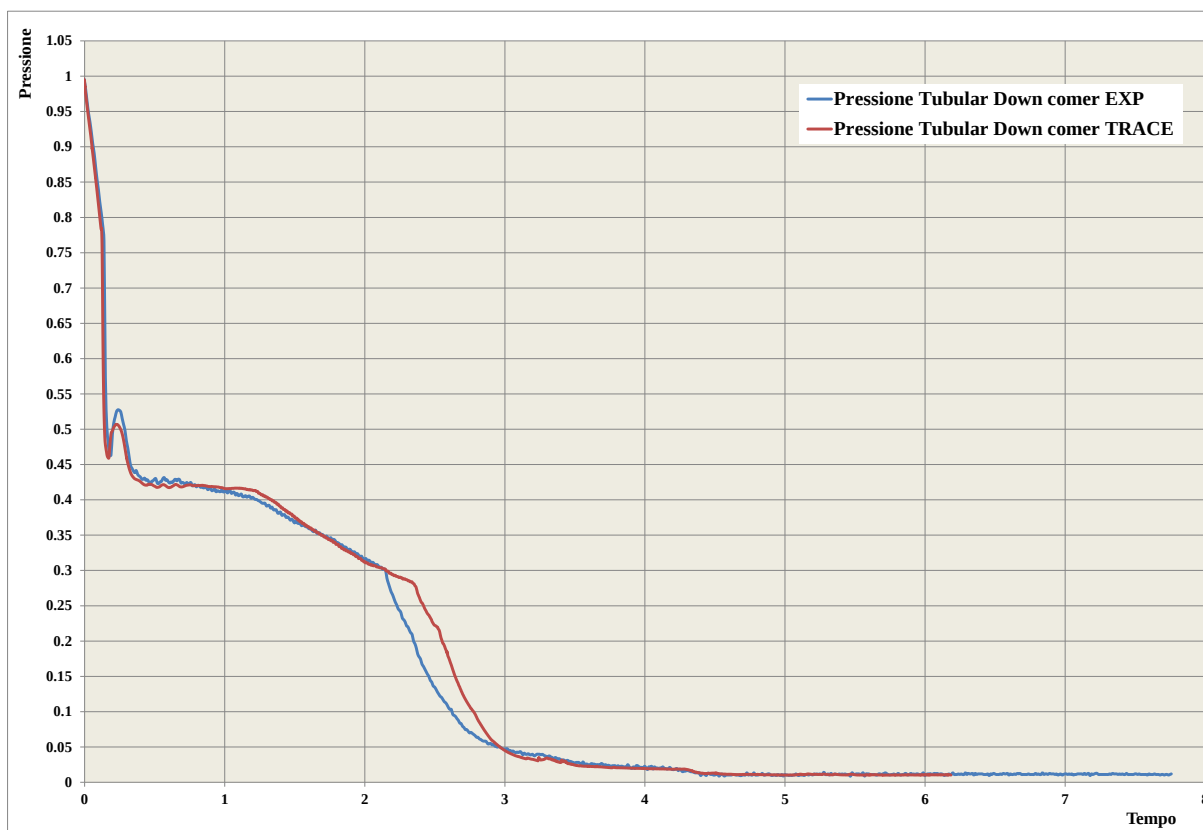


Figura 25: Andamento della pressione nel sistema primario.

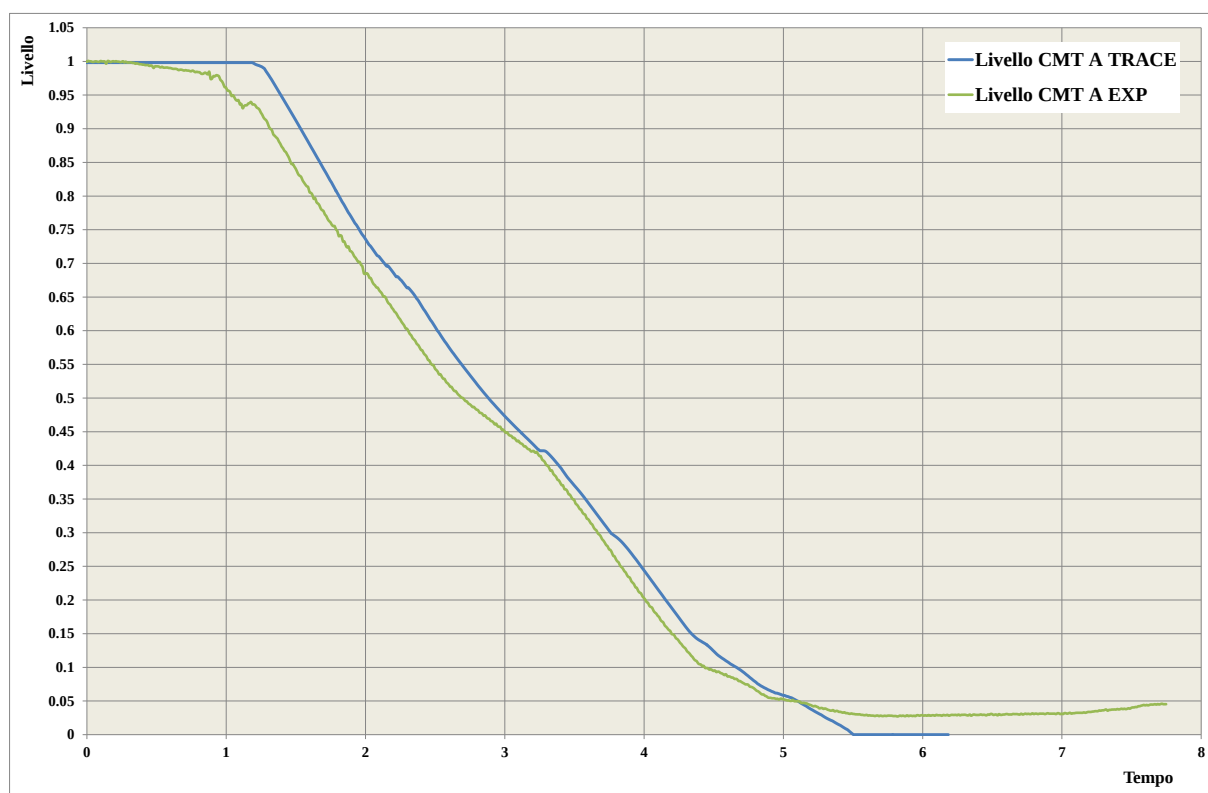


Figura 26: Andamento del livello nella CMT A.

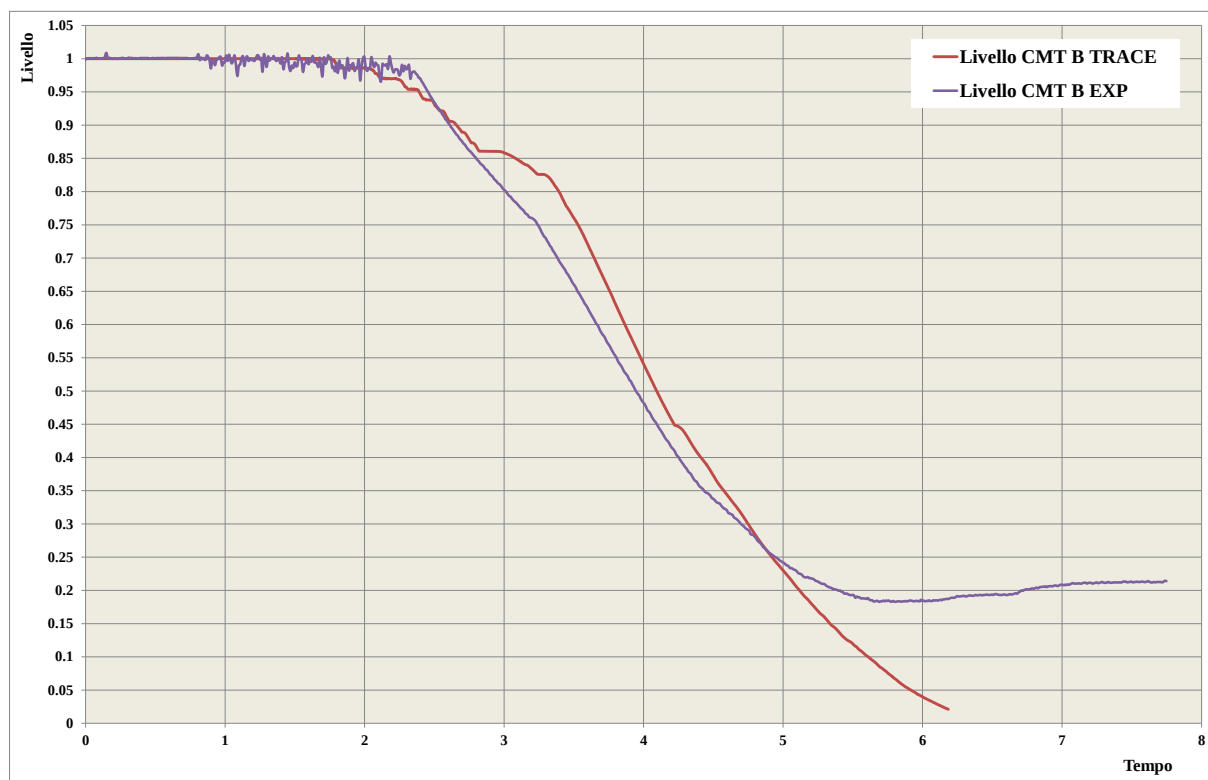


Figura 27: Andamento del livello nella CMT B.

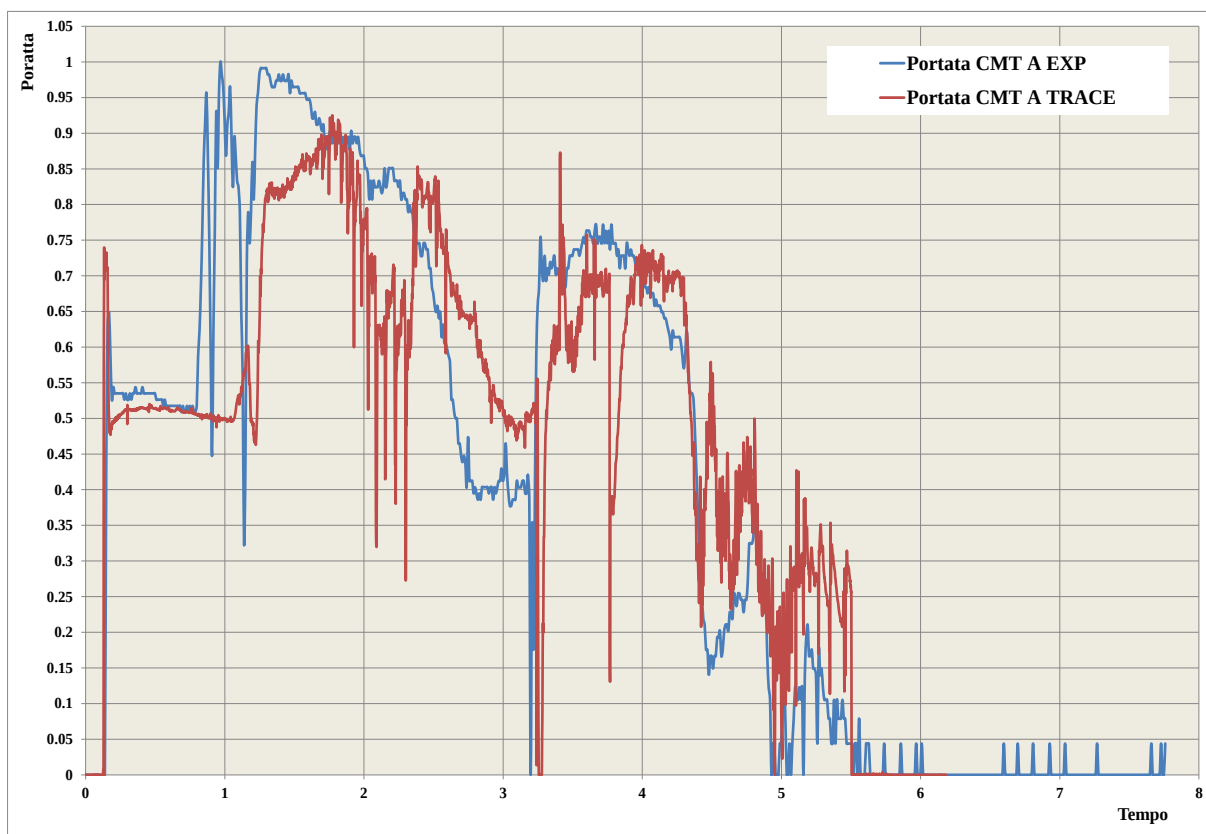


Figura 28: Andamento della portata nella CMT A.

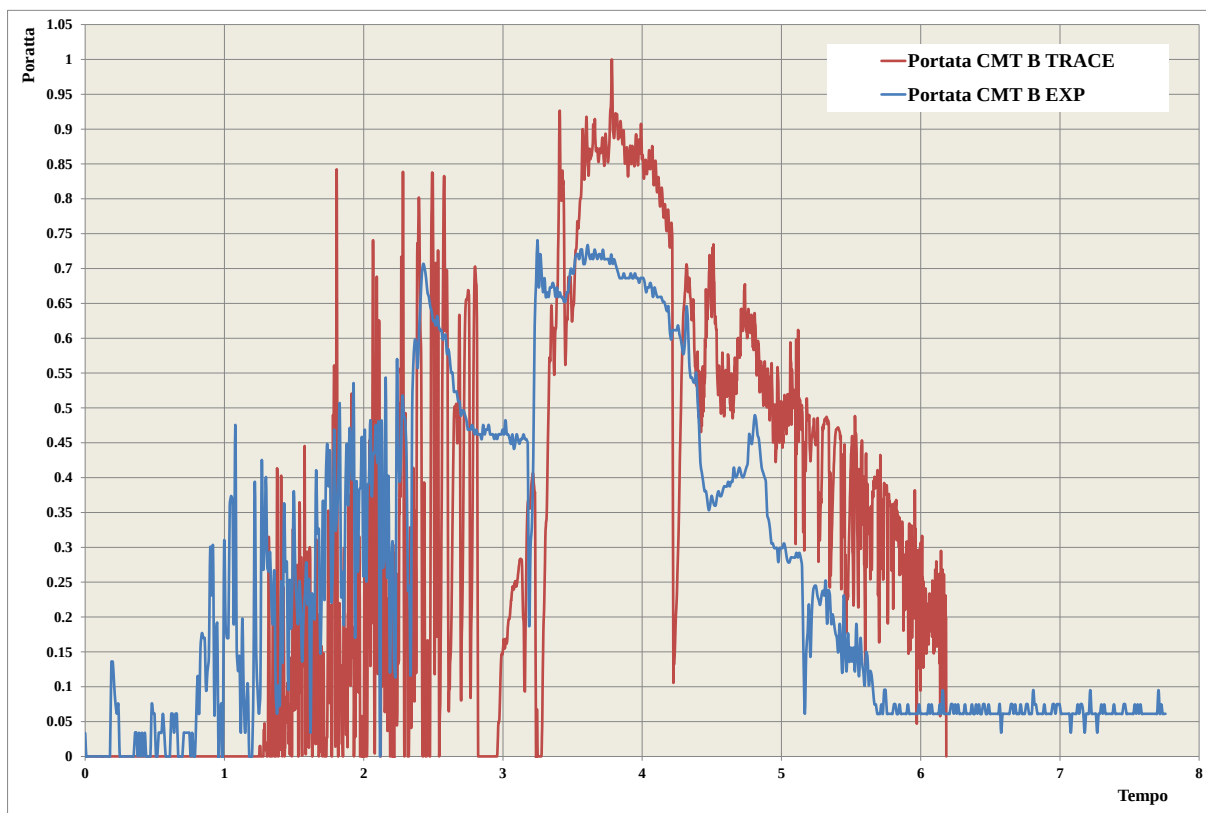


Figura 29: Andamento della portata nella CMT B.

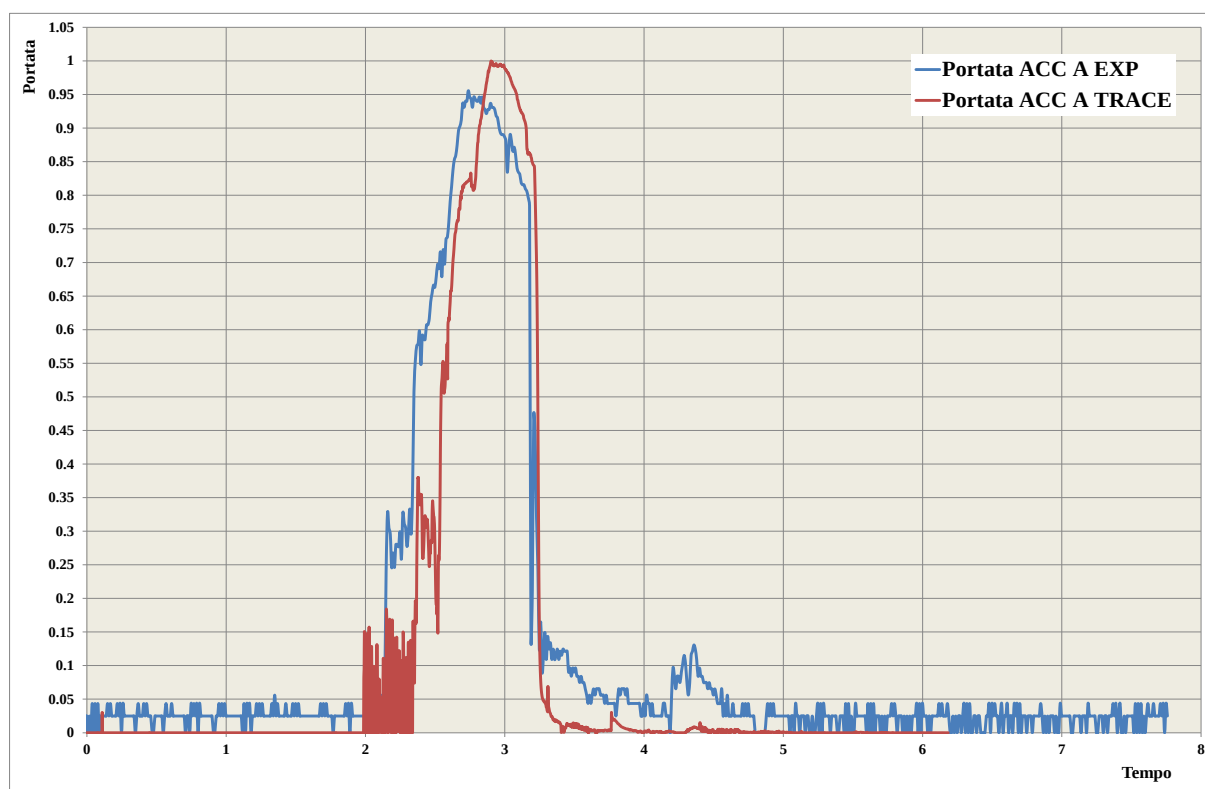


Figura 30: Andamento della portata nell'accumulatore A.

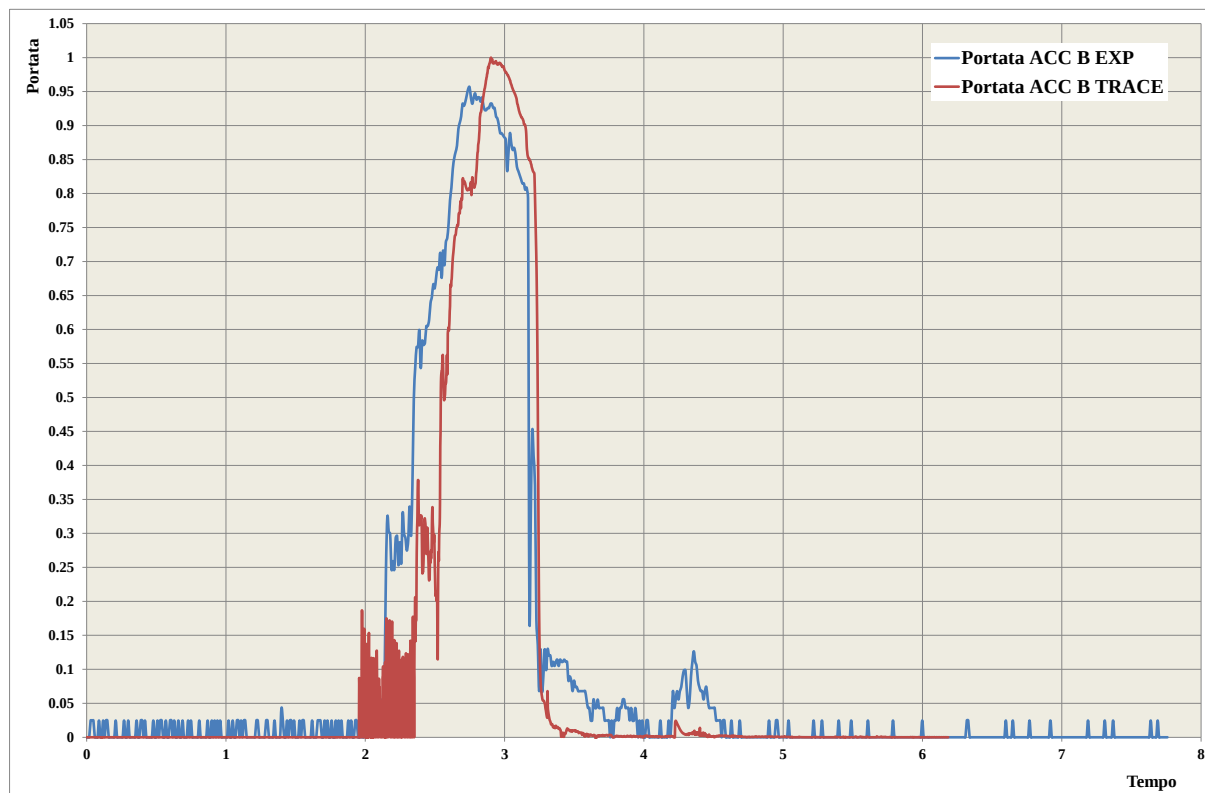


Figura 31: Andamento della portata nell'accumulatore B.

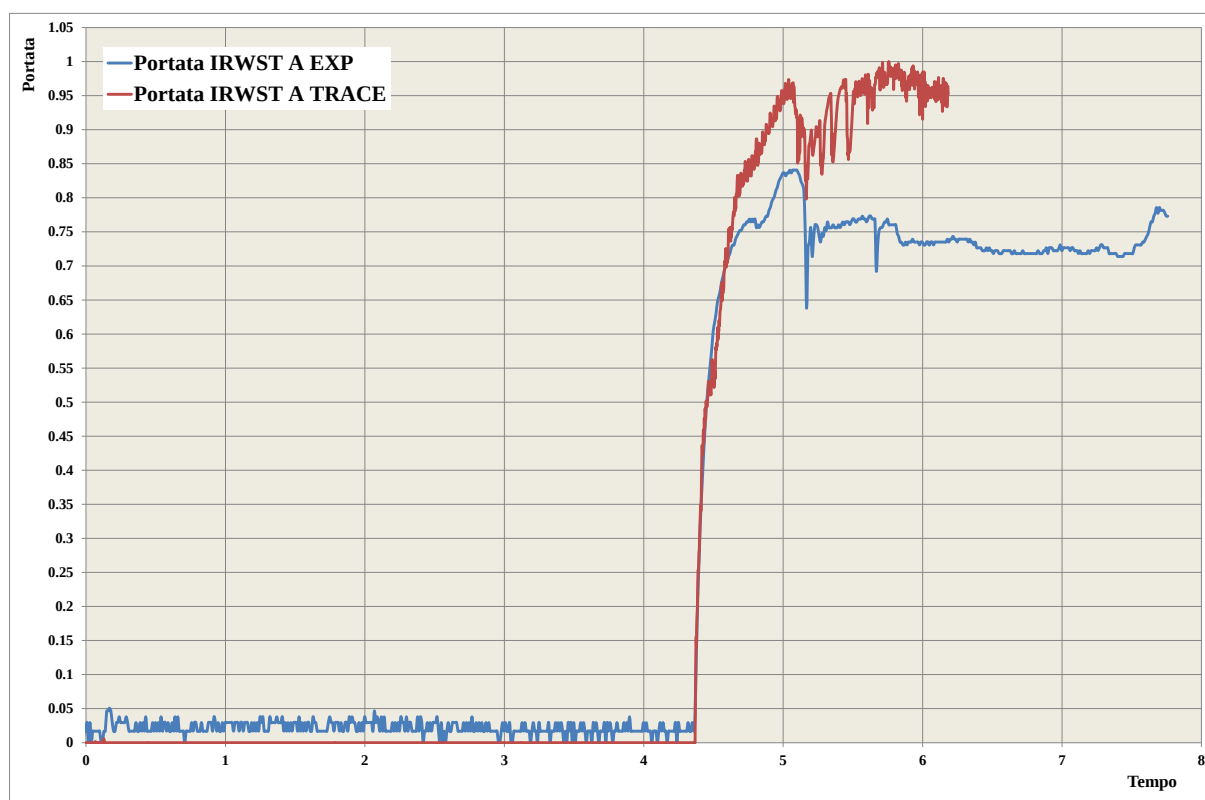


Figura 32: Andamento della portata nell'IRWST injection line A.

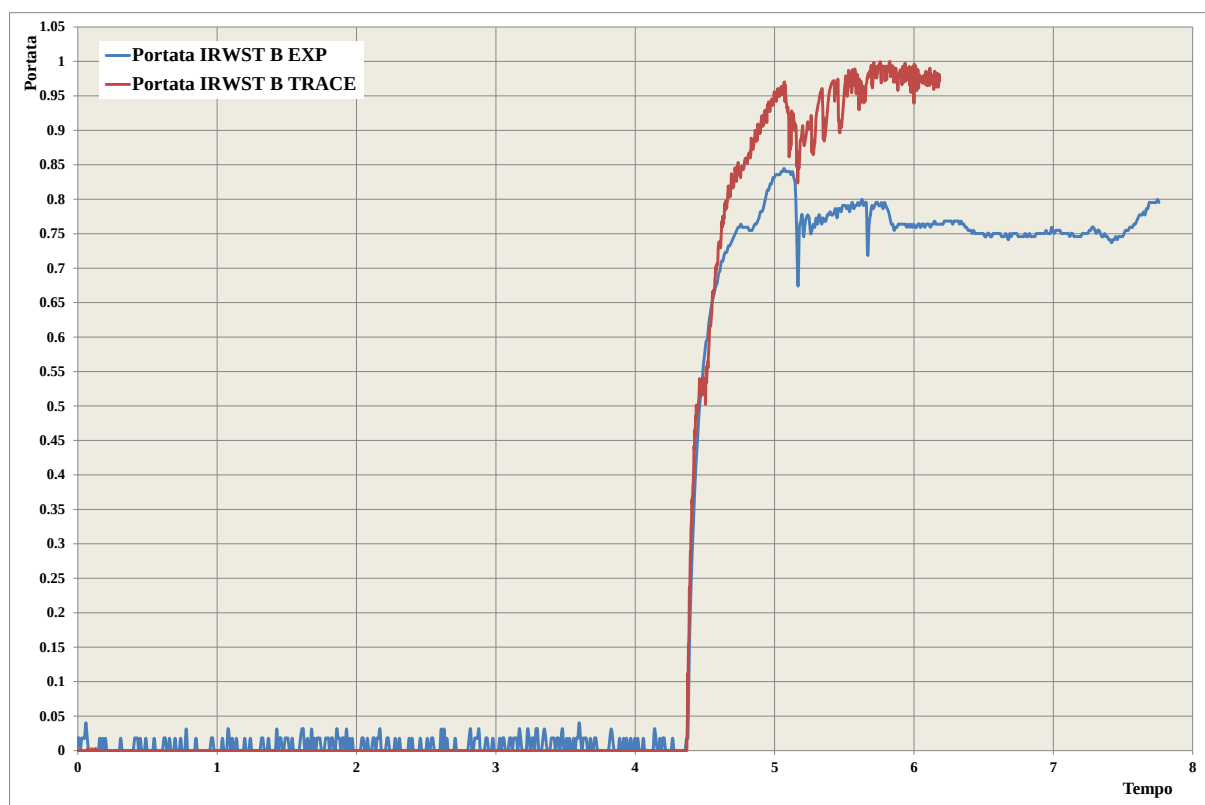


Figura 33: Andamento della portata nell'IRWST injection line B.

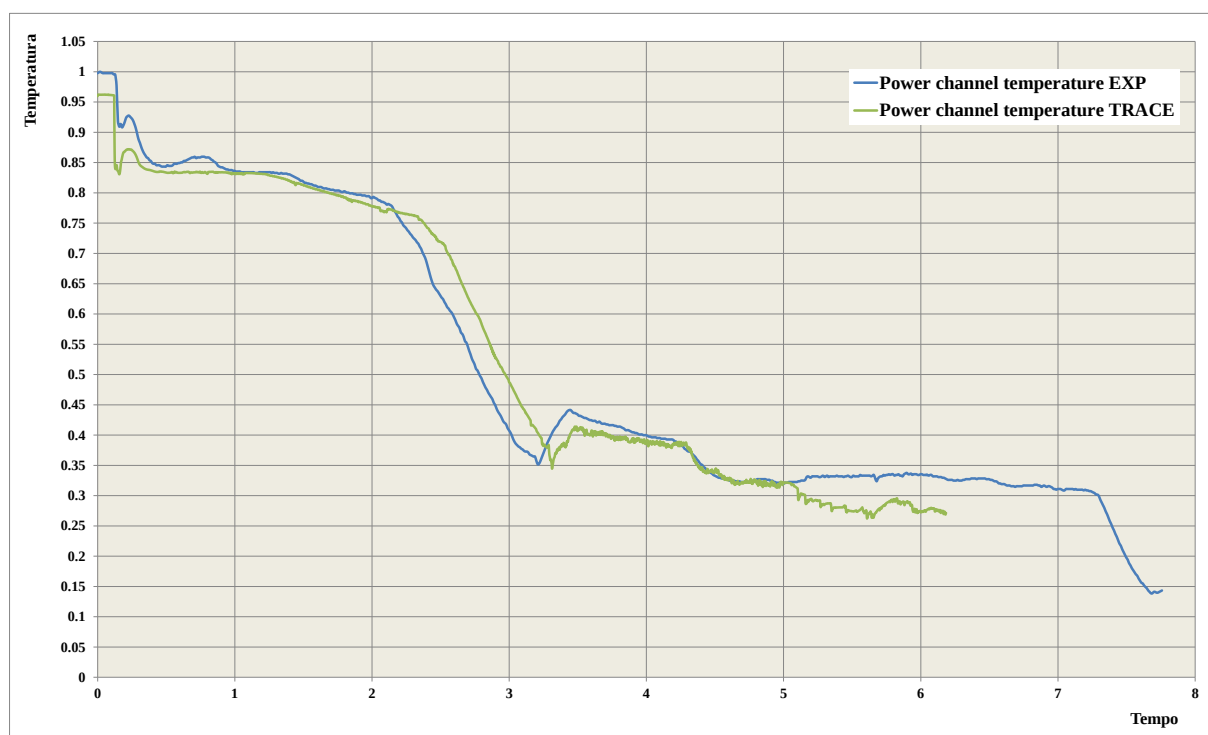


Figura 34: Andamento della temperatura nel canale di potenza.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 42	di 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

9. CONCLUSIONI

Nel presente rapporto tecnico viene presentato il lavoro svolto nell'ambito 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 viene presentato il modello CATHARE dell'impianto sperimentale SPES-2 sviluppato da ENEA e il confronto tra i risultati del codice e i dati sperimentali di un transitorio incidentale del tipo LOCA.

Tale transitorio viene originato da una rottura di 2" sulla DVI che collega i sistemi di emergenza del loop B al downcomer anulare. I risultati dell'analisi preliminare hanno permesso di mettere in luce la capacità limitata del modello CATHARE, fino ad oggi sviluppato, di descrivere il comportamento dell'impianto in condizioni incidentali.

Ciò potrebbe essere dovuto:

- alla difficoltà di descrivere puntualmente le perdite di carico distribuite nell'intero circuito;
- alla non esatta conoscenza delle perdite termiche dell'impianto;
- alla necessità di nodalizzare in modo tridimensionale il downcomer anulare, in virtù delle complesse fenomenologie che vengono ad instaurarsi in esso, in prossimità dell'attacco delle DVI, laddove del fluido freddo entra in contatto con un sistema sensibilmente più caldo.

Tali conclusioni rappresentano degli spunti per apportare successive migliorie al modello nella prossima annualità del presente PAR.

Il DEIM dell'Università di Palermo ha invece messo a punto la nodalizzazione TRACE dello stesso impianto. La qualità del modello sviluppato è stata valutata attraverso un confronto fra i dati sperimentali e quelli ottenuti nella simulazione di un transitorio originato dalla rottura di 2" sulla pressure balance line che connette la Cold Leg alla Core Make-up. I risultati della simulazione sembrano essere in buon accordo con i risultati sperimentali disponibili. La predizione globale del comportamento dell'impianto nel test di riferimento è molto soddisfacente, tenendo in conto le particolari asimmetrie che il test ha evidenziato.

Ulteriori sviluppi del lavoro potranno riguardare le principali incertezze che derivano dalle stime delle perdite termiche dell'impianto, dalla particolare configurazione tridimensionale dell' "annular-downcomer", dalla valutazione della portata critica specifica al break e dei modelli offerti dal codice TRACE nonché dalla presenza di aria, nella ultima fase del transitorio, introdotta dagli accumulatori nella fase finale della loro iniezione.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 43	di 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

ACRONIMI

ABBREVIAZIONI

ACC	Accumulatore
ADS	Automatic Depressurization System
CL	Cold Leg
CMT	Core Make-up Tank
CVCS	Chemical and Volume Control Systems
DBE	Design Basis Events
DC	Downcomer
DC-UH	Downcomer-Upper Head
DEIM	Dipartimento Energia, dell'Informazione e Modelli Matematici
DVI	Direct Vessel Injection
ENEA	Agenzia nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo sviluppo economico sostenibile
FW	Feed Water
HL	Hot Leg
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
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PC	Power Channel
PRHR	Passive Residual Heat Removal System
PRZ	Pressurizzatore
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
UH	Upper Head

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 44	di 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

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] R. Ferri, “SPES-99 10” IB-LOCA in Cold Leg. Experimental data report”. SIET 00 777 RP 99, Piacenza; Nov. 26th, 1999.
- [3] F. Donato, C. Lombardo, P. Chiovaro, S. D' Amico, P.A. Di Maio, F. Mascari, I. Moscato, G. Vella, Analisi preliminari per la simulazione di un incidente tipo Fukushima su SPES2, NNFISS – LP2 - 093, Settembre 2014;
- [4] L.E.Conway, R. Hundal, SPES-2, AP600 INTEGRAL SYSTEMS TEST RESULTS, IAEA-TECDOC-872, Proceedings of a Technical Committee meeting held in Piacenza, Italy, 16-19 May 1995
- [5] M.Rigamonti, SPES-2 Facility description, SIET 00 183 RI 92, Rev.1. Piacenza, 6-12-95;
- [6] C. Lombardo, M. Polidori; Definizione di una prova sperimentale da effettuarsi sull'impianto SPES2 della SIET di Piacenza; NNFISS-LP2-047 Settembre 2011
- [7] Bestion D., G. Geffraye, The CATHARE code, CEA, Grenoble (F), Apr. 2002.
- [8] Alemberti A., Frepoli C.; Graziosi G. SPES2 RELAP5/MOD3 NODING AND 1” COLD LEG BREAK TEST S004001, 22nd Water Reactor Safety information Meeting, Washington D.C. October 24 26 1994.
- [9] TRACE V5.0, User's Manual Volume 1: Input Specification, Division of System Analysis Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, 2010.
- [10] S. D'Amico, I. Moscato, Sistemi passivi di rimozione del calore in impianti nucleari avanzati e modulari. Problematiche di scambio termico e fenomeni di condensazione, Tesi di Laurea, A.A. 2011/2012, Università degli Studi di Palermo.
- [11] I.E.Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, Jaico Publishing House, 2003.
- [12] O. G. Martynenko, P.P Khramtsov, Free-Convective Heat Transfer: With Many Photographs of Flows and Heat Exchange, Springer, 2005.
- [13] M. Bacchiani, A. Alemberti, L. E. Conway et al., SPES-2. AP600 Integral System Test S01007 2” CL to Core Make-Up Tank Pressure Balance Line Break, Nureth-7, settembre 1995.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 - 027	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 45	di 45
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Curriculum del personale CIRTEN

Il gruppo di lavoro impegnato nell'attività è costituito da un professore ordinario di Impianti nucleari dell'Università di Palermo (Dipartimento Energia, dell'Informazione e Modelli Matematici "DEIM"), Giuseppe Vella, da un ricercatore universitario dello stesso Dipartimento, Pierluigi Chiovaro e da due laureandi del corso di laurea magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare dell'Università degli Studi di Palermo, Salvatore D'Amico e Ivo Moscato.

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

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

I laureandi Salvatore D'Amico e Ivo Moscato, hanno conseguito la laurea di primo livello in ingegneria energetica presentando la tesi "Sistemi passivi di rimozione del calore in impianti nucleari avanzati e modulari. Problematiche di scambio termico e fenomeni di condensazione" nella quale in particolare si sono occupati dello studio, mediante il codice TRACE, dello scambio termico, in condizioni incidentali, fra l'EHRs e il sistema RWST dell'impianto SPES-3.