| ENEA Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Distrib. | Pag. | di |
|---|---|---|---|---|
| | ADPFISS – LP1 - 047 | L | 1 | 50 |

**Titolo**

# Approfondimento delle problematiche di simulazione con i codici CATHARE2 e TRACE dei transitori 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 terza annualità dell'AdP ENEA-MiSE 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 risultati dell'attività di validazione e verifica dei codici di sistema TRACE e CATHARE2 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 1226/2015

**Copia n.** **In carico a:**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | | | NOME | | | |
| | | | FIRMA | | | |
| 1 | | | NOME | | | |
| | | | FIRMA | | | |
| 0 | EMISSIONE | 22/09/15 | NOME | Calogera Lombardo | Paride Meloni | Felice De Rosa |
| | | | FIRMA | Calogera Lombardo | | |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA | | REDAZIONE | CONVALIDA | APPROVAZIONE |

**INDICE**

INDICE ..... 2
LISTA DELLE FIGURE ..... 3
LISTA DELLE TABELLE ..... 4
1. INTRODUZIONE ..... 5
2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES2 ..... 6
3. CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI CONDOTTA SU SPES2 ..... 11
4. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA CATHARE ..... 12
5. DESCRIZIONE DELLE MIGLIORE APPORTATE AL MODELLO CATHARE DELL'IMPIANTO SPES-2 ..... 14
5.1 DESCRIZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA ..... 16
5.2 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA LINEA DVI ..... 20
5.3 CONFRONTO TRA I RISULTATI CATHARE E I DATI SPERIMENTALI ..... 21
6. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA TRACE ..... 25
7. DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO SPES2 ..... 27
7.1 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO ..... 28
7.1.1 CANALE DI POTENZA E DOWNCOMERS ..... 28
7.1.2 PRESSURIZZATORE ..... 29
7.1.3 LOOP PIPING E POMPE ..... 29
7.1.4 TUBI AD U E CASSA DEI GENERATORI DI VAPORE ..... 30
7.2 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA SECONDARIO ..... 30
7.2.1 GENERATORI DI VAPORE ..... 30
7.2.2 LOOP PIPING ..... 31
7.3 NODALIZZAZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA ..... 32
7.3.1 BALANCE LINES, CMTS ..... 32
7.3.2 ACCUMULATORI ..... 33
7.3.3 PRHR ED IRWST ..... 33
7.3.4 ADS E DVI ..... 34
7.4 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO E CALCOLO DELLE PERDITE TERMICHE ..... 34
7.5 VERIFICA DELL'INPUT ..... 35
8. ANALISI DEL "2 INCH COLD LEG TO CORE MAKE-UP TANK PRESSURE BALANCE LINE BREAK" TRAMITE TRACE ..... 36
8.1 CONFRONTO RISULTATI TRACE CON I DATI SPERIMENTALI ..... 39
9. CONCLUSIONI ..... 47
BIBLIOGRAFIA ..... 49
CURRICULUM DEL PERSONALE CIRTEN ..... 50

**LISTA DELLE FIGURE**

Figura 1: Schema semplificato della facility SPES-2. ..... 6
Figura 2: Rappresentazione schematica dell'accoppiamento dei sistemi PRHR-IRWST. ..... 8
Figura 3: Rappresentazione schematica della CMT. ..... 9
Figura 4: Insieme dei sistemi d'emergenza dell'AP-600. ..... 10
Figura 5: Particolare della nodalizzazione del canale di potenza. ..... 14
Figura 6: Particolare della nodalizzazione del loop A. ..... 15
Figura 7 : Particolare dell'elemento 3D che rappresenta il downcomer anulare. ..... 15
Figura 8: Rappresentazione tramite GUITHARE della nodalizzazione del PRHR. ... 16
Figura 9: Rappresentazione tramite GUITHARE della nodalizzazione della CMTA . 17
Figura10:Rappresentazione tramite GUITHARE della nodalizzazione dell'accumulatore. ..... 17
Figura 11: Rappresentazione tramite GUITHARE della nuova nodalizzazione dell'IRWST ..... 18
Figura 12: Andamento della pressione nel circuito primario. ..... 22
Figura 13: Portata in uscita dalla rottura. ..... 22
Figura 14: Portata di liquido iniettata dalla CMTA. ..... 23
Figura 15: Portata di liquido iniettata dalla CMTB. ..... 23
Figura 16: Portata attraverso il PRHR. ..... 24
Figura 17: Vista generale della nodalizzazione TRACE di SPES-2. ..... 27
Figura 18: Canale di potenza ..... 29
Figura 19: Generatore di vapore B. ..... 31
Figura 20: CMT A e B. ..... 32
Figura 21: Accumulatore B. ..... 33
Figura 22: IRWST e PRHR. ..... 34
Figura 23: Andamento delle temperature misurate nelle cold legs B. ..... 38
Figura 24: Andamento delle temperature misurate nelle cold legs A. ..... 38
Figura 25: Andamento della pressione nel sistema primario. ..... 41
Figura 26: Andamento del livello nella CMT A. ..... 41
Figura 27: Andamento della portata nella CMT A. ..... 42
Figura 28: Andamento del livello nella CMT B. ..... 42
Figura 29: Andamento della portata nella CMT B. ..... 43
Figura 30 : Andamento della portata nell'accumulatore A. ..... 43
Figura 31: Andamento della portata nell'accumulatore B. ..... 44
Figura 32: Andamento della portata nell'IRWST injection line A. ..... 44
Figura 33: Andamento della portata nell'IRWST injection line B. ..... 45
Figura 34 : Andamento della temperatura nel canale di potenza. ..... 45
Figura 35 : Andamento del livello nel pressurizzatore. ..... 46

**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. ..... 19
Tabella 6: Segnali di sicurezza e intervento dei sistemi di emergenza di SPES2. ..... 20
Tabella 7: Componenti utilizzati nel codice TRACE. ..... 26
Tabella 8: $\Delta$P nel circuito primario. ..... 35
Tabella 9 : Condizioni iniziali. ..... 36
Tabella 10: Condizioni iniziali. ..... 37
Tabella 11: Setpoint di apertura delle valvole ADS. ..... 39
Tabella 12 : Eventi principali registrati durante il transitorio. ..... 40

# 1. INTRODUZIONE

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

Una di queste facilities, denominata SPES-2, intorno alla fine degli anni 90 veniva annoverata tra quelle a rischio di chiusura e inserita come candidata per potenziali programmi di collaborazione internazionali [1]. Su tale facility, attualmente esistente in SIET, intorno agli anni 80 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 [6]. 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 scorsa annualità del PAR per la simulazione di alcuni dei test della matrice di prova condotta su SPES2 intorno agli anni 90 [4]. A partire dai risultati ottenuti e pubblicati in [5] si sono apportare successive migliore ai modelli. Quest'ultimi sono stati utilizzati per le simulazioni i cui principali risultati sono pubblicati nel presente rapporto. Tale attività ha consentito di mettere in luce le capacità dei modelli, CATHARE e TRACE di predire il comportamento dell'impianto in condizioni incidentali.

## 2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES2

La facility SPES-2 [6], 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.

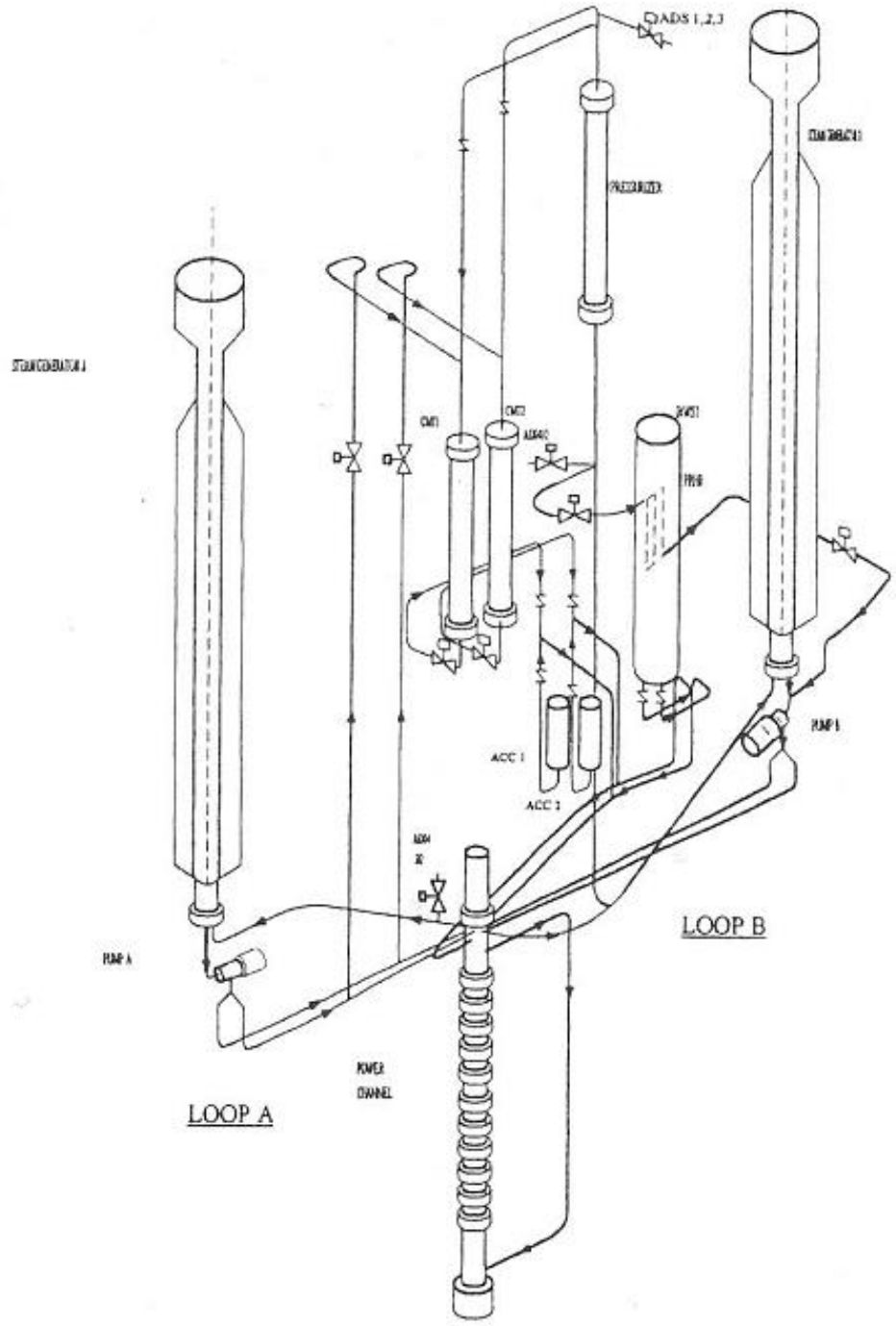


**Figura 1: Schema semplificato della facility SPES-2.**

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 Figura 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 costituti 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 costituto 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, cosi raffreddato, ritorna al circuito primario tramite la linea di outlet del PRHR connessa al lower head di uno degli scambiatori di calore.

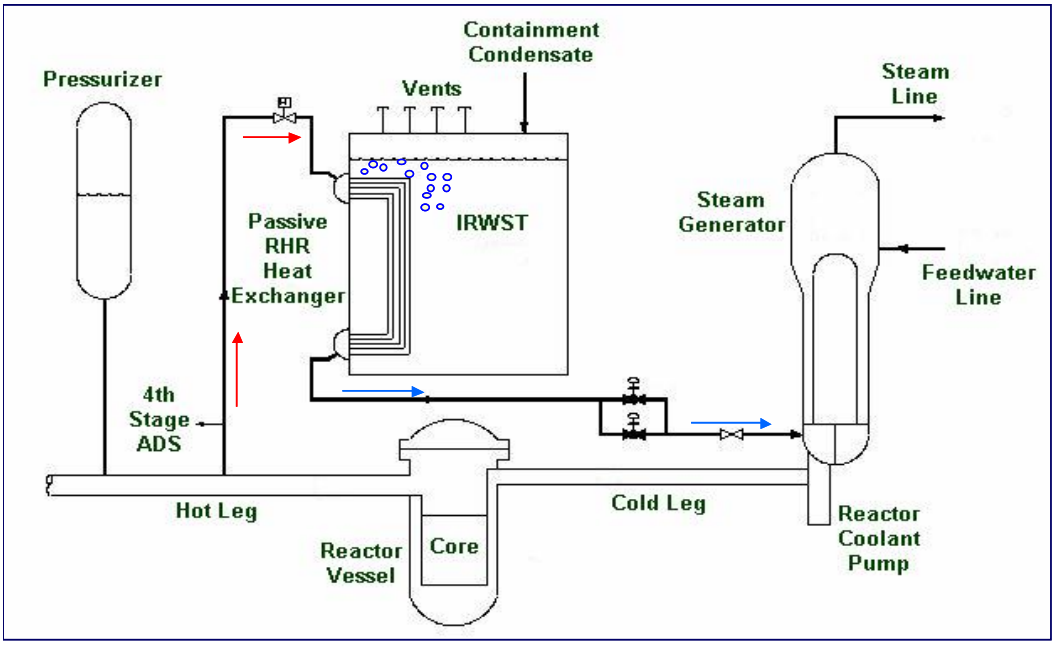


**Figura 2: Rappresentazione schematica dell'accoppiamento dei sistemi PRHR-IRWST.**

- 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 contenura 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.**

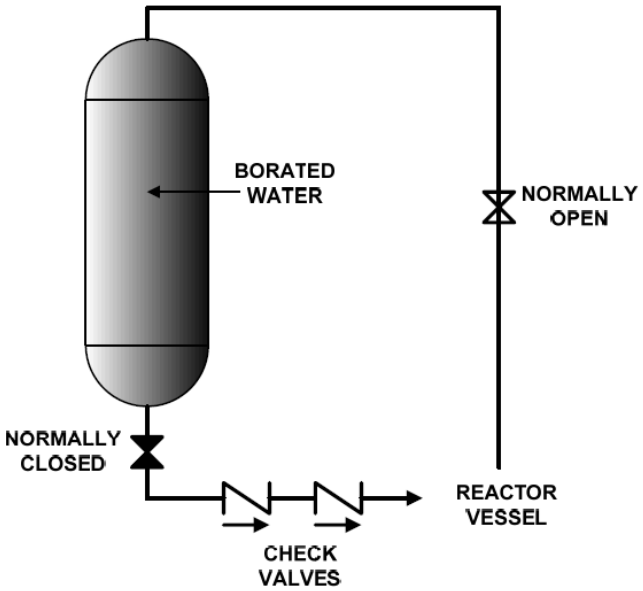


**Figura 3: Rappresentazione schematica della CMT.**

• 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.

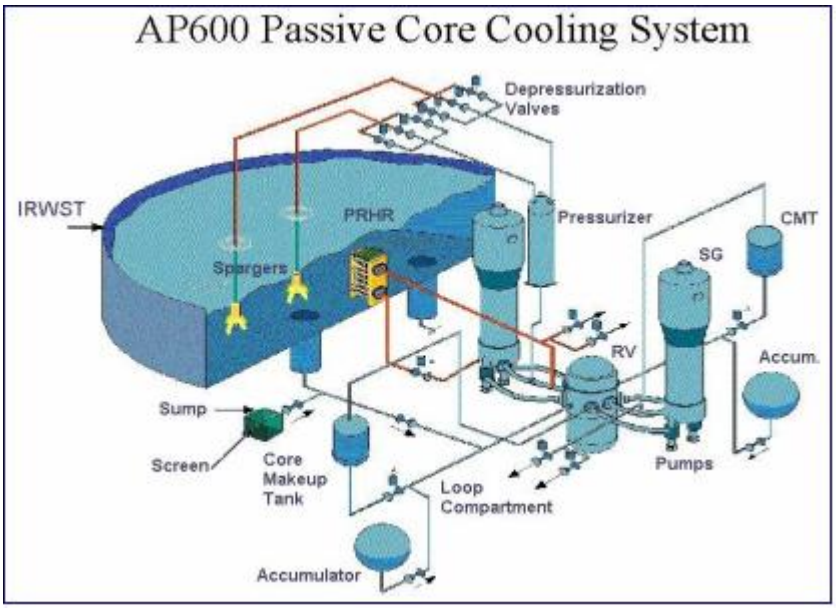


**Figura 4: Insieme dei sistemi d'emergenza dell'AP-600.**

## 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 | **Asymmetrie CMT performance** |
| **S00706** | June 10, 1994 | **SBLOCA** | DEG Break of DVI | CVCS, NRHR, SFW off | On | 1 of 2 ADS 1$^{st}$ and 3$^{rd}$stage valves | **Complete loss of one of two PXS subsystems.** |
| **S00908** | June 23, 1994 | **SBLOCA** | CMT BL DEG Break | CVCS, NRHR, SFW off | On | 1 of 2 ADS 1$^{st}$ and 3$^{rd}$stage valves | **No delivery from faulted CMT. Blind test.** |
| **S01007** | July 7, 1994 | **SBLOCA** | 2" CMT BL Break | CVCS, NRHR, SFW off | On | 1 of 2 ADS 4$^{th}$ stage B valves | **Examine effect on CMT draindown.** |
| **S01110** | July 14, 1994 | **SGTR** | SG tube rupture (1 tube) | CVCS, NRHR, SFW off | On | No effect | **No operator actions.** |
| **S01211** | Sept. 9, 1994 | **SGTR** | SG tube rupture (1 tube) | CVCS, NRHR, SFW off | On | 1 of 2 ADS 4$^{th}$ stage B valves | **Inadvertent ADS opening. Blind test.** |
| **S01309** | Sept. 22, 1994 | **SGTR** | SG tube rupture (1 tube) | CVCS, SFW on; NRHR off | On | No effect | **Operator action to isolate SG, subcool and depressurize primary system.** |
| **S01512** | Oct. 11, 1994 | **SLB** | SG A steam line break | CVCS, NRHR, SFW off | On (3 tubes) | SFW not isolated on T cold signal | **Maximum PRHR cooldown. CMT's do not drain and no ADS actuation occurs.** |
| **S01613** | Oct. 15, 1994 | **SBLOCA** | 1" CL Break | CVCS, NRHR, SFW off | On (3 tubes) | 1 of 2 ADS 4$^{th}$ stage B valves | **Show effect of 2 PRHR HX's on cold leg temperature.** |
| **S01703** | Nov. 12, 1994 | **SBLOCA** | 2" CL Break | CVCS, NRHR, SFW off | On | 1 of 2 ADS 4$^{th}$ stage B valves | **Reference CL break repeatability test.** |

**Tabella 4: Matrice delle prove sperimentali condotte su SPES2.**

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

## 4. DESCRIZIONE DEL CODICE DI SISTEMA CATHARE

Il codice di sistema CATHARE 2 [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 (Hl, Hg), velocità di liquido e gas (Vl, Vg), pressione (P) e grado di vuoto (α). Inoltre sono incluse le equazioni di trasporto per considerare fino a quattro tipi di gas incondensabili (xi) 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 el'upper plenum di un PWR. Il modulo volume è dotato di speciali correlazioni per determinare il livello "gonfiato" (livello di pelo libero in cui si tiene in considerazione il volume occupato dalla fase vapore dispersa nella fase liquida), oppure stratificazioni totali o parziali e fenomeni di separazione di fase alle giunzioni;
- modulo 3-D: esso è un elemento impiegato per descrivere fenomeni multidimensionali nel vessel a seguito di transitori incidentali come ad esempio il LB-LOCA dove fenomeni di svuotamento del plenum inferiore e successivo reflooding hanno forti componenti tridimensionali;
- modulo BC (boundary condition): serve per imporre le condizioni al contorno del reattore o della facility. Alle giunzioni di un modulo 1D o 0D si possono imporre i valori di uno o più parametri idraulici (pressione, velocità, portata per ogni fase, frazione di vuoto, etc.), a seconda del tipo di condizione imposta, le BC possono essere definite all'ingresso o all'uscita di un elemento.;
- sottomodulo WALL multistrato: la sua applicazione consente di tenere conto della fenomenologia della conduzione termica radiale;
- sottomodulo EXCHANGER: si impiega per simulare lo scambio termico tra circuiti idraulici distinti (generatore di vapore) oppure all'interno dello stesso circuito (downcomer/riser);

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

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

La nodalizzazione della facility, realizzata tramite l'impiego della versione V2.5_2 mod8.1 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) è riportata in [6].
In questo paragrafo, nella Figura 5 e nella Figura 6 vengono riportati gli schemi della nodalizzazione del canale di potenza e del loop A caratterizzato dalla presenza del pressurizzatore. Per la descrizione geometrica dettagliata del modello vedi [6], qui vogliamo semplicemente ricordare che molte delle scelte nella nodalizzazione della facility influenzano fortemente il risultato delle simulazioni. Va comunque messo in evidenza che è stata dedicata particolare attenzione alla nodalizzazione dei sistemi di emergenza di cui è dotato l'impianto, dal momento che tali sistemi sono del tipo passivo e il loro funzionamento è basato su fenomeni fisici quali la circolazione naturale e che sulla esatta descrizione di tali fenomeni da parte dei codici di sistema si sta attualmente indagando. Inoltre, sulla base delle conclusioni del lavoro condotto nella seconda annualità del presente PAR [5] e di quanto riportato in [8], il modello CATHARE è stato modificato come segue:

1. Il downcomer anulare DWC_ANN è stato nodalizzato con l'elemento 3D riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.
2. Il downcomer tubolare è stato sdoppiato.

Le due modifiche sopra accennate si sono rese necessarie nel tentativo di descrivere i fenomeni tridimensionali che vengono ad instaurarsi quando, in conseguenza della rottura di uno dei tubi del primario, il fluido freddo iniettato dai sistemi di emergenza attraverso le DVI si mescola con il fluido caldo presente nel primario.

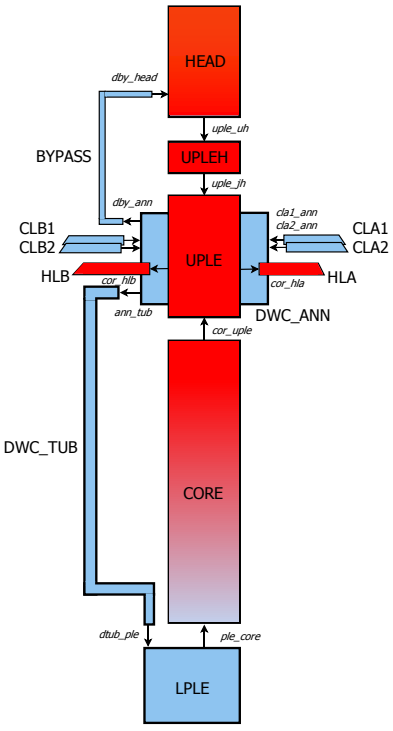


**Figura 5: Particolare della nodalizzazione del canale di potenza.**

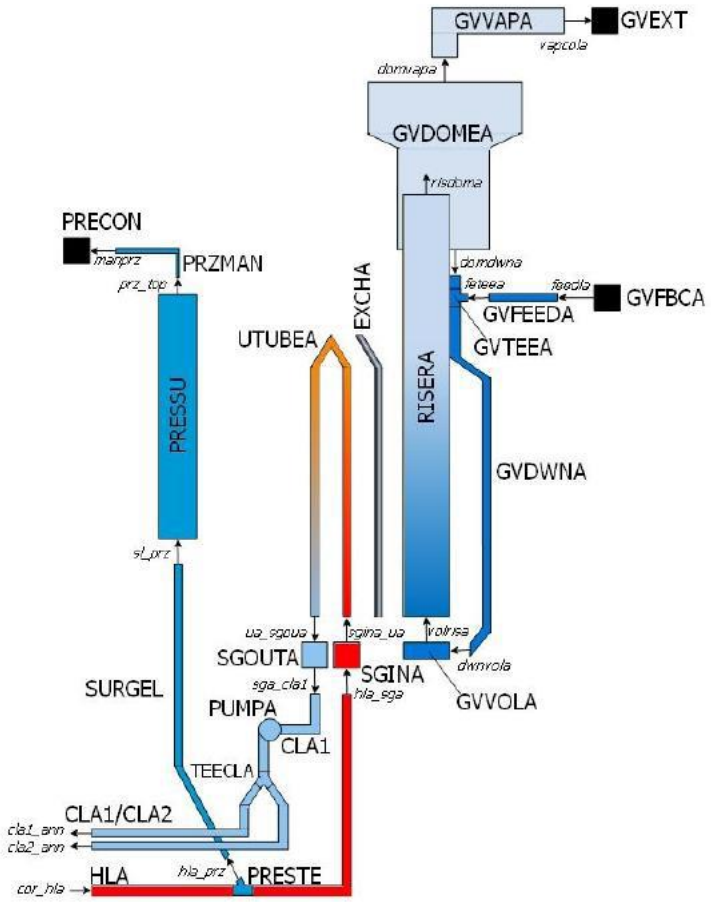


**Figura 6: Particolare della nodalizzazione del loop A.**

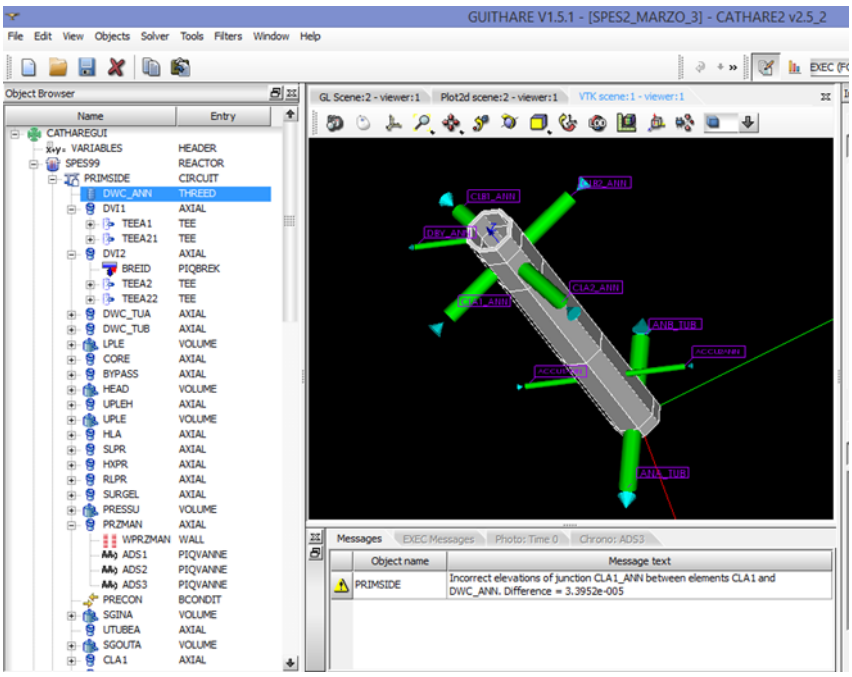


**Figura 7 : Particolare dell'elemento 3D che rappresenta il downcomer anulare.**

## 5.1 DESCRIZIONE DEI SISTEMI DI EMERGENZA

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

Il PRHR è stato nodalizzato tramite (vedi *Figura 8*) :

- 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.

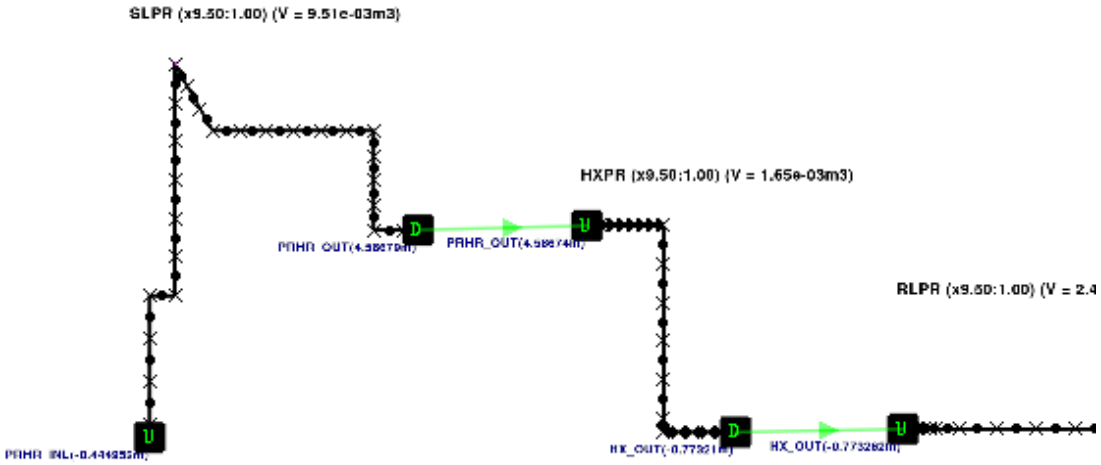


**Figura 8: Rappresentazione tramite GUITHARE della nodalizzazione del PRHR.**

Ciascuna delle due CMTs è stata nodalizzata tramite (vedi ***Figura 9***) :

- 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).

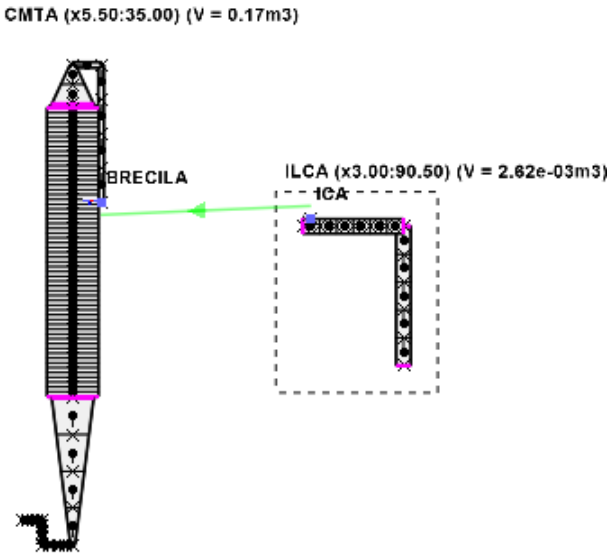


**Figura 9: Rappresentazione tramite GUITHARE della nodalizzazione della CMTA**

Ciascuno degli accumulatori è stato nodalizzato tramite (vedi **Figura 10**):

- 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).

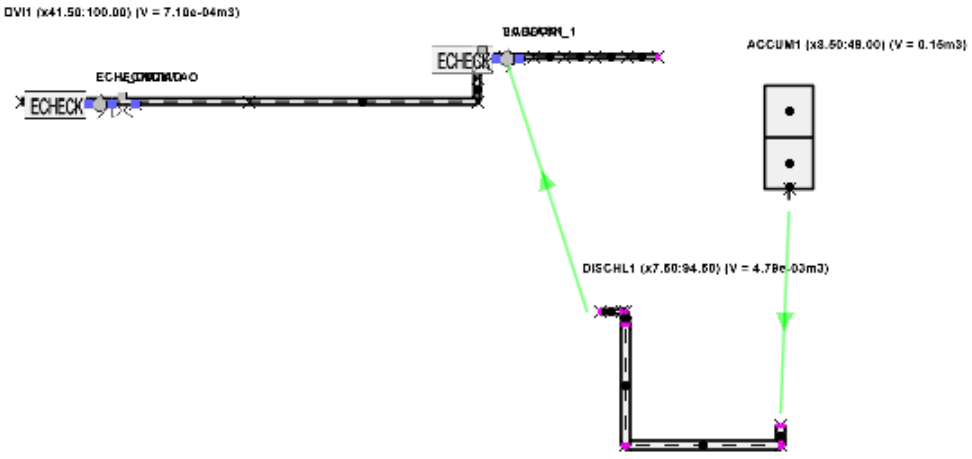


**Figura 10: Rappresentazione tramite GUITHARE della nodalizzazione dell'accumulatore.**

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.

Il particolare della nuova nodalizzazione dell''IRWST è presentato in ***Figura 11***).

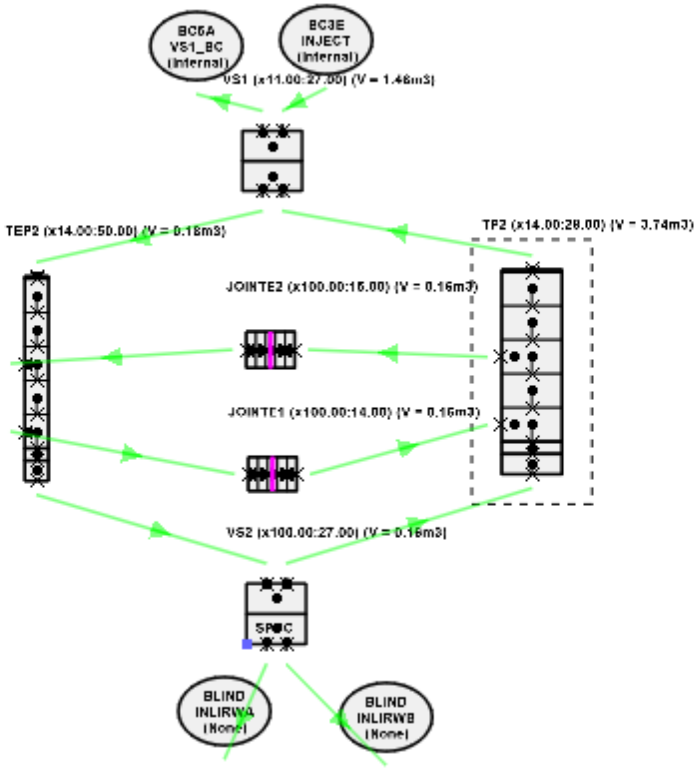


**Figura 11: Rappresentazione tramite GUITHARE della nuova nodalizzazione dell'IRWST.**

Essa è costituita da:

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

La necessità di nodalizzare la piscina dell'IRWST nel modo sopra descritto è scaturita dal fatto che l'accoppiamento termico in CATHARE può realizzarsi solo tra due elementi del tipo axial.
Le condizioni stazionarie di riferimento sono state ottenute tramite una procedura di regolazione dei parametri termoidraulici maggiormente rilevanti che ha riprodotto per quanto possibile le regolazioni reali. Nella Tabella 5 vengono riportati le condizioni di stazionario raggiunte a partire dalla nodalizzazione CATHARE sopra descritta.

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

**Tabella 5: Condizioni di stazionario.**

## 5.2 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA LINEA DVI

Nel presente paragrafo vengono riportati i confronti tra i dati sperimentali e i risultati del transitorio simulato tramite l'impiego della nodalizzazione CATHARE 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 MPa + 5.73s |
| Intervento sistemi di emergenza | P (PRZ) < 11.72 MPa |
| Chiusura linea vapore loop B | P (PRZ) < 12.41 MPa + 2s ritardo |
| Chiusura alimentazione secondario loop A | P (PRZ) < 11.72 MPa + 2 s ritardo |
| Chiusura alimentazione secondario loop B | P (PRZ) < 11.72 MPa + 2 s ritardo |
| Intervento CMT loop A/B | P (PRZ) < 11.72 MPa + 2 s ritardo |
| Intervento PRHR | P (PRZ) < 11.72 MPa + 2 s ritardo |
| Trip pompe loop A/B | P (PRZ) < 11.72 MPa + 16.2 s ritardo |
| Intervento I stadio ADS | L (CMT A o B) < 67% +30 s |
| Intervento II stadio ADS | L (CMT A o B) < 67% +125 s |
| Intervento III stadio ADS | L (CMT A o B) < 67% +245 s |
| Intervento IV stadio ADS | L (CMT A o B) < 20% +60 s |

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

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

## 5.3 CONFRONTO TRA I RISULTATI CATHARE E I DATI SPERIMENTALI

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

A causa della perdita di massa attraverso la rottura si assiste ad una violenta depressurizzazione del circuito primario: con un ritardo di 5.3 s rispetto all'istante in cui la pressione raggiunge il setpoint inerente il segnale di scram (12.41 MPa), il reattore viene spento. Con 2 s di ritardo rispetto al raggiungimento del secondo setpoint della pressione (11.72 MPa) nel circuito primario vengono chiuse le linee di alimentazione del secondario dei generatori di vapore e vengono aperte le valvole di isolamento delle CMT A e B e del PRHR. Inoltre con 16.2 s di ritardo rispetto allo stesso segnale vengono bloccate le pompe di circolazione del sistema primario. A tal punto si innesca la circolazione naturale all'interno del primario e il calore residuo di decadimento dell'impianto viene asportato dal PRHR il cui tratto a C è immerso all'interno della piscina IRWST. Inoltre rispettivamente con 30 s 125 s e 245 s di ritardo rispetto al tempo in cui il livello di liquido all'interno delle CMTs scende al di sotto del 67% del suo valore nominale intervengono i gruppi di valvole ADS del I II e III stadio.

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

Per finire, quando la pressione nel circuito primario risulta inferiore al valore dello stesso parametro dentro gli accumulatori si aprono le valvole di check che, collegando le linee di scarico degli accumulatori alle DVI, permettono che questi ultimi scarichino del liquido freddo dentro al primario.

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

Occorre sottolineare che l'introduzione delle modifiche apportate al modello ha comportato un notevole aumento dei tempi di calcolo necessari all'ottenimento dello stato di stazionario. La Figura 12 riporta l'andamento della pressione nel circuito primario, da essa si può evidenziare come le modifiche apportate al modello CATHARE consentono una migliore descrizione del comportamento della facility, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, consentendo di descrivere abbastanza bene i dati sperimentali sia per la fase di depressurizzazione violenta che subito dopo.

La Figura 13 mostra l'andamento della portata di fluido in uscita dal circuito primario attraverso la rottura, mentre la Figura 14 e la Figura 15 mostrano la portata iniettata nel circuito primario dalle due CMTs.

La Figura 13 mostra l'andamento della portata di fluido in uscita dal circuito primario attraverso la rottura, mentre la Figura 14 e la Figura 15 mostrano la portata iniettata nel circuito primario dalle due CMTs.

Dall'esame di tali figure appare evidente come, la nuova nodalizzazione CATHARE qui utilizzata, consente di descrivere meglio il comportamento in condizioni incidentali dell'impianto, contribuendo ad eliminare il comportamento asimmetrico riscontrato nel funzionamento della CMTA/B nei calcoli condotti con la vecchia nodalizzazione (linea blu).

Nonostante ciò, dall'esame della Figura 16, che riporta l'andamento della portata che fluisce dentro al PRHR e che consente di asportare il calore residuo di decadimento dal circuito primario, si nota come qualche centinaia di secondi dopo l'intervento di tale sistema la circolazione naturale si blocchi per riprendere subito dopo con valori di portata paragonabili a quelli sperimentali. Tale fenomeno potrebbe essere imputabile alla difficoltà,

riscontrata nel codice CATHARE, di cambiare il valore della rugosità interna dei tubi: tale variabile essendo utilizzata per il calcolo delle perdite di carico distribuite influisce fortemente sull'innesco della circolazione naturale.

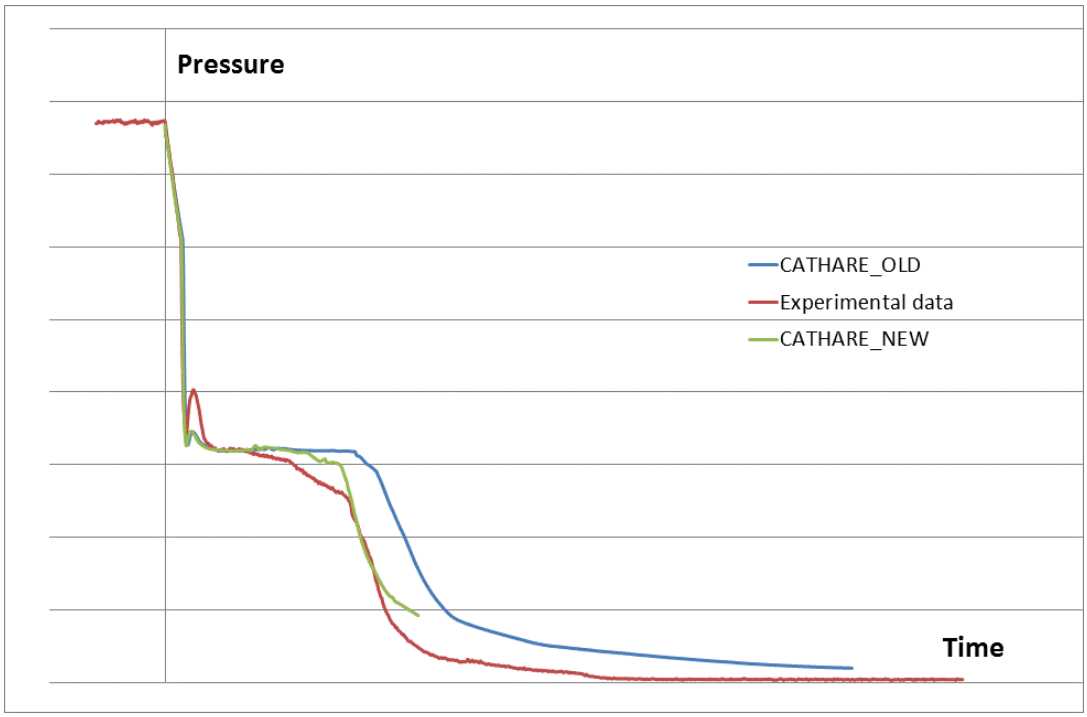


**Figura 12: Andamento della pressione nel circuito primario.**

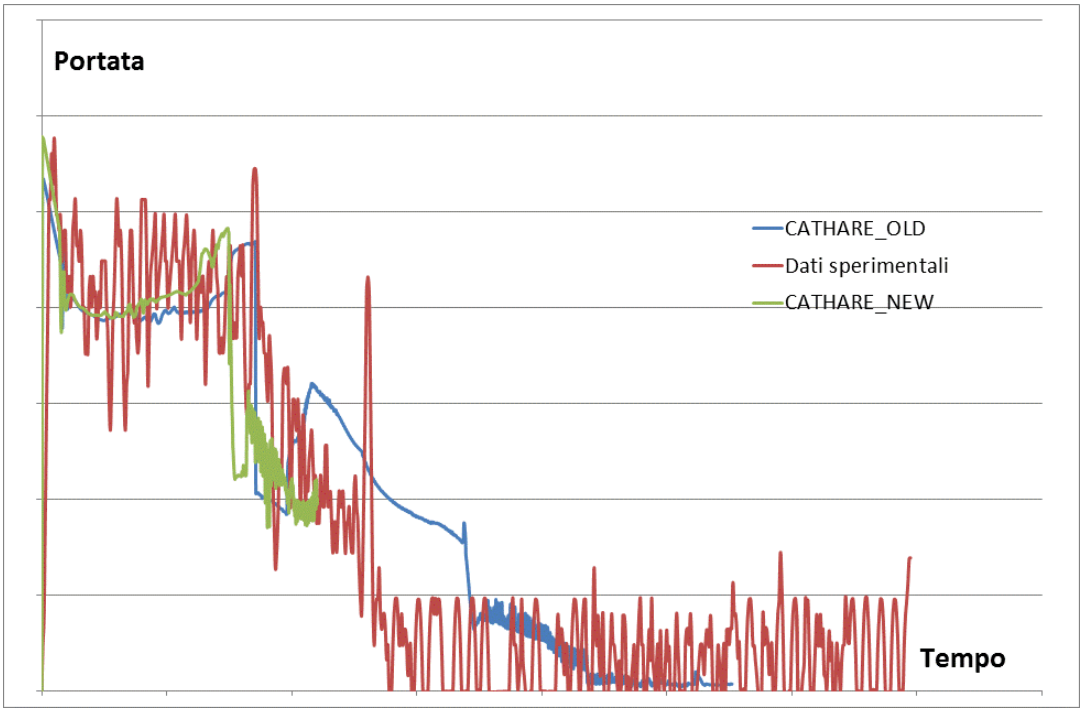


**Figura 13: Portata in uscita dalla rottura.**

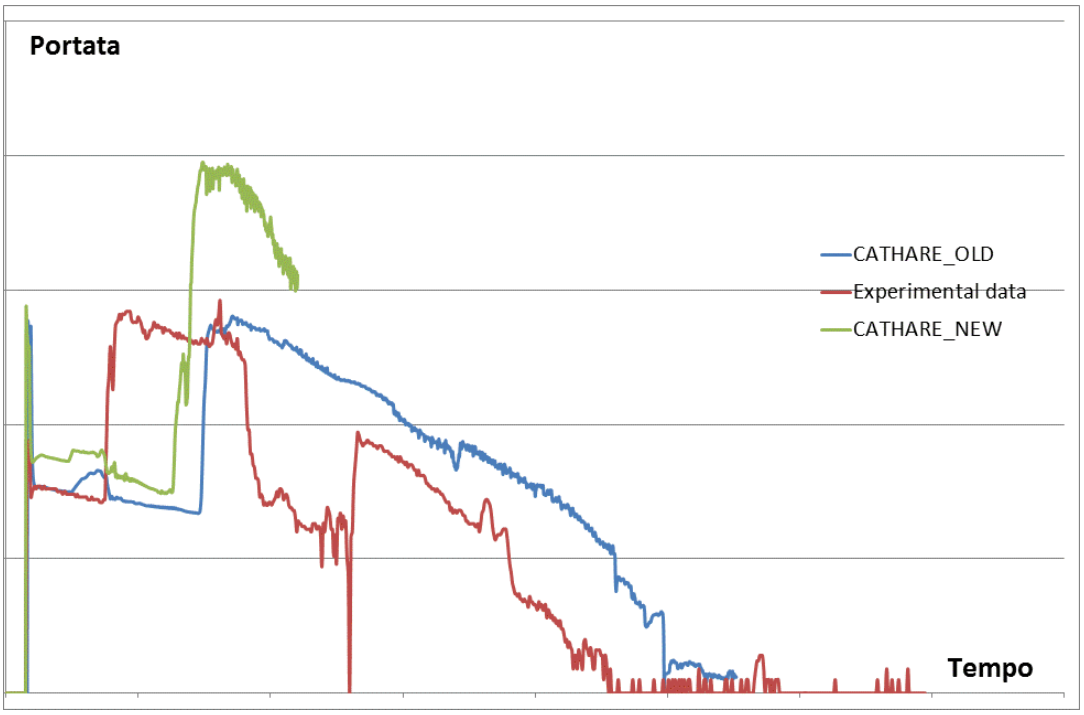


**Figura 14: Portata di liquido iniettata dalla CMTA.**

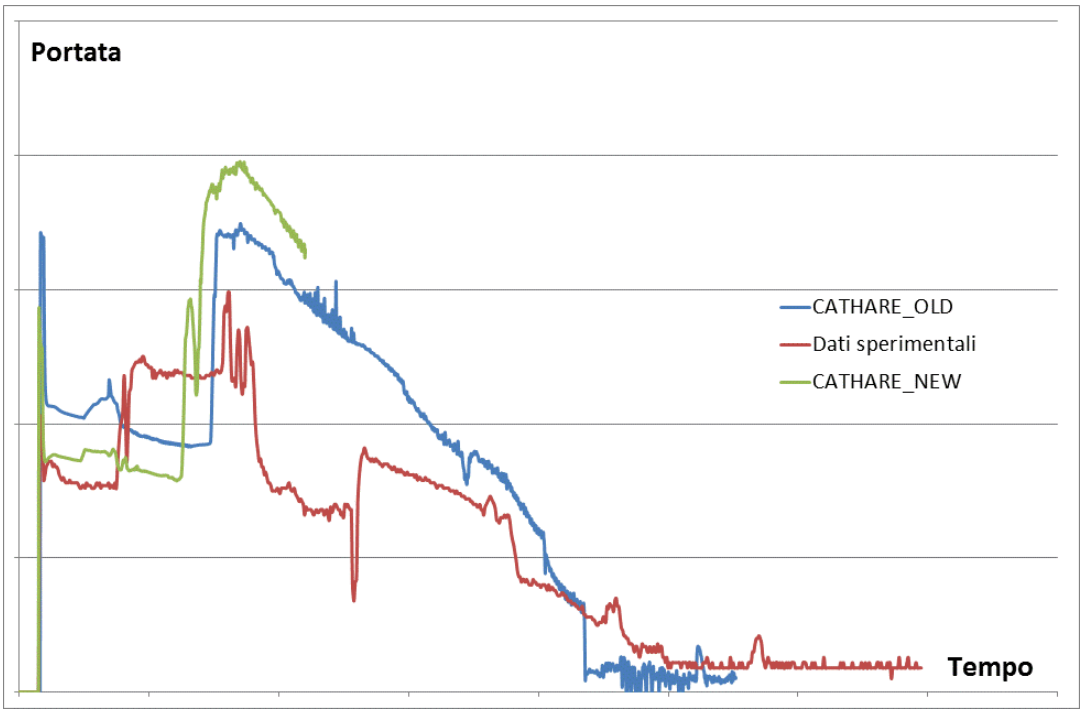


**Figura 15: Portata di liquido iniettata dalla CMTB.**

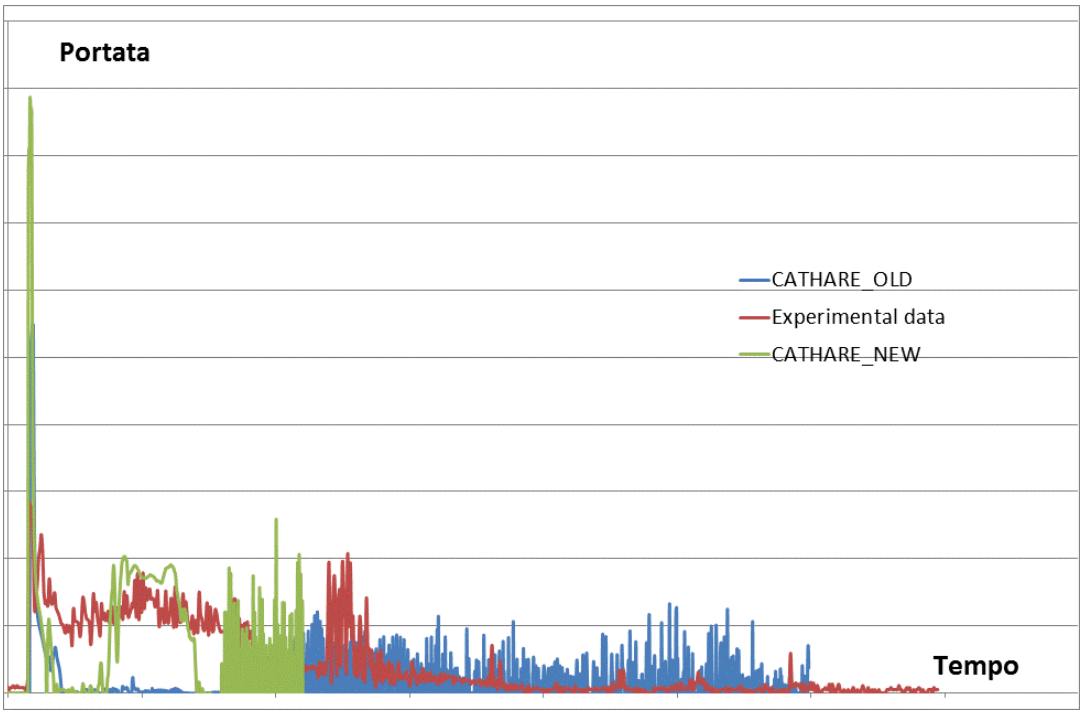


**Figura 16: Portata attraverso il PRHR.**

## 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 cosi 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 equazione 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].

| | |
|---|---|
| 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 nuova nodalizzazione TRACE dell'intero impianto sperimentale SPES-2 è stata sviluppata dal gruppo di ricerca del dipartimento DEIM dell'Università di Palermo ed è riportata nella Figura 17. La modellazione dei vari componenti dei circuiti primario e secondario e delle logiche di intervento e regolazione è basata sui dati progettuali contenuti in [6].
Per la simulazione dell'impianto sono stati utilizzati 154 componenti idraulici, 271 strutture termiche e 815 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.

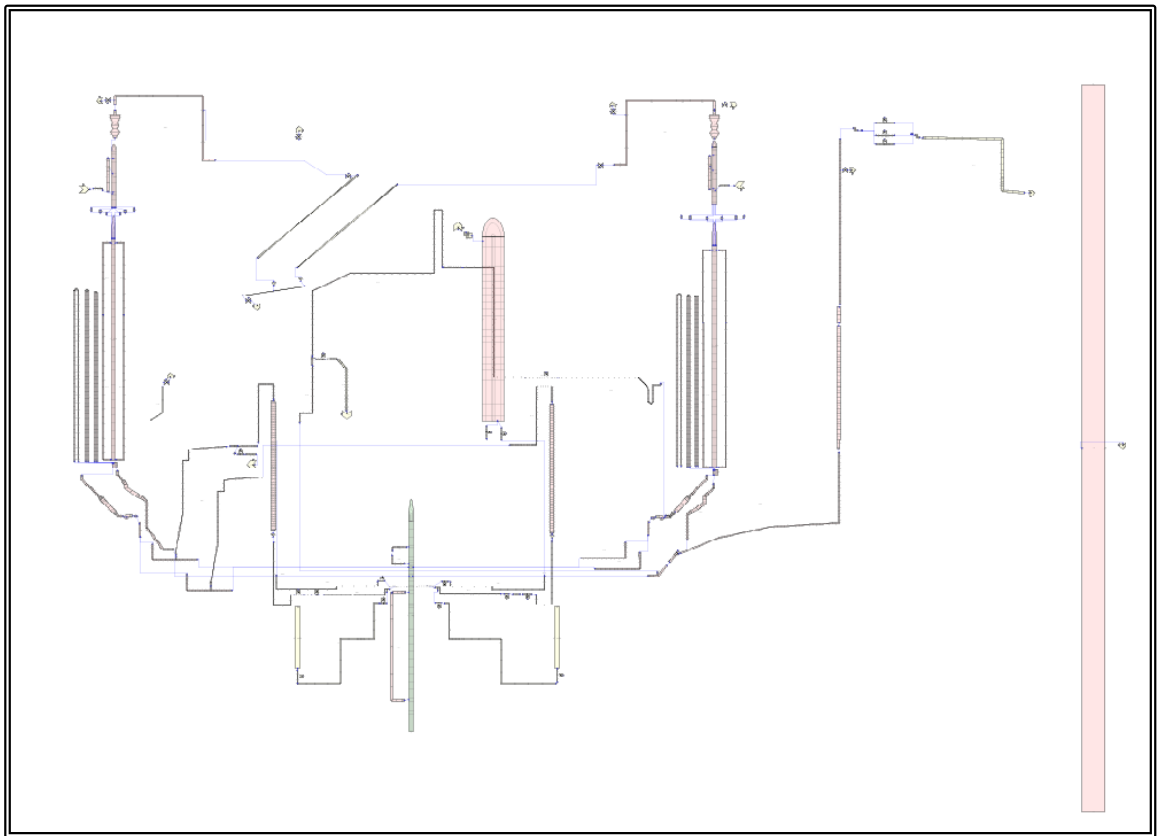

**Figura 17: Vista generale della nodalizzazione TRACE di SPES-2.**

Grazie all'esperienza maturata durante le attività svolte nell'ambito della precedente annualita del PAR si è deciso di utilizzare diversi modelli teorico-numerici resi disponibili all'interno del codice TRACE capaci di simulare in maniera più realistica particolari fenomeni fisici caratteristici degli SBLOCA [12]. L'adozione di tali modelli si è potuta effettuare solo dopo aver cambiato la disposizione della nodalizzazione dell'impianto. In seguito si descriveranno brevemente i principali modelli utilizzati.
Tutti i componenti verticali, 1-D e 3-D, adottano il modello di "level tracking" capace di localizzare, in maniera efficace, la posizione 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.

A causa della presenza di componenti e disposizioni geometriche che potevano limitare fenomeni di “flooding” o di “reflux condensation”, caratteristici degli SBLOCA che hanno luogo nell’impianto, si sono adottati modelli di “counter-current flow limitation” nelle giunzioni ove i fenomeni potevano presentarsi.
In tutti quei componenti simulanti un condotto principale con una giunzione laterale (tee) è stato applicato il modello di “offtake”; tale modello permette di simulare quanto più realisticamente possibile gli effetti di separazione e/o trascinamento che una fase può avere rispetto all’altra nella giunzione di snodo ogni qual volta il condotto principale è interessato da un moto bifase orizzontale stratificato.
Infine particolare cura è stata posta nella nodalizzazione dei volumi di controllo nei quali era atteso il fenomeno di efflusso critico, come quelli simulanti gli orifizi di break e delle ADS. Tale modellazione, seppure a scapito dell’onere computazionale, ha permesso di ottenere migliori risposte termodinamiche nelle giunzioni dove si destano le condizioni di “critical flow” [12].

## 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]

### 7.1.1 CANALE DI POTENZA E DOWNCOMERS

L’intero canale di potenza (PC) è stato descritto con un componente VESSEL discretizzato con 38 livelli assiali, 4 radiali e 4 azimutali. I primi quattro livelli assiali sono rappresentativi del lower plenum, i successivi 27 livelli comprendono riser e upper plenum 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 dei volumi del lower plenum e dell’upper head dove il PC presenta una sezione trasversale maggiore; i quattro settori azimutali sono stati utilizzati per modellare opportunamente i diversi imbocchi di entrata e di uscita presenti nel PC. L’annular downcomer è stato modellato in maniera separata dal PC e anche per la sua discretizzazione è stato adottato un componente VESSEL che presenta 14 livelli assiali, 2 radiali e 10 azimutali; tale separazione è stata effettuata per tenere conto non solo delle diverse posizioni circonferenziali dei vari imbocchi presenti ma anche per simulare correttamente la distribuzione di pressione azimutale tenendo conto dei vari ingombri distribuiti secondo diverse angolazioni. Tale approccio ha consentito di superare alcune criticità segnalate nell’ambito dei lavori sviluppati nella precedente annualità PAR. Il tubular downcomer è stato modellato mediante due PIPE (maggiormente discretizzati rispetto al modello precedente) così come il downcomer-upper head by pass. La Figura 18 mostra la nodalizzazione degli elementi appena descritti.

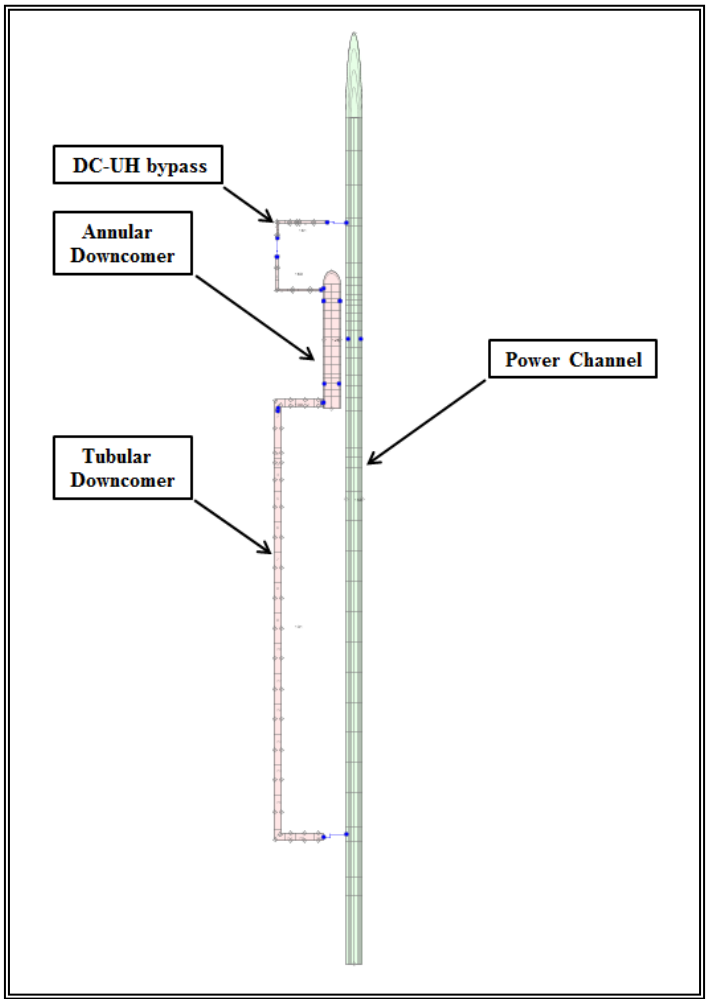


**Figura 18: Canale di potenza.**

### 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 21 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 modellate con due PIPE suddivisi in 17 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 39 volumi mentre per quanto riguarda la hot leg B questa è costituita da un unico PIPE discretizzato in 37 volumi. Anche i pump suctions 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, 34 e 32 nodi.
Infine le pompe sono state descritte secondo l'apposito modello presente in TRACE rispettando tutte le caratteristiche geometriche riportate nel report descrittivo dell'impianto [6]. La parte fluidodinamica ad esse legata ha avuto ulteriori sviluppi poiché sono state apportate delle correzioni nella descrizione TRACE delle curve omologhe; sono state inoltre implementate delle coppie di attrito che permettono alla pompa stessa di effettuare il coastdown nei tempi previsti.

### 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. A seguito dei risultati ottenuti nei lavori del PAR2013 (dove si era effettuata una modellazione che tenesse in conto le differenti quote delle chiome dei tubi ad U) si è deciso di modellare con un solo tubo equivalente i 13 tubi di ciascun ramo poiché questi, nonostante abbiano altezze leggermente diverse, non presentano in modo apprezzabile attitudini e comportamenti diversi dal punto di vista termoidraulico; ogni tubo equivalente si compone di 50 volumi. Tale scelta ha anche "favorito" la modellazione della cassa del generatore di vapore che adesso, in ogni loop, è stata modellata tramite 2 componenti PIPE (1 di entrata e l'altro di uscita) ciascuno diviso in 6 volumi di controllo.

## 7.2 NODALIZZAZIONE DEL SISTEMA SECONDARIO

Il modello del sistema secondario è stato costruito a partire dai dati reperibili in [6] 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 19: Generatore di vapore B., sono stati modellati in maniera identica poiché non presentano differenze geometriche. Come conseguenza delle scelte fatte per la descrizione dei tubi ad U, il riser contenente il fascio tubiero e la base del

downcomer anulare è stato “semplificato” adottando soli componenti monodimensionali; è stato infatti discretizzato con 3 componenti PIPE per un totale di 48 volumi; ogni downcomer tubolare è stato modellato con due PIPE per un totale di 19 volumi. La parte del generatore contenente la sezione superiore del riser, il separatore a ciclone, il downcomer anulare ed l’ingresso della main feedwater line è stata riprodotta mediante 2 VESSEL e 2 PIPE; i VESSEL sono composti rispettivamente l’uno da 14 livelli assiali, 3 settori radiali ed un settore azimutale e l’altro da 2 livelli assiali, un settore radiale ed uno azimutale; i 2 PIPE hanno ciascuno un solo volume ed effettuano l’accoppiamento tra i due VESSEL; infine il duomo del generatore di vapore è stato modellato per mezzo di un PIPE comprendente 4 nodi ed un VESSEL in geometria cartesiana che presenta 8 livelli assiali, 3 nodi lungo una direzione trasversale ed 1 nell’altra. Tale nodalizzazione si è resa necessaria per simulare realisticamente la insoddisfacente separazione del vapore all’interno di separatore ed essiccatore che un’accurata analisi dei dati sperimentali ha messo in luce.

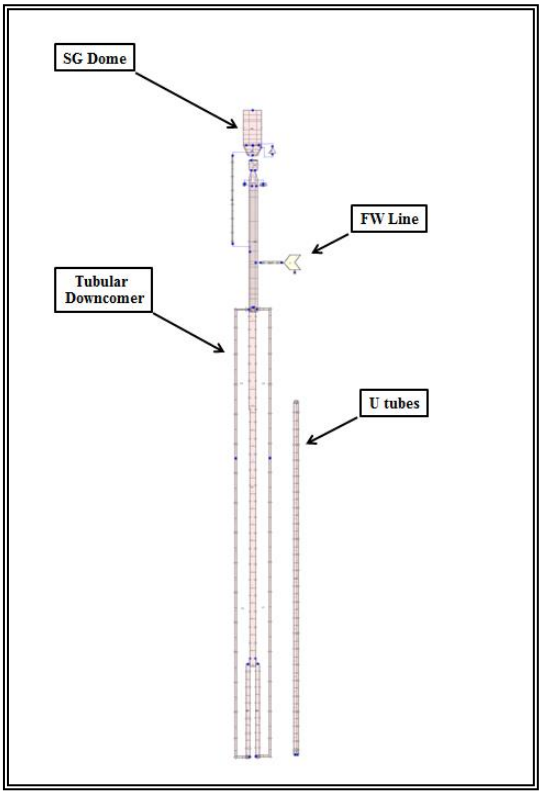


**Figura 19: Generatore di vapore B.**

### 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 : 2 PIPE, 11 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 leg B alle CMT 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 3 PIPE per un totale di 92 volumi mentre la linea B presenta due PIPE ed un TEE discretizzati con 82 nodi. Le CMT, 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 CMT 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 30 volumi. La Figura 20 mostra un insieme degli elementi sopra descritti.

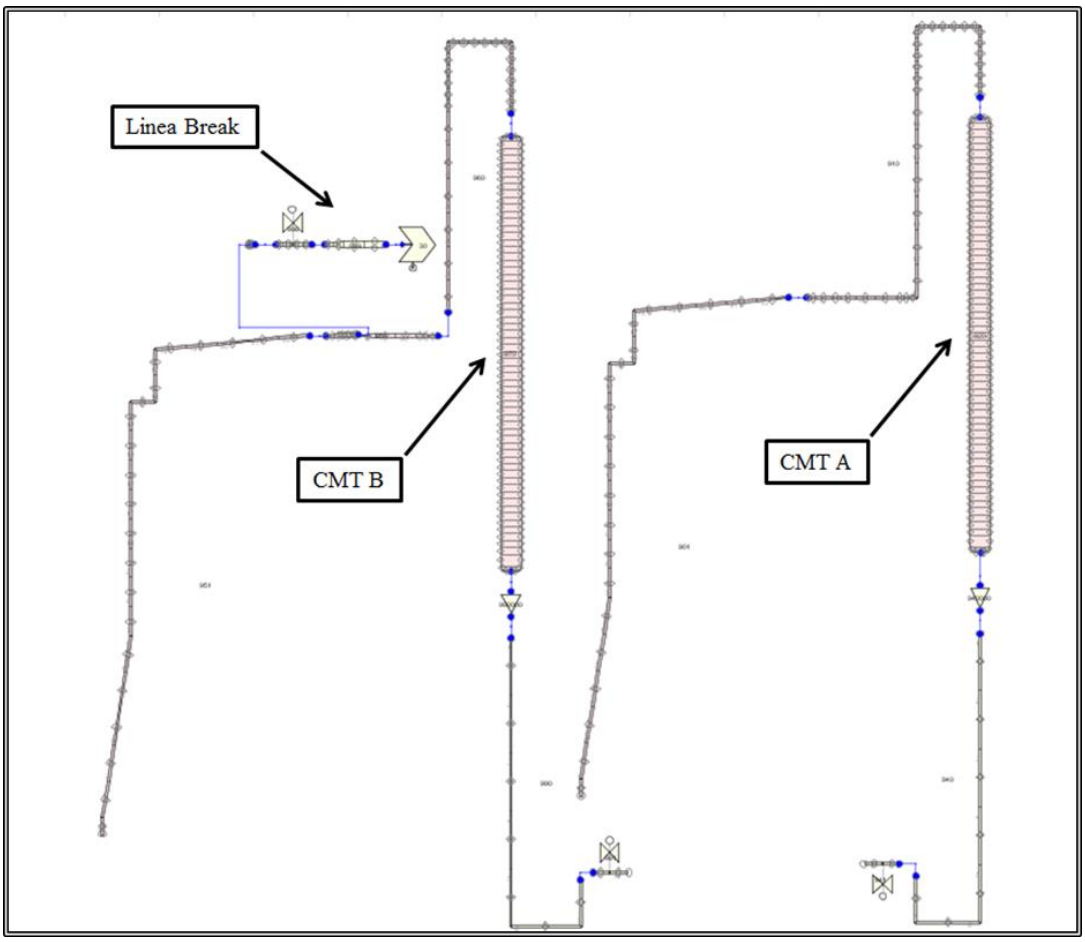


**Figura 20: CMT A e B.**

### 7.3.2 ACCUMULATORI

Anche gli accumulatori, Figura 21, 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).

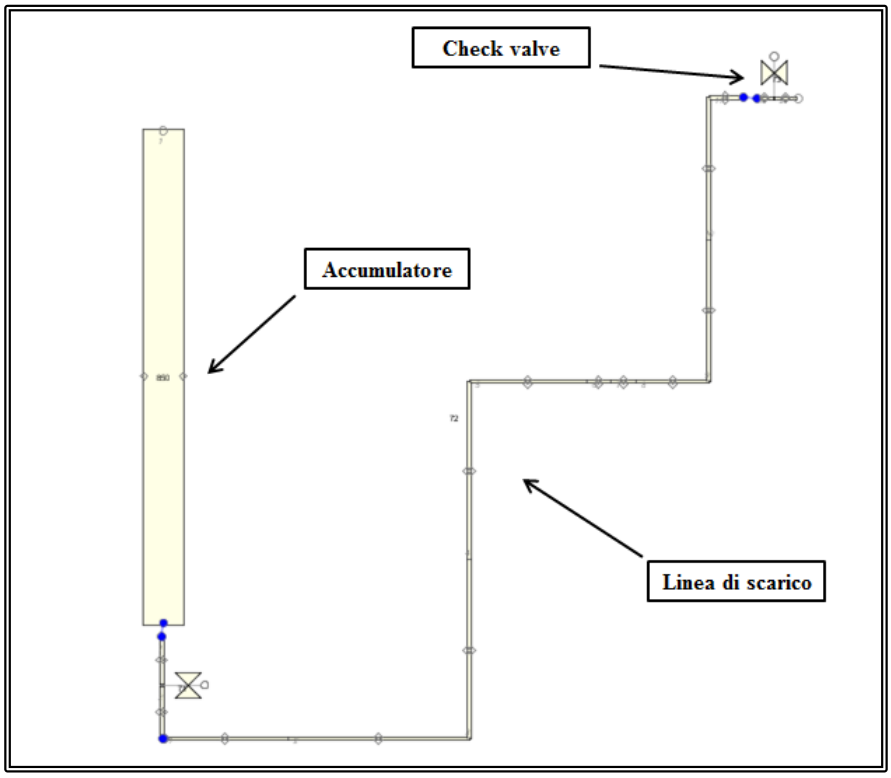


**Figura 21: Accumulatore B.**

### 7.3.3 PRHR ed IRWST

Il PRHR e l'IRWST, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, sono stati modellati rispettivamente con un PIPE (26 volumi) ed un VESSEL cartesiano (23 livelli assiali, 3 settori in direzione X, 6 settori in direzione Y); 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 cartesiano in sostituzione a quello cilindrico (adottato nel lavoro relativo al PAR2013) per effettuare la modellazione della IRWST ha permesso di migliorare l'efficacia dello scambio termico poiché tale geometria meglio si prestava alla descrizione della piscina (a forma di parallelepipedo) permettendo inoltre una corretta ubicazione spaziale della struttura termica di accoppiamento tra IRWST e PRHR. 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 129 volumi. Le linee di

iniezione dell'IRWST sono costituite entrambe da due VALVE ed un PIPE e, complessivamente, ciascuna linea è suddivisa in 16 volumi.

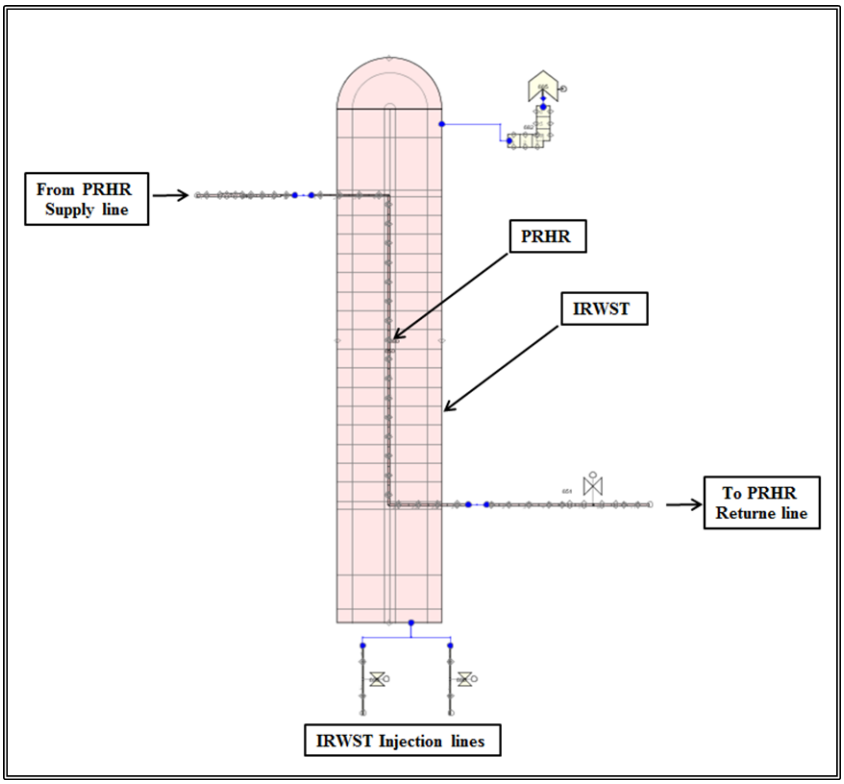


**Figura 22: IRWST e PRHR.**

### 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 DVI A e B sono identiche e costituiscono il ramo comune di iniezione di CMT, accumulatori e IRWST: sono state descritte nell'input con due TEE identici ciascuno discretizzato con 13 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] [13]; le valutazioni riguardano uno spettro di temperature adeguato sia durante le condizioni di funzionamento nominale dell'impianto sia durante i principali scenari incidentali.

## 7.5 VERIFICA DELL'INPUT

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] [5].
Di seguito, Tabella 8 e Tabella 9, vengono riportati in forma tabellare le principali grandezze in condizioni stazionarie.

| LOOP B ΔP [kPa] | | | | LOOP A ΔP [kPa] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Strumento** | **Sperimentale** | **TRACE old** | **TRACE new** | **Strumento** | **Sperimentale** | **TRACE old** | **TRACE new** |
| DP-B001P | -7.84 | -7.33 | -7.79 | DP-A001P | -7.9 | -7.31 | -7.79 |
| DP-B011P | 7.33 | 7.24 | 7.28 | DP-A011P | 8.7 | 8.51 | 8.48 |
| DP-B021P | 48.5 | 48.02 | 47.40 | DP-A021P | 49.06 | 50.1 | 49.39 |
| DP-001P | -23.34 | -14.22 | -13.72 | DP-001P | -23.34 | -14.22 | -13.72 |
| DP-002P | -9.54 | -14.59 | -13.97 | DP-002P | -9.54 | -14.59 | -13.97 |
| DP-003P | 19.07 | 18.44 | 18.23 | DP-003P | 19.07 | 18.44 | 18.23 |
| DP-000P | 88.06 | 87.25 | 87.58 | DP-000P | 88.06 | 87.25 | 87.58 |
| DP-B15P | 18.4 | 18.87 | 18.72 | DP-A15P | 19.16 | 20.63 | 20.47 |
| DP-B04P | 39.96 | 39.81 | 37.06 | DP-A04P | 90.4 (*) | 41.81 | 41.25 |
| DP-B05P | 110.35 | 108.69 | 110.39 | DP-A05P | 113.97 | 120.37 | 119.08 |
| DP-B06P | 73.66 | 80.29 | 79.91 | DP-A06P | 76.06 | 87.89 | 87.45 |
| DP-B07P | 18.13 | 17.21 | 17.54 | DP-A07P | 19.08 | 24.36 | 24.65 |
| DP-B08P | 27.02 | 27.65 | 26.77 | DP-A08P | 27.87 | 37.17 | 36.20 |
| DP-B09P | -7.84 | -7.68 | -7.51 | DP-A09P | -2.45 | -6.64 | -6.43 |
| DP-B00P | 402 | 409.66 | 407.87 | DP-A00P | 468 | 453.77 | 450.86 |

**Tabella 8: ΔP nel circuito primario.**

| Quantità | Valore di progetto | Sperimentale | TRACE old | TRACE new | Unità |
|---|---|---|---|---|---|
| Heater rod power | 4.99 | 4.97 | 4.99 | 4.99 | MW |
| Pressurizer pressure | 15.47 | 15.37 | 15.46 | 15.44 | MPa |
| Cold leg temperature (A1, A2)<br>(B1, B2) | - | 279.7, 279.4,<br>277.6, 277.6 | 275.17, 275.17<br>274.28, 274.28 | 275.04, 275.04<br>275.03, 275.03 | °C |
| Core inlet temperature | 275.4 | 277.9 | 275.01 | 275.39 | °C |
| Core outlet temperature | 313.6 | 320.4 | 314.73 | 314.75 | °C |
| Hot leg temperature (A, B) | - | 315.8, 316.9 | 314.13, 313.95 | 314.32, 314.30 | °C |
| Core flowrate | 24 | 23.55 | 23.56 | 23.56 | kg/s |
| Cold leg flowrate (A1, A2)<br>(B1, B2) | 6.035 | 6.06, 6.24<br>5.56, 5.82 | 6.07, 6.22<br>5.60, 5.81 | 6.08, 6.20<br>5.64, 5.77 | kg/s |
| Pump speed (A, B) | - | 3057, 2769 | 2678.58, 2530.56 | 3032, 2841 | rpm |
| DC-UH Bypass flowrate | 0.14 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | kg/s |
| Pressurizer level | 3.8 | 3.77 | 3.77 | 3.75 | m |
| SG pressure (A,B) | 4.9 | 4.97, 4.94 | 5.05, 5.05 | 5.05, 5.05 | MPa |
| SG DC level (A,B) | 13 | 12.53, 12.70 | 12.62, 12.75 | 12.32, 12.43 | m |
| SG Main Feed Water temperature (A,B) | 227 | 225.6, 226.9 | 227.85, 227.85 | 227.85, 227.85 | °C |
| SG Main Feed Water pressure (A,B) | - | 5.16, 5.08 | 5.16, 5.16 | 5.16, 5.16 | MPa |
| SG Main Feed Water flowrate (A,B) | 1.35 | 2.0, 2.2 | 1.39, 1.31 | 2.14, 2.40 | kg/s |
| ACC level (A,B) | 2.3 | 2.33, 2.30 | 2.3, 2.3 | 2.3, 2.3 | m |
| ACC water temperature (A,B) | 20 | 24.4, 23.4 | 20.9, 20.90 | 20.9, 20.90 | °C |
| ACC pressure (A,B) | 4.8 | 4.93, 4.98 | 4.92, 4.92 | 4.92, 4.92 | MPa |
| Heat losses | - | - | 0.17 | 0.16 | MW |

**Tabella 9 : Condizioni iniziali.**

## 8. ANALISI DEL "2 INCH COLD LEG TO CORE MAKE-UP TANK PRESSURE BALANCE LINE BREAK" 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; tale prova era prevista all'interno della matrice di test sperimentali atta ad investigare il comportamento dei sistemi di emergenza della facility; il transitorio in esame mostra, almeno nella prima fase, un comportamento asimmetrico del drenaggio delle due CMT.
Le condizioni iniziali di riferimento sono state desunte dai valori riportati in [5] [14] 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 4-1 sono riportati i valori ottenuti durante lo stazionario per mezzo della nuova configurazione TRACE e messi a confronto con dati sperimentali e risultati precedentemente raggiunti.

| Quantità | Valore di progetto | Sperimentale | TRACE old | TRACE new | Unità |
|---|---|---|---|---|---|
| Rod Power | 4.99 ± 0.1 | 4.915 | 4.99 | 4.99 | MW |
| Pressurizer pressure | 15.51 ± 0.2 | 15.4 | 15.46 | 15.47 | MPa |
| Average HL temperature | 315.5 ± 5 | 318.4 | 314.45 | 312.84 | °C |
| Core inlet temperature | 276.4 ± 5 | 283 | 274.95 | 275.39 | °C |
| Core flowrate | 23.2 ± 0.25 | 23.3 | 23.21 | 23.34 | kg/s |
| Cold leg flowrate | 5.86 ± 0.1 | 5.8 | 5.84 | 5.79 | kg/s |
| DC-UH bypass flowrate | 0.18 ± 0.05 | 0.19 | 0.18 | 0.18 | kg/s |
| Pressurizer level | 3.78 ± 0.38 | 3.7 | 3.75 | 3.77 | m |
| Accumulator pressure | 4.9 ± 0.1 | 4.9 | 4.91 | 4.91 | MPa |
| IRWST level | 8.5 ± 0.1 | 8.5 | 8.53 | 8.53 | m |
| PRHR supply line temperature | >100 | 107 | 126.85 | 103.6 | °C |
| UH average temperature | 296 ± 5 | 269 | 269.45 | 270.2 | °C |
| Balance line temperature | > 165 | 255 | 256.85 | 268.1 | °C |
| CMT level | full | full | full | full | - |
| CMT temperature | 20 ± 5 | 28.35 | 21.5 | 20.0 | °C |
| SG level | 1.48 ± 0.15 | 1.3 | 1.52 | 1.28 | m |
| SG pressure | 4.9 ± 0.2 | 5.05 | 5.05 | 5.06 | MPa |
| SG MFW temperature | 226 ± 7 | 233 | 233.85 | 233.85 | °C |

**Tabella 10: Condizioni iniziali.**

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. 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. Nella CMT A, non essendo direttamente interessata dalla rottura, si instaura la circolazione naturale (fase di ricircolazione di liquido) che permette l'immissione dell'acqua fredda nel sistema primario; nella CMT B, invece, per effetto della depressione creata dal break nella pertinente balance line, la ricircolazione di liquido si innesca con difficoltà e dunque tale CMT non riesce a iniettare alcuna significativa portata in DVI. Il PRHR e le sue linee di collegamento sono anch'essi interessati da circolazione naturale caratterizzata però da moti bifase poiché dal canale di potenza verso le hot leg transita miscela. Il vapore presente nell'upper plenum tra i bocchelli delle hot leg 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 il ramo "freddo" del loop B è completamente svuotato e nelle cold leg di pertinenza vi è la presenza di vapore (tale fenomeno si può dedurre dall'andamento delle temperature ivi misurate, Figura 23). Il vapore presente nelle cold leg risale lungo le balance line interrompendone la vena liquida: la CMT A, iniziando la fase di circolazione naturale bifase, comincia a svuotarsi, mentre nella CMT B si instaura una modesta circolazione naturale bifase, ancorché oscillante; ciò è da attribuire sostanzialmente alla presenza di fluido bifase al break che ne riduce la portata specifica critica e consente un modesto passaggio di miscela verso la sommità della CMT B.

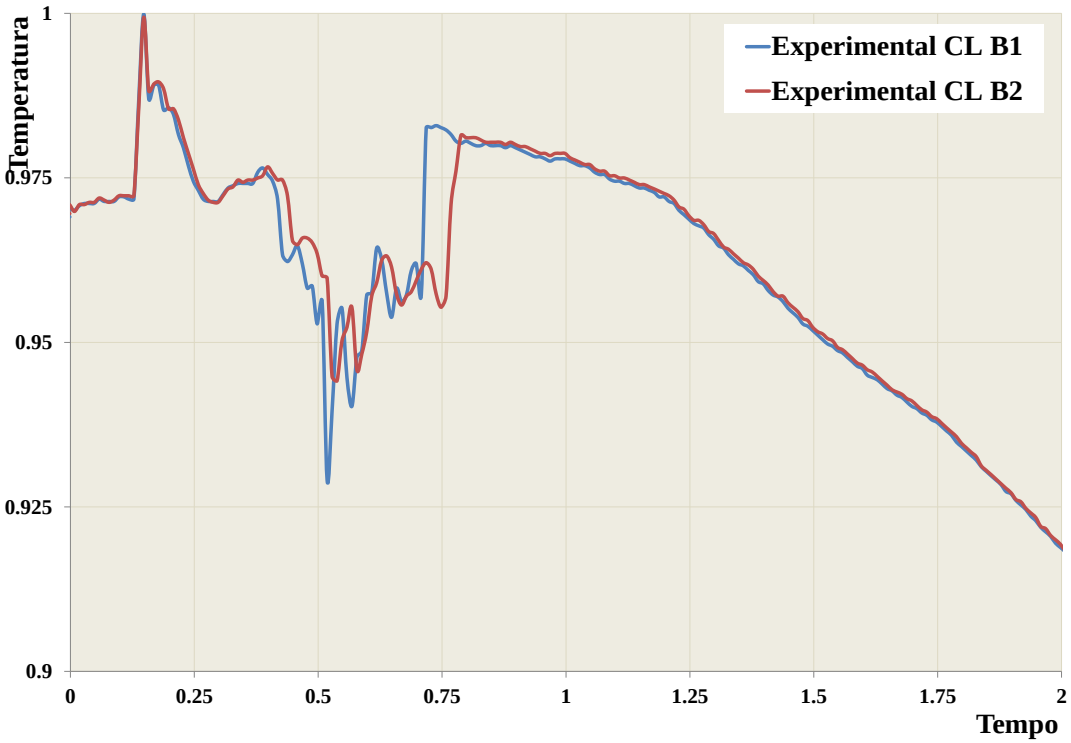


**Figura 23: Andamento delle temperature misurate nelle cold legs B.**

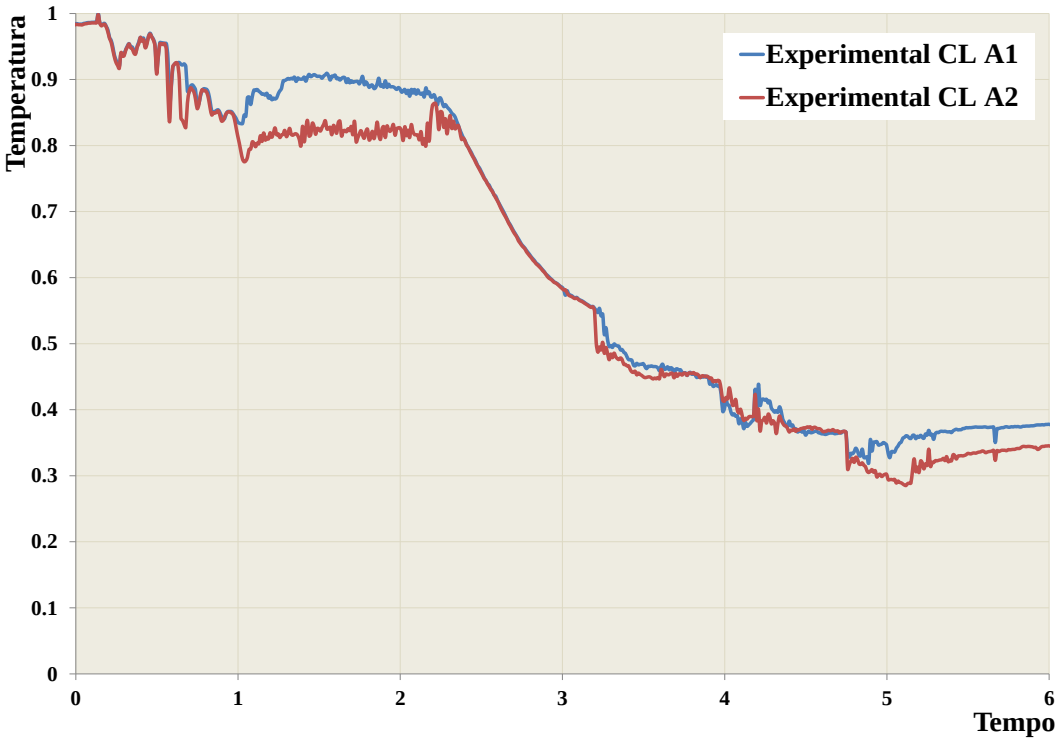


**Figura 24: Andamento delle temperature misurate nelle cold legs A.**

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 leg del loop A. Infatti nella CL-A2 transita liquido freddo verso il downcomer mentre nella CL-A1 vi è la presenza di miscela bifase che risale dal downcomer verso la pompa (come si può dedurre dall'andamento delle temperature misurate nelle stesse, Figura 24).
Dopo circa cinque minuti dalla presenza di circolazione naturale bifase nelle CMT 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, la cui tempistica è mostrata in Tabella 11.

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

**Tabella 11: Setpoint di apertura delle valvole ADS.**

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.

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 e dai risultati ottenuti nel corso della precedente annualità è stato effettuato il confronto con i risultati ottenuti tramite le nuove simulazioni TRACE [5] [14] [15]; come si può osservare dai grafici sotto riportati il codice, grazie alla nuova configurazione ed ai modelli adottati, riesce a predire bene il transitorio sia dal punto di vista fenomenologico che nella tempistica di attuazione dei sistemi di emergenza passivi. Nella Tabella 12 sono riportati i tempi che caratterizzano i principali eventi.

| Evento | Segnale | Sperimentale | TRACE old | TRACE new |
|---|---|---|---|---|
| Break opening | - | 0 | 0 | 0 |
| R signal | P=12.41 Mpa | 60 | 54.8 | 61.8 |
| Turbine trip | R signal + 2 s | - | - | - |
| Reactor trip | R signal + 7 s | - | - | - |
| S signal | P=11.72 Mpa | 69 | 62.5 | 69.5 |
| PRHRIV opening | S signal + 2 s | 72 | 64.5 | 71.5 |
| MSLIV closure | R signal + 2 s | 62 | 56.8 | 63.8 |
| MFWIV closure | S signal + 2 s | 71 | 64.5 | 71.5 |
| CMTIV opening | S signal + 2 s | 72 | 64.5 | 71.5 |
| RCP trip | S signal + 16.2 s | 87 | 78.7 | 85.7 |
| ADS 1 opening | CMT level=67% +30 s | 1072 | 1270 | 1074 |
| Accumulators injection | - | 1074 | 1170 | 1078 |
| ADS 2 opening | CMT level=67% +125 s | 1167 | 1265 | 1169 |
| ADS 3 opening | CMT level=67% +245 s | 1286 | 1385 | 1289 |
| Accumulators emptying | - | - | - | - |
| ADS 4 opening | CMT level=20% +60 s | 2090 | 2139 | 2053 |
| IRWST injection | - | 2189 | 2185 | 2152 |
| CMT emptying (Intact side) | - | - | | - |

**Tabella 12 : Eventi principali registrati durante il transitorio.**

L'andamento della pressione nel circuito primario, Figura 25, risulta essere ben predetto durante tutto il transitorio; infatti il ritardo che si riscontrava nelle precedenti simulazioni nella predizione della depressurizzazione causata dall'apertura dell'ADS, adesso è stato colmato; tale ritardo era da attribuire ad un più lento svuotamento della CMT A rispetto a quanto non avvenisse sperimentalmente: nelle Figura 27 e Figura 29 si può notare come ora i risultati della nuova simulazione riescano a seguire l'andamento sperimentale di livello e portata relativi a tale componente; la nuova nodalizzazione riesce dunque a predire tutte le fenomenologie che interessano le fasi di iniezione delle CMT nonostante, come è possibile vedere dalle Figura 28 e Figura 29, i valori di livello e portata della CMT B continuino a non essere sempre in accordo con i dati sperimentali. Tali differenze possono essere attribuite ad una incertezza sulle dimensioni dell'orifizio presente nella linea di iniezione della CMT B: i dati riportati nel rapporto descrittivo della facility [6] appaiono incongruenti rispetto ai valori necessari ad un adeguato scaling della linea.
L'iniezione degli accumulatori è adesso in accordo con il comportamento sperimentale di tale sistema sia quantitativamente che qualitativamente, Figura 30 e Figura 31; allo stesso modo, è apprezzabile un miglioramento nella predizione della portata iniettata dell'IRWST, Figura 32e Figura 33. Anche nella temperatura delle barre scaldanti è possibile osservare un globale miglioramento nella predizione del dato sperimentale, Figura 34. Inoltre le fasi di riempimento e svuotamento del pressurizzatore, Figura 35, hanno subito un miglioramento sensibile; tale risultato è stato ottenuto dopo diverse analisi di sensibilità effettuate al fine di predire, nella maniera più corretta possibile, la portata bifase che si instaura nell'ADS.
In tutte le figure che riportano dati sperimentali le scale sono state 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.

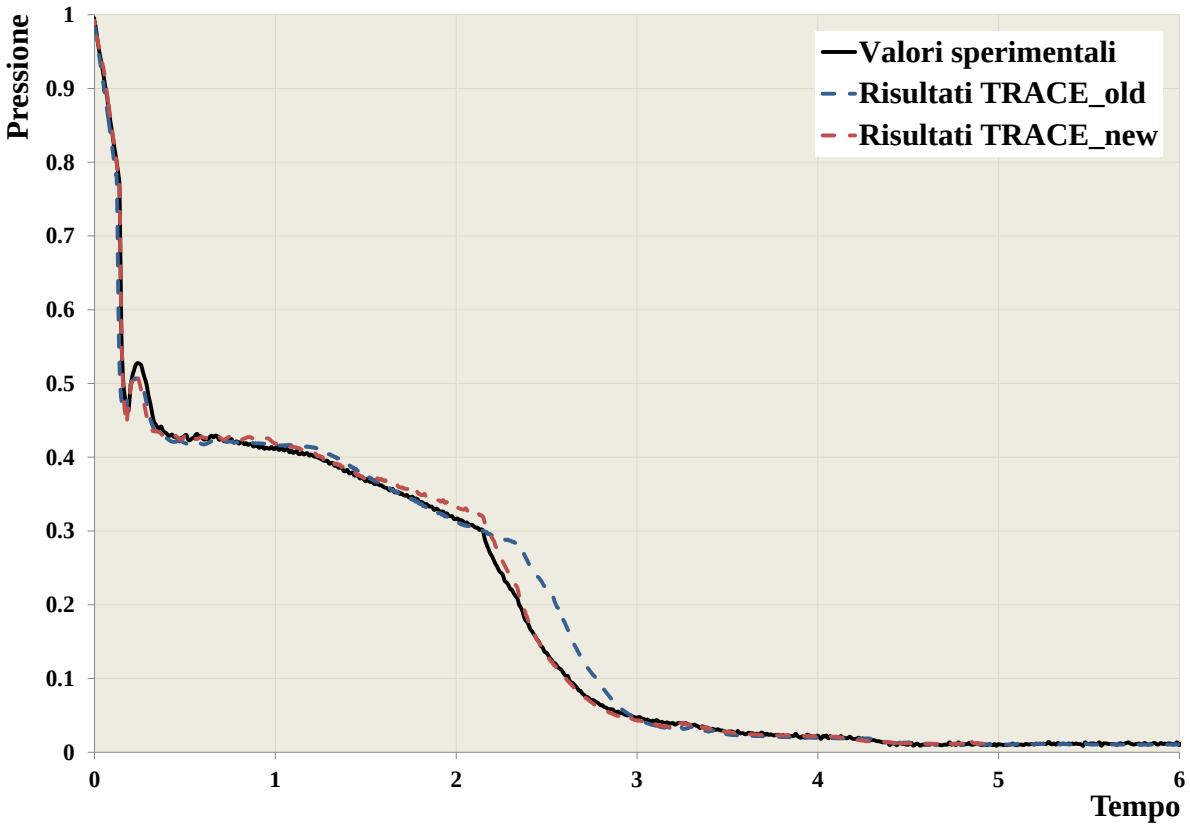


**Figura 25: Andamento della pressione nel sistema primario.**

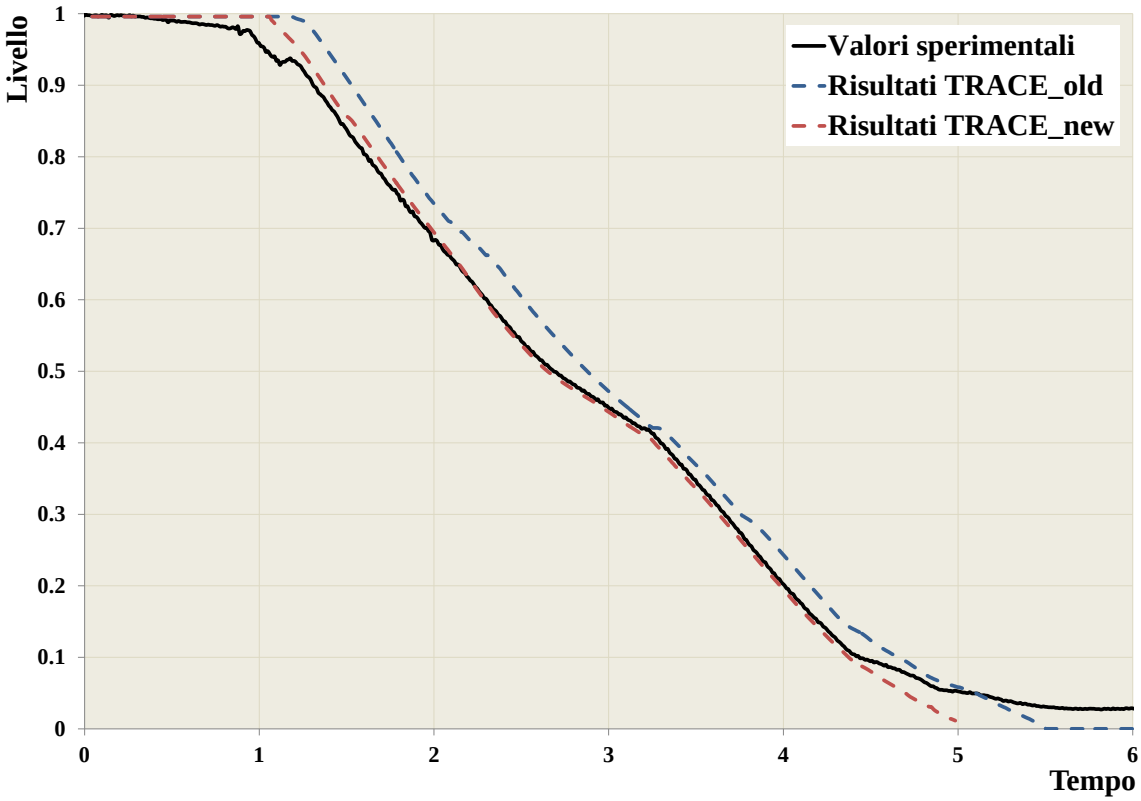


**Figura 26: Andamento del livello nella CMT A.**

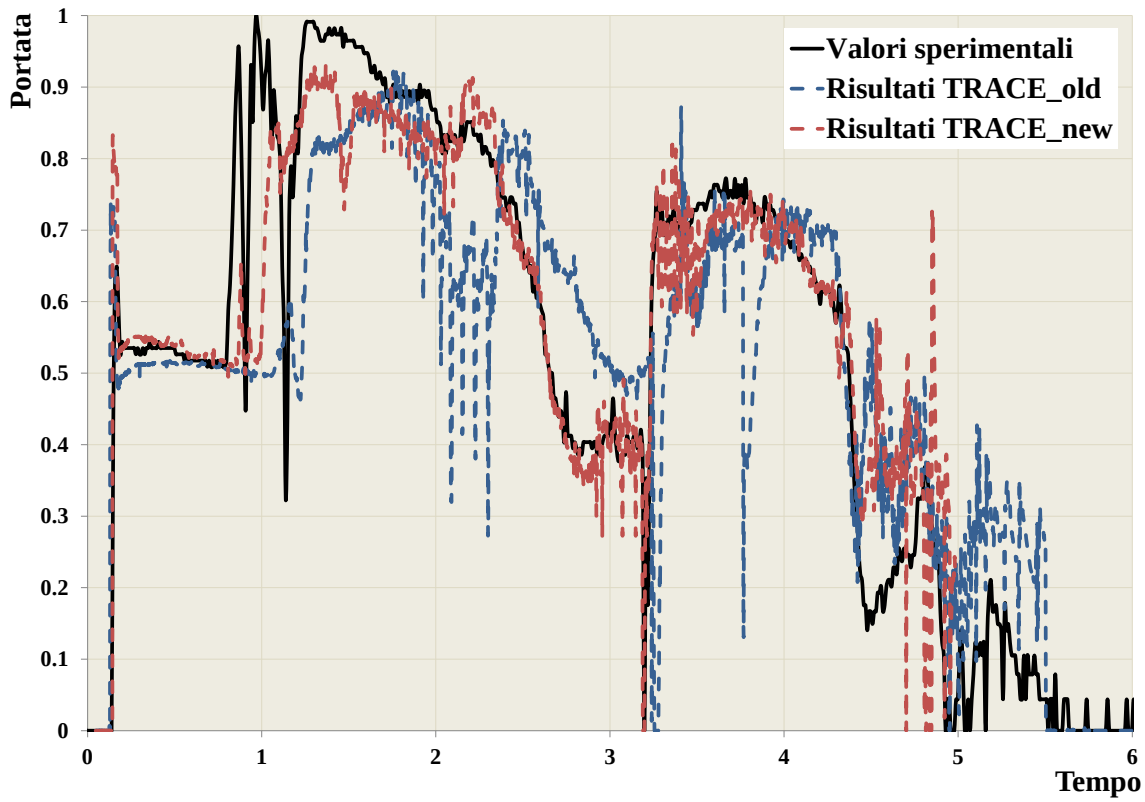


**Figura 27: Andamento della portata nella CMT A.**

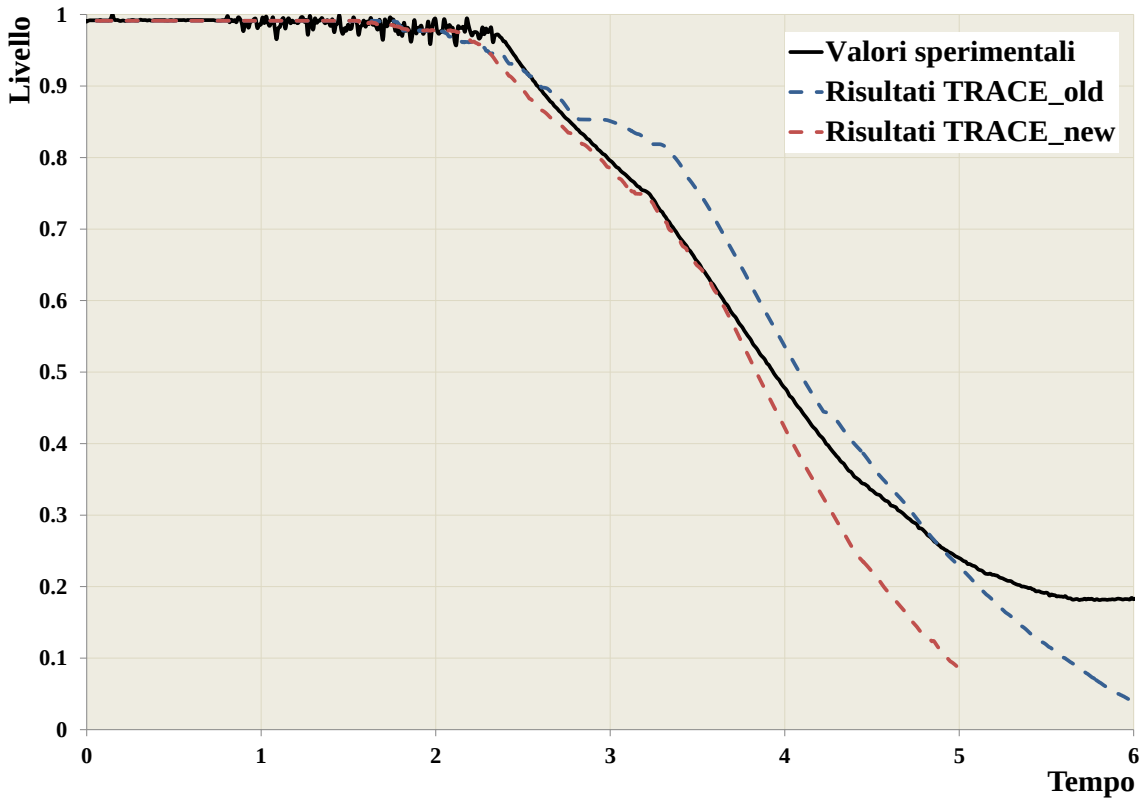


**Figura 28: Andamento del livello nella CMT B.**

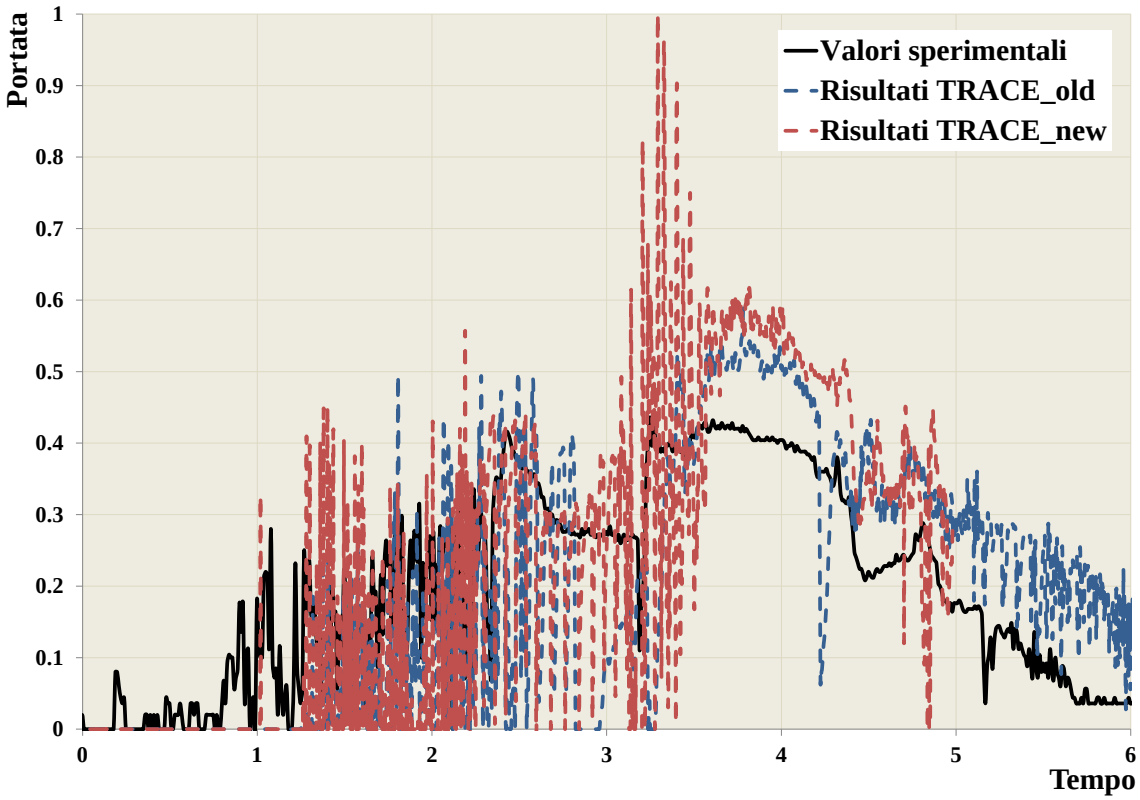


**Figura 29: Andamento della portata nella CMT B.**

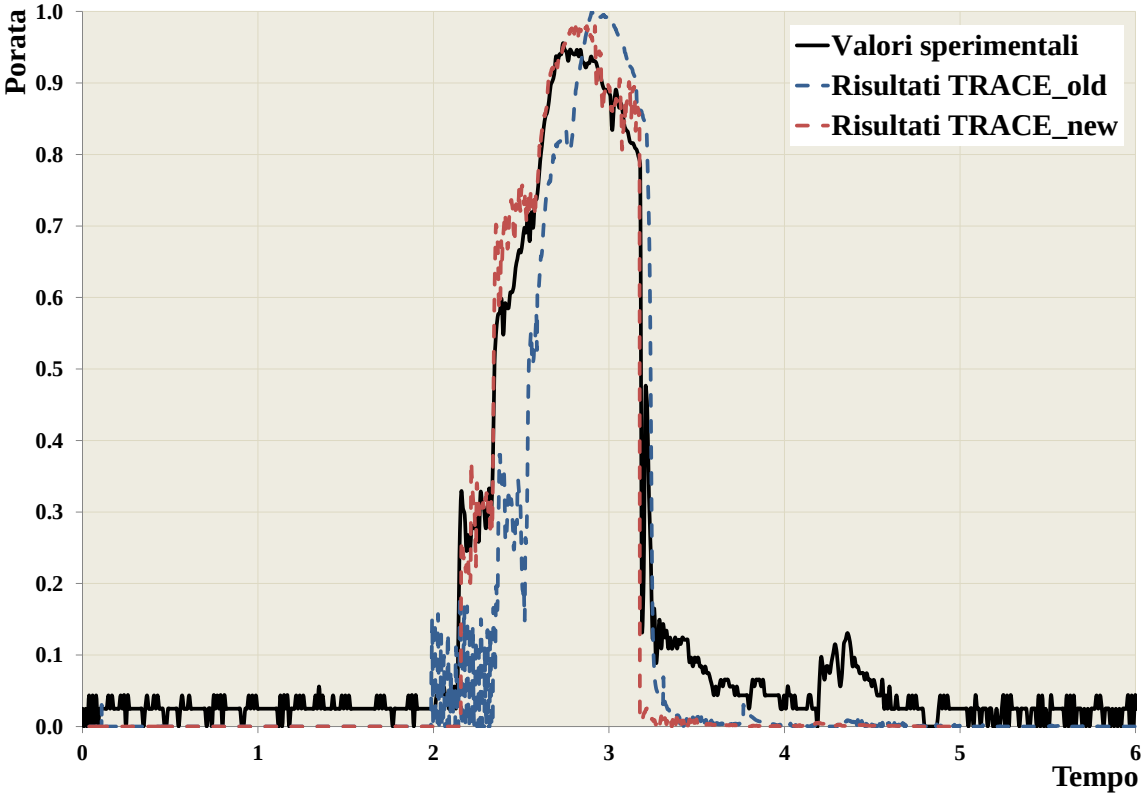


**Figura 30 : Andamento della portata nell'accumulatore A.**

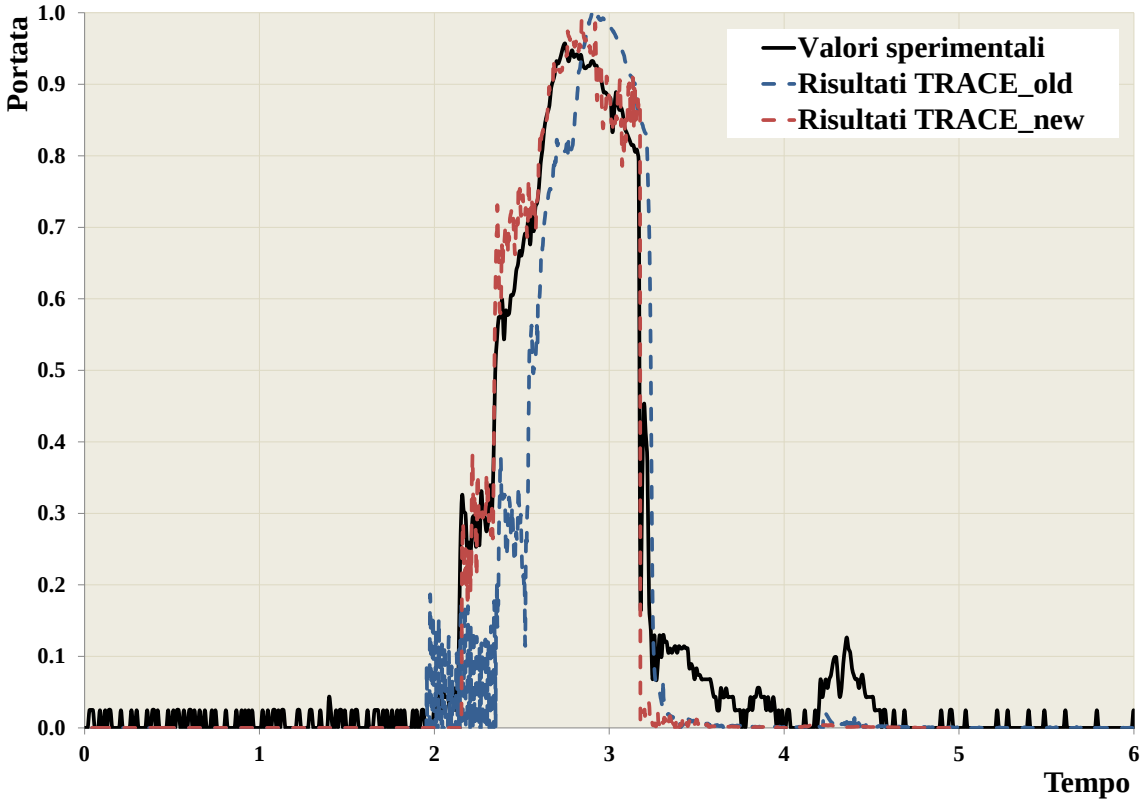


**Figura 31: Andamento della portata nell'accumulatore B.**

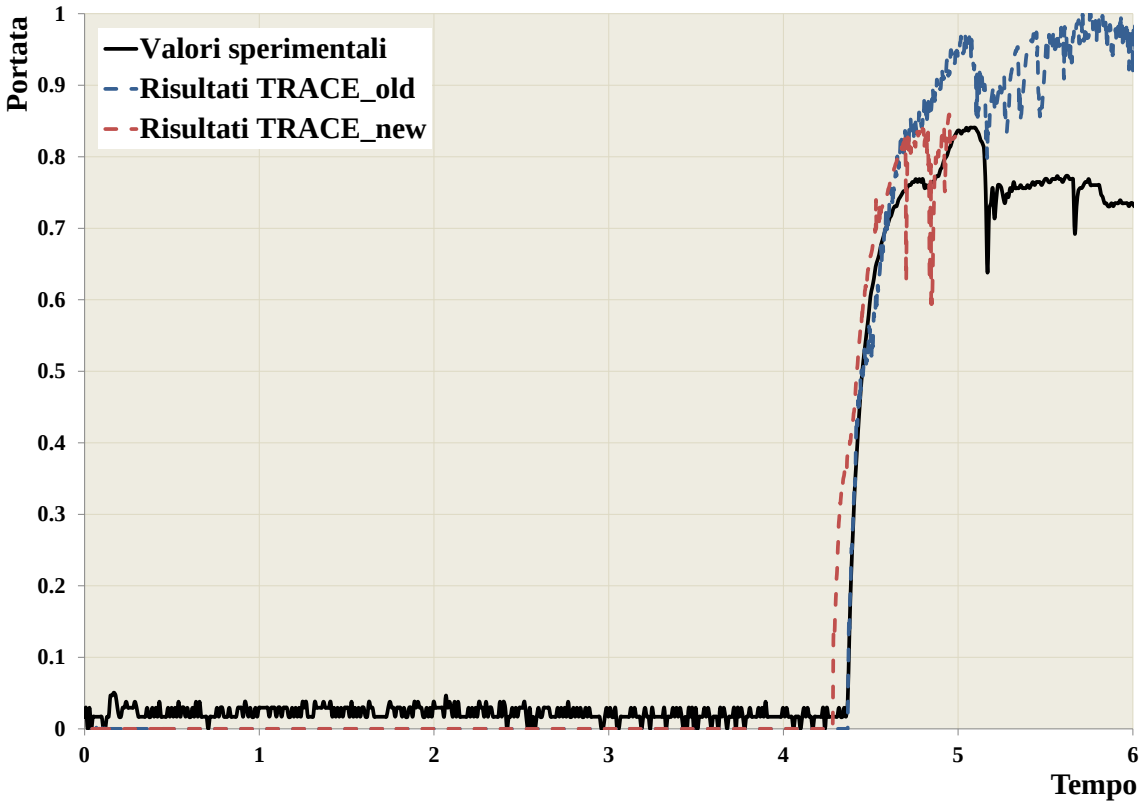


**Figura 32: Andamento della portata nell'IRWST injection line A.**

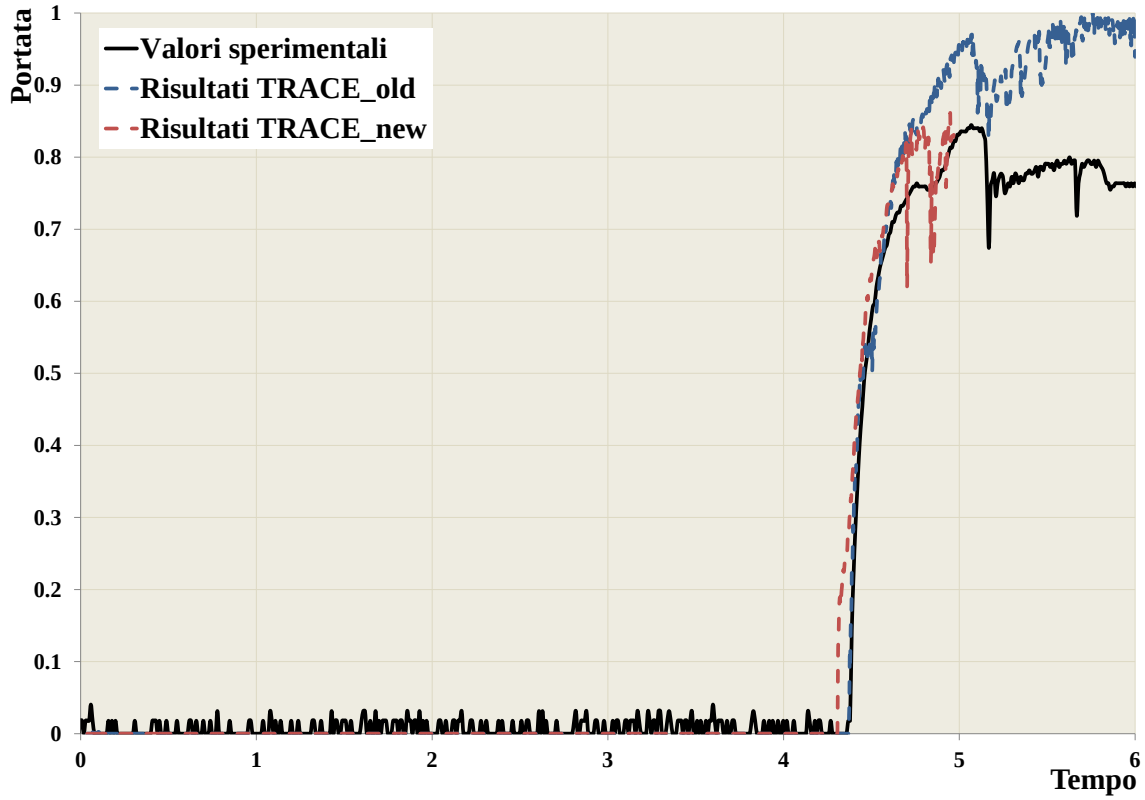


**Figura 33: Andamento della portata nell'IRWST injection line B.**

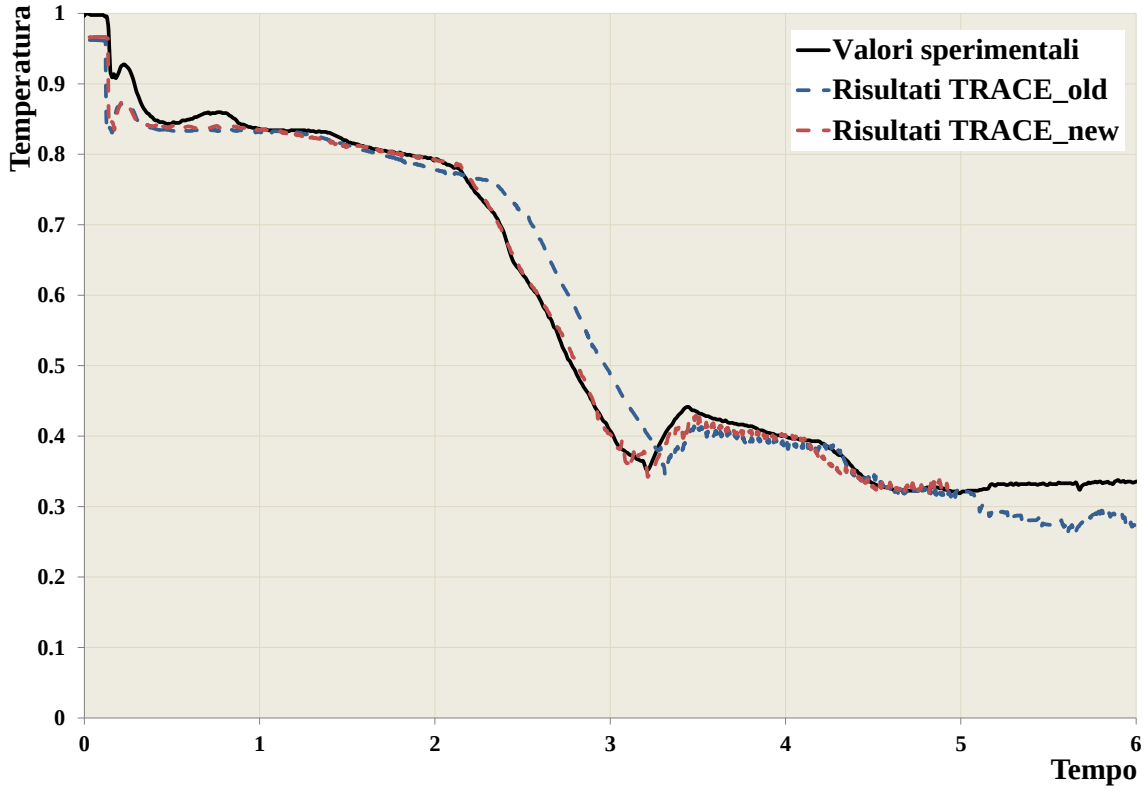


**Figura 34 : Andamento della temperatura nel canale di potenza.**

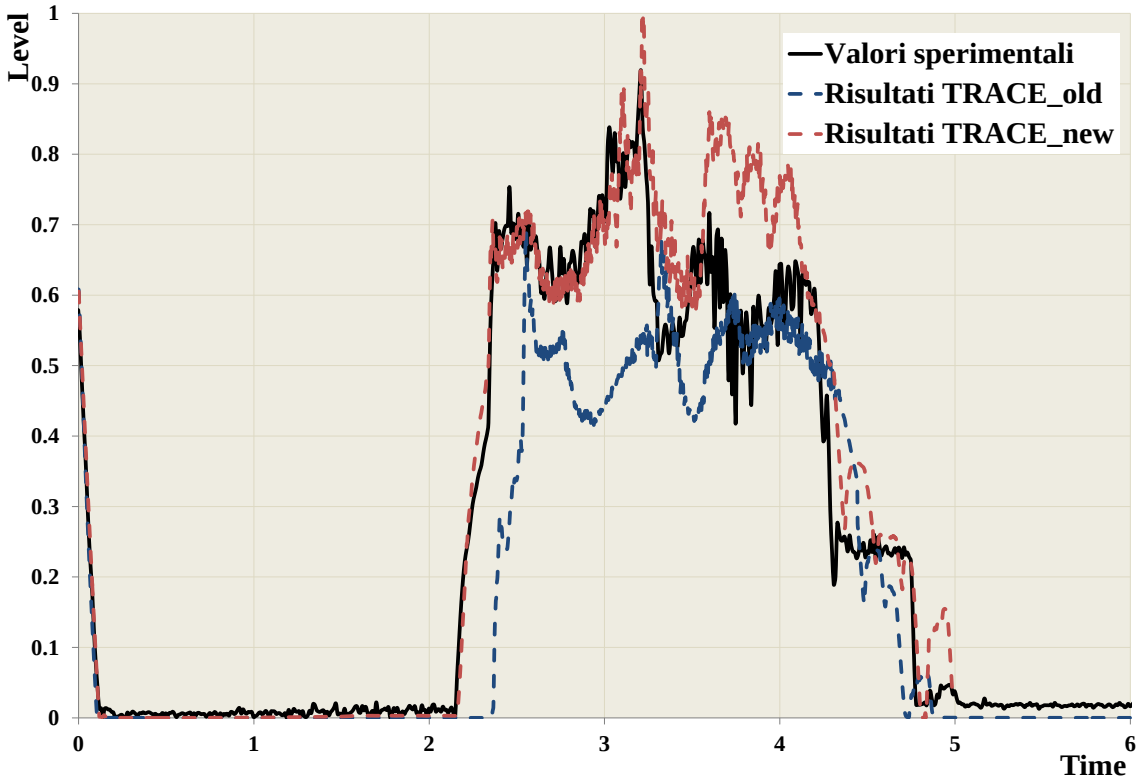


**Figura 35 : Andamento del livello nel pressurizzatore.**

## 9. 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 viene presentato il nuovo modello CATHARE dell'impianto sperimentale SPES-2 sviluppato da ENEA sulla base delle conclusioni presentate in [5]. Nel nuovo modello il downcomer anulare DWC_ANN è stato nodalizzato con l'elemento 3D e il downcomer tubolare è stato sdoppiato, la piscina che rappresenta l'IRWST è stata modificata per consentire di descrivere al meglio il fenomeno della circolazione naturale.Tale modello è stato utilizzato per la simulazione di un transitorio incidentale del tipo LOCA.

Esso viene originato da una rottura di 2" sulla DVI che collega i sistemi di emergenza del loop B al downcomer anulare. I risultati dell'analisi condotta messi al confronto con i dati ottenuti dalla stessa simulazione effettuata con il vecchio noding della facility e con i dati sperimentali hanno permesso di mettere in luce la migliorata capacità del modello CATHARE di descrivere il comportamento dell'impianto in condizioni incidentali: eliminazione del comportamento asimmetrico riscontrato nel funzionamento della CMTA/B nei calcoli condotti con la vecchia nodalizzazione (linea blu).

Nonostante ciò, dall'esame dell'andamento della portata che fluisce dentro al PRHR e che consente di asportare il calore residuo di decadimento dal circuito primario, si nota come qualche centinaia di secondi dopo l'intervento di tale sistema la circolazione naturale si blocchi per riprendere subito dopo con valori di portata paragonabili a quelli sperimentali. Tale fenomeno potrebbe essere imputabile alla difficoltà, riscontrata nel codice CATHARE, di cambiare il valore della rugosità interna dei tubi: tale variabile essendo utilizzata per il calcolo delle perdite di carico distribuite influisce fortemente sull'innesco della circolazione naturale.

Il DEIM dell' Università di Palermo ha invece sviluppato una versione migliorativa ed ottimizzata del modello di calcolo per il codice TRACE dell'impianto sperimentale SPES-2. La nodalizzazione messa a punto ricalca realisticamente le caratteristiche dell'impianto e dei principali componenti. La qualità dei risultati ottenuti a mezzo del nuovo modello è stata valutata attraverso un loro confronto con i dati sperimentali ed i risultati ottenuti nella precedente annualità PAR relativi al transitorio denominato S01007 test "2" Cold Leg to Core Make-up Tank pressure balance line break". Le nuove simulazioni numeriche hanno permesso di raggiungere risultati soddisfacenti oltre che dal punto di vista qualitativo (come già si era ottenuto nei lavori del PAR2013) anche dal punto di vista quantitativo; ciò è stato possibile grazie all'adozione di nuovi modelli teorico-numerici e di una nuova discretizzazione dell'impianto in esame. La predizione globale del comportamento dell'impianto nel test di riferimento è da ritenersi dunque migliore di quella precedentemente ottenuta, a conferma delle ottime capacità che il codice TRACE mostra nel simulare tutti quei fenomeni termoidraulici caratteristici degli small break LOCA.

Gli sviluppi effettuati nella discretizzazione del modello hanno permesso di cogliere e comprendere meglio i fenomeni che si destano nell'annular downcomer in presenza di moti bifase contribuendo sensibilmente al raggiungimento della corretta simulazione temporale degli eventi principali del transitorio incidentale.

Come notato nel precedente lavoro, la presenza di gas incondensabile all'interno del sistema sembra essere ben governata dal codice solo ad alte e medie pressioni poiché nelle fasi del transitorio con pressioni prossime a quella atmosferica le simulazioni sono affette da instabilità numeriche che rendono difficoltoso il procedere del calcolo computazionale, rallentandolo sensibilmente. Tuttavia tali instabilità non inficiano significativamente l'evoluzione finale del transitorio che quindi risulta ben predetto in tutte le sue parti significative.

**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 |

**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 2013;
[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] 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;
[6] M.Rigamonti, SPES-2 Facility description, SIET 00 183 RI 92, Rev.1. Piacenza, 6-12-95;
[7] Bestion D., G. Geffraye, The CATHARE code, CEA, Grenoble (F), Apr. 2002.
[8] M. Tarantini, SPES – 2 input deck modifications and 3D analisys to support downcomer noding, PT – ENI 00021, Marzo 1996.
[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] 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.
[13] O. G. Martynenko, P.P Khramtsov, Free-Convective Heat Transfer: With Many Photographs of Flows and Heat Exchange, Springer, 2005.
[14] 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.
[15] S. D’Amico, C. Lombardo, I. Moscato, M. Polidori, G. Vella, Transient analysis of "2 inch cold leg to core make-up tank pressure balance line break" in SPES-2 facility by using TRACE code, ASME-ATI-UIT 2015 Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment, Maggio 2015.

**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".

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

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