



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Analisi mediante il codice TRACE delle principali fenomenologie  
caratterizzanti il transitorio conseguente ad una rottura a  
ghigliottina nella linea DVI dell'impianto sperimentale SPES-3

*F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, P.A. Di Maio, M. Giardina, F. Mascari,  
G. Morana, G. Vella*



Report RdS/2011/107

ANALISI MEDIANTE IL CODICE TRACE DELLE PRINCIPALI FENOMENOLOGIE CARATTERIZZANTI  
IL TRANSITORIO CONSEGUENTE AD UNA ROTTURA A GHIGLIOTTINA NELLA LINEA DVI  
DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES-3

F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, P.A. Di Maio, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella -  
UNIPA

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

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

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

**UNIVERSITA' DI PALERMO**

**DIPARTIMENTO DELL'ENERGIA  
SEZIONE DI INGEGNERIA NUCLEARE**

**ANALISI MEDIANTE IL CODICE TRACE DELLE  
PRINCIPALI FENOMENOLOGIE CARATTERIZZANTI IL  
TRANSITORIO CONSEGUENTE AD UNA ROTTURA A  
GHIGLIOTTINA NELLA LINEA DVI DELL'IMPIANTO  
SPERIMENTALE SPES-3**

**Autori**

**F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, P.A. Di Maio,**

**M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella**

**CERSE-UNIPA RL 1212/2011**

**PALERMO, LUGLIO 2011**

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2 punto E1  
AdP MSE-ENEA "Ricerca di Sistema Elettrico" - PAR2008-09  
Progetto 1.3 – "Nuovo Nucleare da Fissione".

# INDICE

<b>LISTA DELLE ABBREVIAZIONI</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DELLE FIGURE</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DELLE TABELLE</b>	<b>6</b>
<b>SOMMARIO</b>	<b>7</b>
<b>CAPITOLO 1: IL REATTORE NUCLEARE IRIS</b>	<b>8</b>
1-1 GENERALITA'	8
1-2 APPROCCIO "SAFETY-BY-DESIGN" IN IRIS	12
<b>CAPITOLO 2: BREVE DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES-3</b>	<b>15</b>
2-1 GENERALITA'	15
2-2 L'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES-3	16
<b>CAPITOLO 3: CENNI SUL CODICE TRACE</b>	<b>20</b>
3-1 INTRODUZIONE SUI CODICI DI SISTEMA	20
3-2 IL CODICE TRACE	21
3-3 UTILIZZO DEL CODICE TRACE TRAMITE SNAP	25
<b>CAPITOLO 4: MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES-3</b>	<b>29</b>
4-1 BREVE DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DI SPES 3	29
<b>CAPITOLO 5: SIMULAZIONE DI STATI STAZIONARI</b>	<b>36</b>
5-1: ANALISI DELLO STAZIONARIO	36
<b>CAPITOLO 6: ANALISI DI UN CASO DI "LOW ELEVATION SBLOCA" DOVUTO AD UNA ROTTURA A GHIGLIOTTINA DELLA LINEA DI INIEZIONE DIRETTA NEL VESSEL</b>	<b>40</b>
6-1: ANALISI DEL TRANSITORIO	40
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>54</b>

# LISTA DELLE ABBREVIAZIONI

ADS	Automatic Depressurization System
ADS-ST	ADS Single Train
BAF	Bottom of Active Fuel
CRDM	Control Rod Driven Mechanism
CV	Containment Vessel
DC	Downcomer
DEG	Double Ended Guillotine
DOE	U.S Department Of Energy
DW	Dry Well
DVI	Direct Vessel Injection
EBT	Emergency Boration Tank
EHRS	Emergency Heat Removal System
FDA	Final Design Approval
FL	Feed Line
FW	Feed Water
HX	Heat Exchanger
IRIS	International Reactor Innovative and Secure
LGMS	Long Term Gravity Make-up System
LOCA	Loss Of Coolant Accident
LP	Lower Plenum
LR	Lower Riser
LWR	Light Water Reactor
MFIV	Main Feed Isolation Valve
MSIV	Main Steam Isolation Valve
NRC	U.S. Nuclear Regulatory Commission
PCC	Passive Containment Cooling
PRZ	Pressurizer
PSS	Pressure Suppression System
PWR	Pressurized Water Reactor
QT	Quench Tank
RC	Reactor Cavity
RCCA	Rod Cluster Control Assembly
RCS	Reactor Coolant System
RELAP5	Reactor Excursion and Leak Analysis Program
RPV	Reactor Pressure Vessel
RWST	Refueling Water Storage Tank
SG	Steam generator

SL

SPES

TRACE

UR

Steam Line

Simulatore Per Esperienze di Sicurezza

TRAC/RELAP Advanced Computational Engine

Upper Riser

# LISTA DELLE FIGURE

Figura 1-1: Schema del reattore IRIS.

Figura 1-2 : Schema del PRZ di IRIS.

Figura 1-3: Schema del contenimento e dei sistemi di sicurezza tipici del reattore IRIS.

Figura 1-4: Schema della sequenza incidentale dovuta a un SBLOCA per il reattore IRIS.

Figura 2-1: Schema generale dell'impianto sperimentale SPES-3.

Figura 2-2: Vista principale e vista dall'alto dell'impianto sperimentale SPES-3.

Figura 3-1: Schema concettuale alla base del codice FLASH.

Figura 3-2: Suddivisione assiale, radiale e azimutale del componente vessel implementato nel codice TRACE.

Figura 3-3: File di input e output generati durante una simulazione (base run o restart run) del codice TRACE V5.

Figura 3-4: Architettura TRACE/SNAP.

Figura 3-5: Tipica visualizzazione SNAP di un input TRACE.

Figura 3-6: Tipica visualizzazione SNAP del componente 3D vessel.

Figura 3-7: Tipica visualizzazione del "Configuration Tool" nel pacchetto applicativo SNAP.

Figura 3-8: Tipica visualizzazione del "Job Status" nel pacchetto applicativo SNAP.

Fig. 4-1a. Vista generale della nodalizzazione TRACE di SPES-3.

Fig. 4-1a. Vista generale della nodalizzazione TRACE dei componenti del sistema di contenimento di SPES-3.

Fig. 4-2: Nodalizzazione del sistema primario di SPES-3.

Fig. 4-3: Nodalizzazione dello SG-A lato secondario (a); nodalizzazione dello SG-B lato secondario (b); nodalizzazione dello SG-C lato secondario (c).

Figure 5-1: Profilo di temperatura nello SG-A (lato primario e secondario); caso a 10 MW.

Figura 5-2 Profilo di temperatura nello SG-A (lato primario e secondario); caso a 6.5 MW.

Figura 6-1: Portata nei Break.

Figura 6-2: Inventario di massa nel RPV.

Figura 6-3: Pressione nel PRZ.

Figure 6-4: Massa di fluido nel RC.

Figura 6-5: Portate che dalla RC vanno al DW.

Figura 6-6: Livello collassato nel DW.

Figura 6-7: Andamenti delle pressioni nel PRZ e nel DW.

Figura 6-8: Livello collassato nel vessel.

Figura 6-9: Sequenza temporale delle principali fenomenologie termoidrauliche che si manifestano nel corso del transitorio nei primi 3600s.

Figura 6-10: Sequenza temporale delle principali fenomenologie termoidrauliche che si manifestano nel corso del transitorio nelle prime 6 h.

Figure 6-11: Sequenza temporale delle principali fenomenologie termoidrauliche che si manifestano nel corso del

transitorio nelle prime 24 h.

Figure 6-12: Inventario primario predetto dal codice TRACE e RELAP5.

Figure 6-13: Pressione nel PRZ predetta dal codice TRACE e RELAP5.

# LISTA DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Confronto tra alcune caratteristiche di IRIS e di SPES-3.

Tabella 3-1: Componenti utilizzati nel codice TRACE.

Tabella 3-2: File di input/output del codice TRACE V5.

Tabella 4-1: Componenti utilizzati nel modello TRACE per la simulazione di SPES-3.

Tabella 5-1: Valori delle principali grandezze di interesse dell'impianto SPES 3 in condizioni stazionarie a 10 MW.

Tabella 5-2: Valori delle principali grandezze di interesse dell'impianto SPES 3 in condizioni stazionarie a 6.5 MW.

Tabella 6-1: Fasi ed interventi simulati nel corso del transitorio DVI break (10 MW e 14 tubi).

# SOMMARIO

IRIS è un reattore nucleare avanzato in pressione da 335 MWe di tipo integrato e modulare. Il progetto integrato dell'impianto permette di evitare componenti in pressione esterni al RPV, riducendo il numero e le dimensioni di eventuali penetrazioni nel RPV. Ciò elimina in sede di progetto la possibilità che si verifichino "*large break LOCA*" e si riduce, nel contempo, il numero di possibili eventi iniziatori di "*small break LOCA*". Sistemi passivi sono considerati nel suo progetto per la mitigazione di eventuali sequenze incidentali.

Un impianto sperimentale, chiamato SPES-3, è in fase di realizzazione presso la SIET, per caratterizzare i fenomeni termoidraulici che si destano, in transitori seguenti a postulati eventi incidentali nel reattore IRIS, indagando allo stesso tempo il comportamento dei sistemi passivi considerati in sede di progetto e le interazioni fra i vari componenti del contenimento e il primario. I dati sperimentali prodotti nell'impianto possono essere utilizzati anche per la validazioni di codici termoidraulici d sistema.

Una nodalizzazione TRACE dell'impianto SPES-3 è stata sviluppata presso il Dipartimento dell'Energia dell'Università degli Studi di Palermo al fine di condurre analisi di eventuale supporto al progetto dell'impianto sperimentale SPES-3 e, dopo la costruzione dello stesso, calcoli di pre-test, per contribuire al progetto termoidraulico dei test di interesse, e calcoli di post-test, con lo scopo di validare il codice TRACE.

In questo lavoro sono presentati i risultati di analisi sia in condizioni stazionarie sia in condizione di transitorio conseguente all'evento base di progetto, ossia un caso di "Low Elevation SBLOCA" consistente nella rottura a ghigliottina della linea di iniezione diretta nel vessel (DVI). Tali analisi hanno assunto le ipotesi che ciascun fascio elicoidale degli SG di SPES fosse costituito da 14 tubi e con condizioni iniziali in cui la potenza erogata sia fissata a 10 MW.

Sono inoltre presentati i più recenti risultati relativi ad una più aderente configurazione di SPES 3 che prevede più correttamente 13 tubi per ciascun fascio tubiero elicoidale e condizioni iniziali realistiche, tenuto conto che la massima potenza erogabile in condizione stazionarie è limitata a 6.5

MW.

Il modello è stato opportunamente messo a punto e con lo stesso, dopo la stabilizzazione alle nuove condizioni iniziali, è stata svolta un'analisi del medesimo transitorio di riferimento, limitatamente al compimento della fase di blow down e all'innesco della fase di long term injection con evidenza dell'interazione fra il sistema primario e quello di contenimento.

# CAPITOLO 1

## *IL REATTORE NUCLEARE IRIS*

### **1-1 GENERALITÀ**

IRIS è un reattore nucleare avanzato in pressione da 335 MWe di tipo integrato e modulare. Il progetto integrato dell'impianto permette di evitare componenti in pressione esterni al RPV, riducendo il numero e le dimensioni di eventuali penetrazioni nel RPV. Ciò elimina in sede di progetto la possibilità che si verifichino "*large break LOCA*" e si riduce, nel contempo, il numero di possibili eventi iniziatori di "*small break LOCA*". Sistemi passivi sono considerati nel suo progetto per la mitigazione di eventuali sequenze incidentali.

La figura 1 mostra lo schema del recipiente in pressione contenente i principale componenti del Reactor Coolant System (RCS): il core, gli SGs, le pompe, il PRZ, il Control Rod Drive Mechanism (CRDM), ecc. Il RPV è di dimensioni maggiori rispetto a un tipico PWR avendo un'altezza totale di circa 22m.

Il core e gli elementi di combustibile in IRIS sono molto simili a quelli di un tipico PWR della Westinghouse. In particolare, un elemento di combustibile consiste in 264 barre di combustibile disposte in un reticolo quadrato del tipo 17x17. La posizione centrale è riservata alla strumentazione all'interno del core, 24 posizioni sono poi riservate alle barre di controllo. La configurazione del core consiste in 89 elementi di combustibile con una potenza termica nominale di 1000 MW. Il combustibile utilizzato è  $UO_2$  arricchito al 4.95%, con un basso arricchimento nella periferia del core. Il controllo della reattività è realizzato tramite barre di controllo, una limitata quantità di boro in soluzione nel refrigerante e veleni bruciabili. Il core è progettato per un ciclo di vita di 3-3.5 anni.

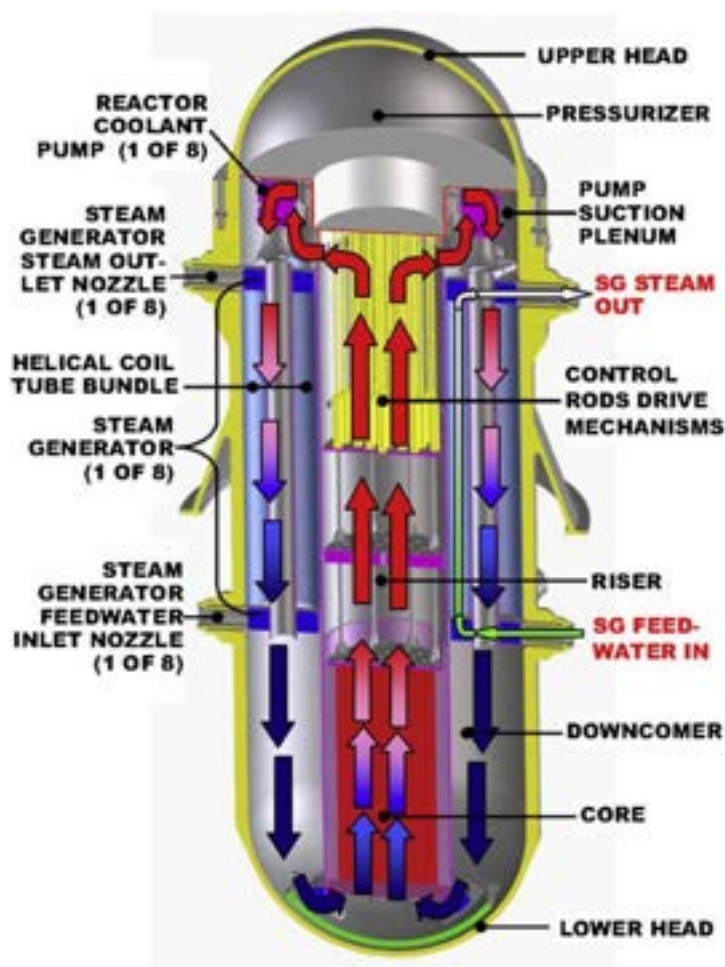


Figura 1-1: Schema del reattore IRIS.

La configurazione integrale di IRIS è ideale per ospitare tutti i meccanismi di guida delle barre di controllo all'interno del vessel, nella regione appena sopra il core. Le barre di controllo vengono azionate dai CRDM e scendono dentro gli Rod Cluster Control Assembly (RCCA) presenti all'interno del riser.

Il PRZ in IRIS, Fig. 1-2, è integrato nella parte superiore del RPV. La regione del PRZ è definita da una struttura a “cappello rovesciata”, che separa il fluido refrigerante primario in circolazione, dal fluido in saturazione che si trova nel PRZ. Sono presenti due fori (“surge orifices”) nella parte inferiore, che consentono la comunicazione idraulica tra l'UR ed il PRZ, al fine di assicurare la medesima pressione in tutto il circuito primario. Un isolamento termico a nido d'ape è presente nel suo progetto. Il PRZ ha un volume totale di circa 70 m<sup>3</sup>, di cui circa 50 m<sup>3</sup> sono occupati dal vapore. Questo grande volume permette l'espansione del vapore e pertanto non è necessario l'utilizzo degli spray, mentre sono sempre presenti riscaldatori elettrici.

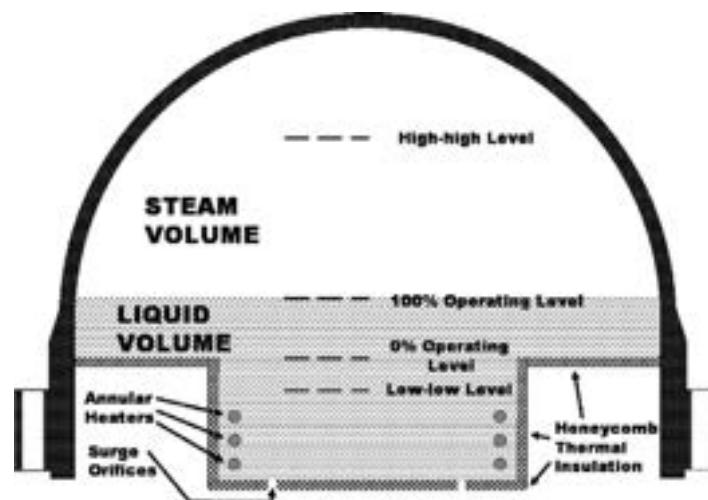


Figura 1-2 : Schema del PRZ di IRIS.

Gli SG impiegati in IRIS sono del tipo a tubi elicoidali "once-through". Otto SG, ognuno costituito da 656 tubi, sono allocati nello spazio anulare tra il barrel ed il guscio esterno del recipiente in pressione. Ogni modulo SG è composto da una colonna centrale interna che supporta i tubi, da collettori inferiori dell'acqua di alimento, dai collettori superiori del vapore che andrà in turbina per la successiva espansione. Le pompe, poste al di sopra degli SG, sono a tamburo (“*spool pumps*”).

Il percorso del fluido primario, indicato nella Fig. 1-1 con delle frecce colorate, va dal basso verso l'alto passando attraverso il core ed il riser fino alle pompe, poi la circolazione avviene in senso contrario e il fluido primario, dopo avere attraversato le pompe, lambisce esternamente i tubi degli SG. All'uscita dallo scambiatore, il fluido percorre la regione anulare esterna del core, il DC, fino al Lower Plenum (LP), e poi risale nuovamente attraverso il core ricominciando il ciclo. Le frecce colorate in blu indicano che il fluido refrigerante, inizialmente freddo, attraversa il core e per effetto delle fissioni, che qui avvengono, si riscalda; le frecce cambiano dunque colore fino ad avere un rosso molto acceso nel riser. Il fluido così caldo percorre l'esterno dei tubi elicoidali negli SG e,

poiché trasferisce la sua energia al fluido secondario, torna nuovamente freddo nel DC dove le frecce tornano a essere di colore blu. Il percorso del fluido secondario è invece indicato con la freccia di colore verde. Il fluido freddo all'ingresso della FW entra all'interno dei tubi elicoidali, e scorrendo in contro corrente rispetto al fluido primario più caldo, aumenta la sua entalpia specifica fino a vaporizzare completamente ed uscire dalla SL. Il cambiamento di fase in Fig. 1-1 è rappresentato dal colore della freccia che via via diventa sempre più chiaro. In queste condizioni il vapore andrà poi in turbina e dopo l'espansione e la seguente condensazione il fluido secondario sarà pronto per un nuovo ciclo.

Un contenimento compatto sferico di acciaio di 25 m di diametro, diviso in differenti compartimenti, è direttamente coinvolto, attraverso un comportamento dinamico accoppiato con il sistema primario, nella strategia di mitigazione passiva tipica di IRIS. Il contenimento è composto da un Dry Well (DW), dalla Reactor Cavity (RC) e dal Pressure Suppression System (PSS). La figura 1-3 mostra lo schema del contenimento e dei sistemi di sicurezza tipici del reattore IRIS.

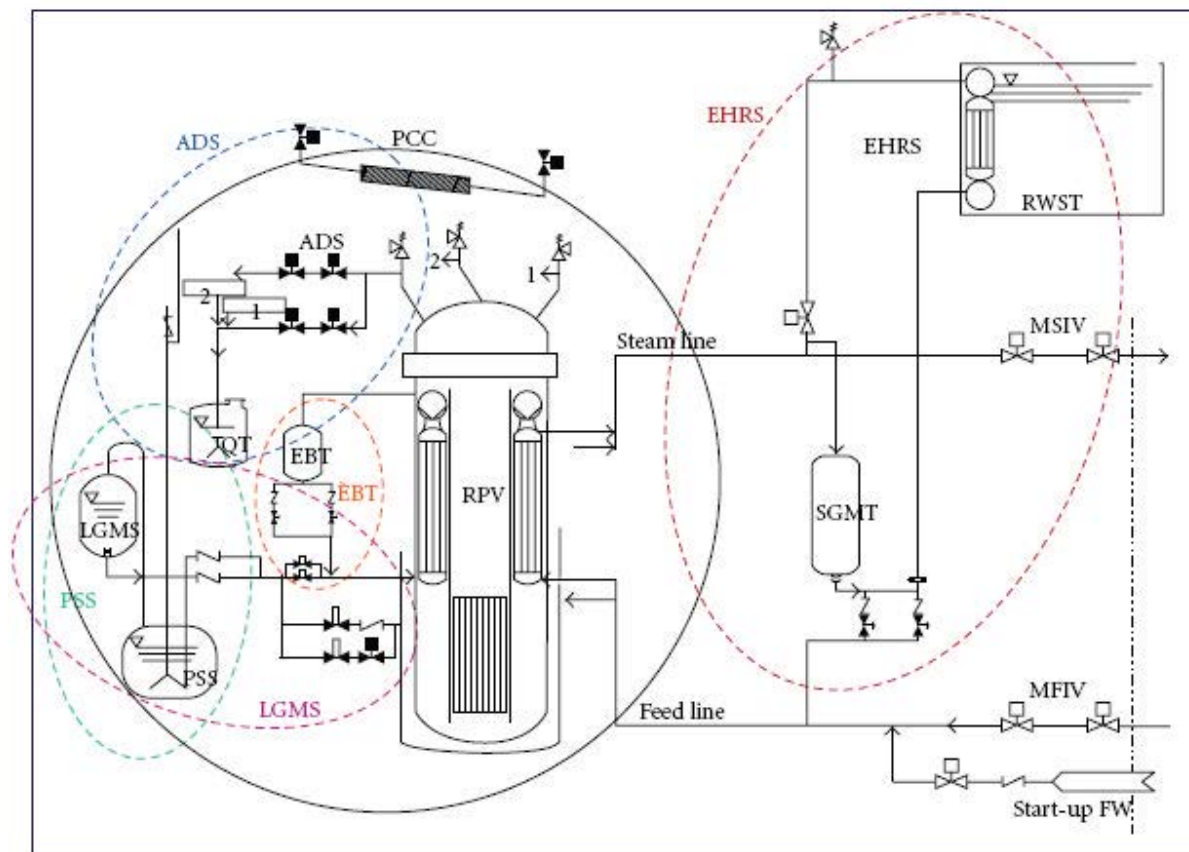


Figura 1-3: Schema del contenimento e dei sistemi di sicurezza tipici del reattore IRIS.

Il PSS é composto da due serbatoi pieni di acqua, ed un ulteriore serbatoio comune, per

immagazzinare i gas incondensabili. Ogni serbatoio è connesso al CV tramite una condotta che ha nell'estremità inferiore uno "sparger" sommerso. Il PSS limita il picco di pressione massimo del contenimento in situazioni incidentali. Il PSS provvede anche ad un'eventuale iniezione d'acqua all'interno del RPV in caso di LOCA tramite le DVI, sia direttamente, che tramite i sistemi LGMS.

Nel progetto di IRIS sono considerate due "full-system pressure" EBT che iniettano acqua borata nel RPV attraverso le linee DVI in situazioni incidentali. Essi sono collegati nella parte superiore al RPV e nella parte inferiore alla linea DVI.

IRIS è provvisto di quattro sottosistemi indipendenti di rimozione d'emergenza del calore (EHRS) di tipo passivo, ognuno dei quali ha uno scambiatore di calore immerso nell'acqua del RWST collocata all'esterno della struttura di contenimento. Nel sistema EHRS il vapore è prelevato dalla SL prima della MSIV ed attraversa gli scambiatori di calore posti nel RWST; da qui il fluido viene immesso nella linea di alimento, poco prima della MFIV. Un singolo EHRS è dimensionato per sopperire da solo alla rimozione del calore di decadimento. Essi funzionano in circolazione naturale. Gli EHRS hanno il compito di attuare sia la principale depressurizzazione post-LOCA (depressurizzazione senza perdita di massa) del sistema primario che le normali funzioni di raffreddamento del core. L'EHRS interviene in condizioni di reattore isolato.

I sistemi ADS assistono gli EHRS nella depressurizzazione del RPV. Essi sono posti nella parte superiore del PRZ ed hanno il compito di mantenere uguali le pressioni del RPV e del contenimento limitando la perdita di refrigerante e prevenendo così gli effetti seguenti dovuti ad un incidente LOCA. Vari "treni" ADS che agiscono sia ad alta pressione (*Stage I*) che a bassa pressione (*Stage II*) sono considerati. Ogni ADS consiste di due linee parallele da 4 pollici ognuna con due valvole normalmente chiuse. In caso di necessità uno di questi ADS ad alta pressione scarica vapore in una QT, anche durante le normali funzioni operative.

## **1-2 APPROCCIO "SAFETY-BY-DESIGN" IN IRIS**

Il progetto integrato dell'impianto permette di evitare componenti in pressione esterni al RPV, riducendo il numero e le dimensioni di eventuali penetrazioni nel RPV. Ciò elimina in sede di progetto la possibilità che si verifichino "large break LOCA" e si riduce nel contempo il numero di possibili eventi iniziatori di "small break LOCA". Sistemi passivi sono considerati nel suo progetto per la mitigazione di eventuali sequenze incidentali.

Di seguito, in Fig. 1-4, è mostrata una tipica sequenza incidentale dovuta ad un evento di SBLOCA per il reattore IRIS. I principali fenomeni che si destano nel reattore IRIS durante un SBLOCA, sono:

1. il "blowdown", della durata di circa 2100 secondi (nel caso DVI line break);

2. la depressurizzazione del RPV/CV della durata superiore alle 12 ore;
3. il long-term cooling tipico del reattore IRIS, della durata di oltre le 12 ore.

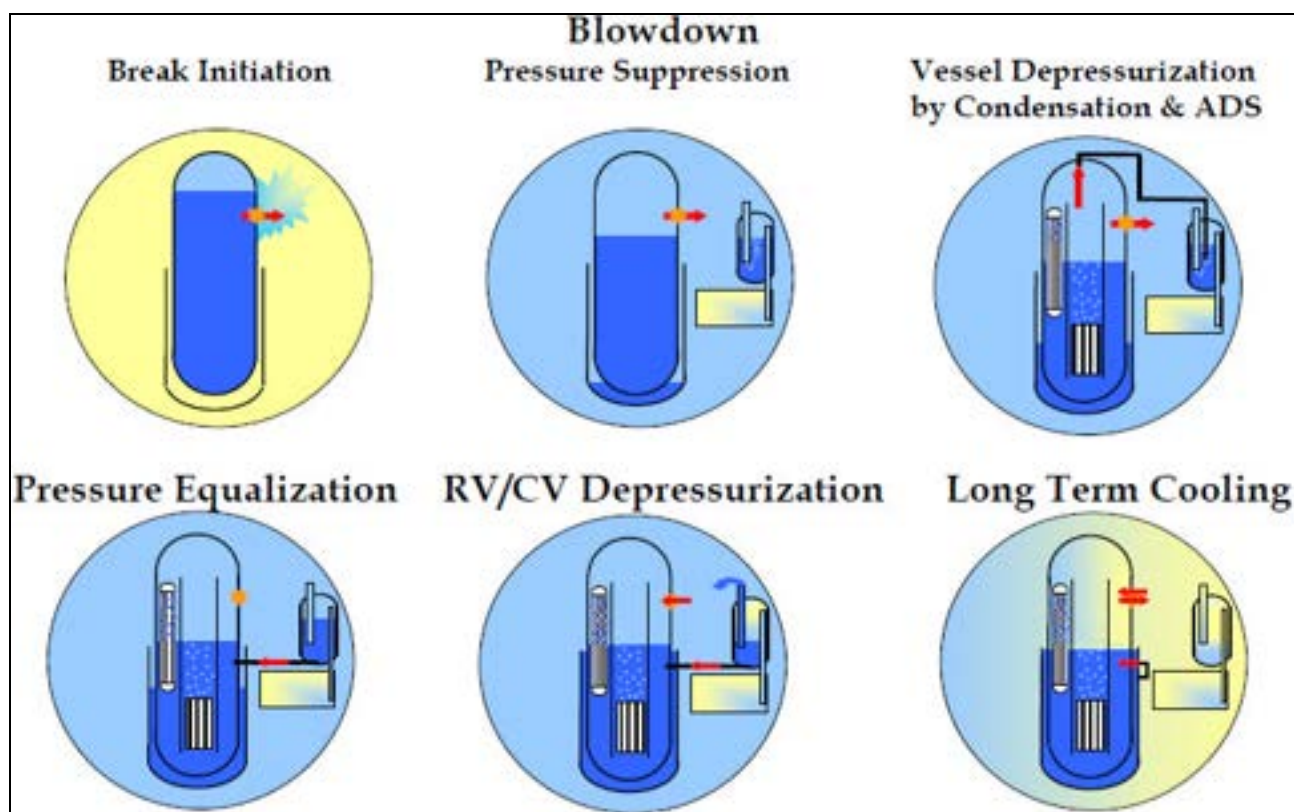


Figura 1-4: Schema della sequenza incidentale dovuta a un SBLOCA per il reattore IRIS.

Dopo un evento del tipo SBLOCA si desta una depressurizzazione del sistema primario. Parte dell'inventario primario viene immesso nel contenimento causando l'innalzamento della sua pressione. Il trip del reattore e della pompa si desta; gli EBT forniscono dunque acqua borata al sistema primario e gli EHRS, dopo la loro attuazione, forniscono una depressurizzazione del sistema primario rimuovendone l'energia.

I sistemi ADS sono attuati per assistere gli EHRS nella depressurizzazione del RPV, ma mentre l'EHRS depressurizza il sistema primario senza perdita di massa, se interviene l'ADS, attua la stessa funzione con perdita di massa.

L'aumento di pressione nel contenimento è limitato dal PSS mentre la portata del break si riduce per la rimozione del calore da parte degli EHRS. La fase di svuotamento del sistema primario termina quando la pressione del RPV uguaglia quella del CV.

Il sistema accoppiato RPV/CV è depressurizzato dagli EHRS. In questa fase la portata al break si inverte perché il calore non è rimosso dal contenimento ma direttamente dall'interno del vessel, creandone un aumento del livello. Quando il vapore, proveniente dal contenimento, condensa all'interno del vessel e quando la pressione del contenimento si riduce, una certa quantità

d'acqua, proveniente dalla piscina a soppressione, entra nel contenimento attraverso le “vent lines” e contribuisce a refrigerare la cavità del vessel.

La fase di depressurizzazione è seguita dalla fase di raffreddamento a lungo termine, dove la pressione del RPV e quella del CV si riducono lentamente così come diminuisce il calore di decadimento del core. Durante questa fase, la quantità d'acqua borata proveniente dalle piscine e dalla cavità del RPV è ancora disponibile come previsto.

# **CAPITOLO 2**

## *BREVE DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO*

### *SPERIMENTALE SPES-3*

#### **2-1 GENERALITÀ**

Le campagne sperimentali previste nell'impianto sperimentale SPES-3 mirano a:

- caratterizzare i fenomeni termoidraulici del reattore IRIS, il comportamento dei sistemi di sicurezza passivi e le interazioni tra il RPV ed il contenimento in transitori seguenti a postulati eventi incidentali (SBLOCA, rottura della SL e della FW);
- produrre dati sperimentali utili per la validazione di codici termoidraulici.

Una prima identificazione dei fenomeni in esame ed un'attenta analisi dei componenti

interessati, hanno condotto all'identificazione dei principali parametri di "scaling" di SPES-3, che risultano di 1:100 per il volume e di 1:1 per le quote. Le condizioni termodinamiche del fluido, la potenza per unità di massa, il flusso termico e le cadute di pressione sono conservati nel processo di scaling; la potenza per unità di volume, sia durante lo stato stazionario che durante la parte iniziale dei transitori, non è conservata. Infatti, tenendo conto di dover mantenere il parametro di scaling di 1:100 per la potenza, le barre scaldanti di SPES-3 dovrebbero erogare fino a 10 MW, essendo la potenza nominale di IRIS pari a 1000 MWt; la potenza elettrica per adesso disponibile presso i laboratori della SIET è al massimo di 6.5 MW.

La Tabella 2-1 mostra schematicamente un confronto fra alcune caratteristiche di IRIS e di SPES-3.

Tabella 2-1: Confronto tra alcune caratteristiche di IRIS e di SPES-3.

Sistema/Componente	IRIS	SPES-3
Lato primario del RPV	Si	Si tranne le pompe
Pompe	8	1
Potenza del core (MW)	1000	6.5
EBT	2	2
SG	8	3
Circuiti secondari	4	3
Tubi degli SG	626	13, 13, 26
Altezza degli SG (m)	8.2	8.2
Lunghezza media di una tubazione dello SG (m)	32	32
Sistema di contenimento	Si	Si
EHR	4	3
RWST	2	2
Dry Well	1	1
PSS	2	2
LGMS	2	2
QT	1	1
Treni ADS	3	2

## 2-2 L'IMPIANTO SPERIMENTALE SPES-3

SPES-3, come mostrato nella Fig. 2-1 e 2-2, simula il circuito primario, il circuito

secondario, il contenimento e i sistemi passivi del reattore IRIS.

Il sistema primario include il RPV ed i suoi componenti interni quali il core, il LR, il RCCA, l'UR, il PRZ, il DC superiore nella zona dello SG, le check valve per collegare il riser al DC, il DC inferiore, il LP, il "core bypass", la pompa di circolazione ed una porzione delle linee DVI. Una singola pompa esterna simula le otto pompe interne di IRIS.

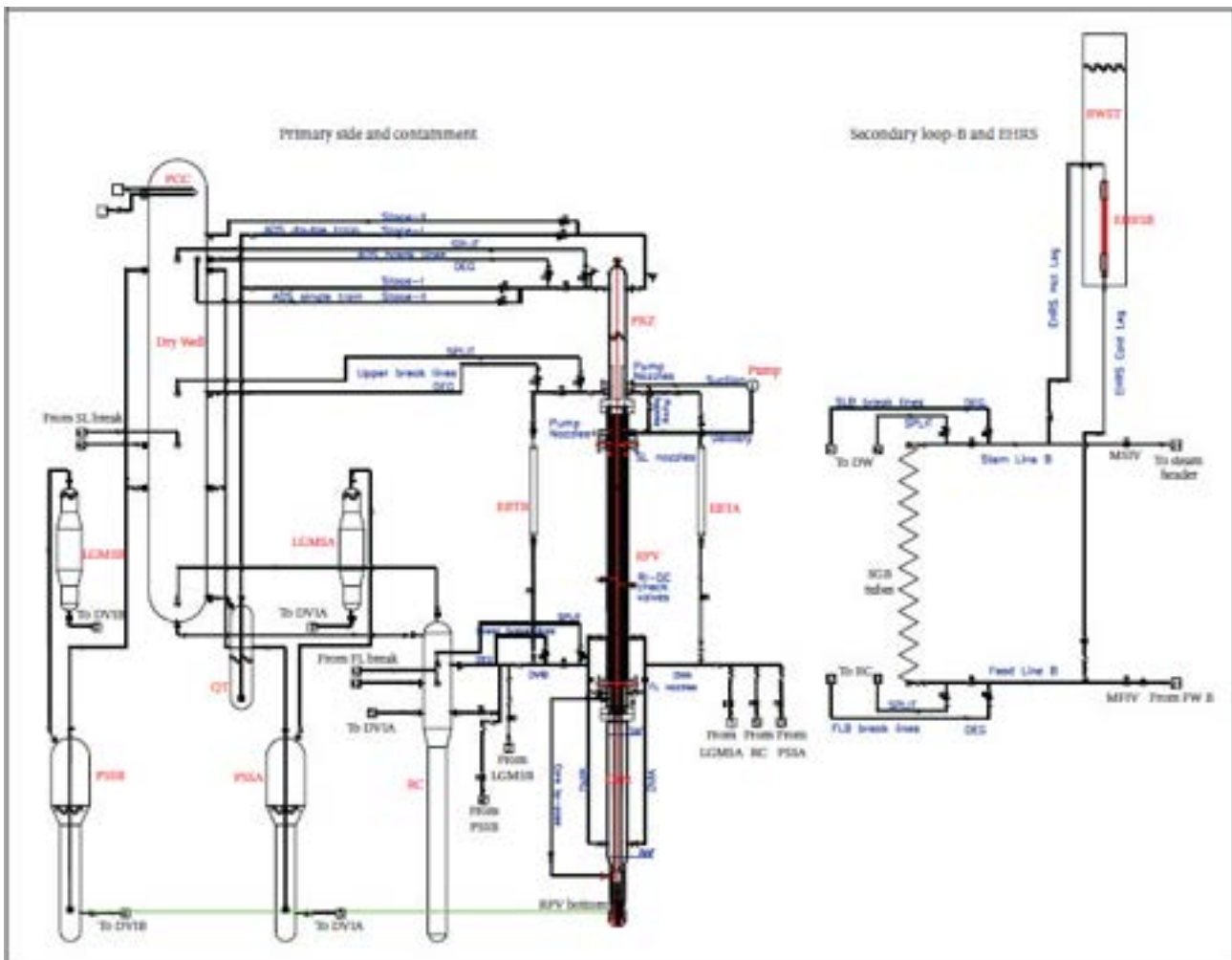


Figure 2-1: Schema generale dell'impianto sperimentale SPES-3.

Nell'impianto IRIS, gli RCCA sono alloggiati nel LR ed i CRDM nell'UR. In SPES-3, gli RCCA ed i CRDM sono simulati solo al fine di tenere conto del volume occupato e delle rispettive cadute di pressione. Essi sono simulati da "pipes" e da griglie.

Il PRZ di IRIS è simulato nell'impianto sperimentale ed è stata riprodotta la sua forma a "cappello rovesciato", mantenendone la lunghezza e la quota. Differentemente da IRIS, i riscaldatori elettrici cilindrici presenti nel PRZ sono verticali con una potenza nominale di 27 kW, opportuna per compensare le perdite termiche durante lo stazionario e mantenere la pressione di riferimento. La connessione al riser è realizzata mediante un "surge hole".

Tutte le pompe nell'impianto IRIS sono simulate in SPES-3 da una singola pompa esterna.

Tre sistemi secondari simulano i quattro circuiti di IRIS. Essi includono le SL e le FL, fino alla MSIV ed alla MFIV, e tre SG, con avvolgimenti elicoidali, che simulano gli otto SG presenti in IRIS. Gli SG A e B simulano ognuno due SG di IRIS, mentre lo SG C ne simula quattro. Gli SG A e B hanno un solo fascio tubiero elicoidale, lo SG C ne simula due, chiamati C1 e C2, per un totale di quattro fasci tubieri elicoidali. I quattro fasci di tubi elicoidali sono avvolti intorno ad un riser cilindrico e disposti in maniera concentrica l'uno rispetto all'altro. Un barrel cilindrico separa il fascio interno A da quello intermedio B ed un altro barrel separa il fascio intermedio B dai due fasci esterni C1 e C2.

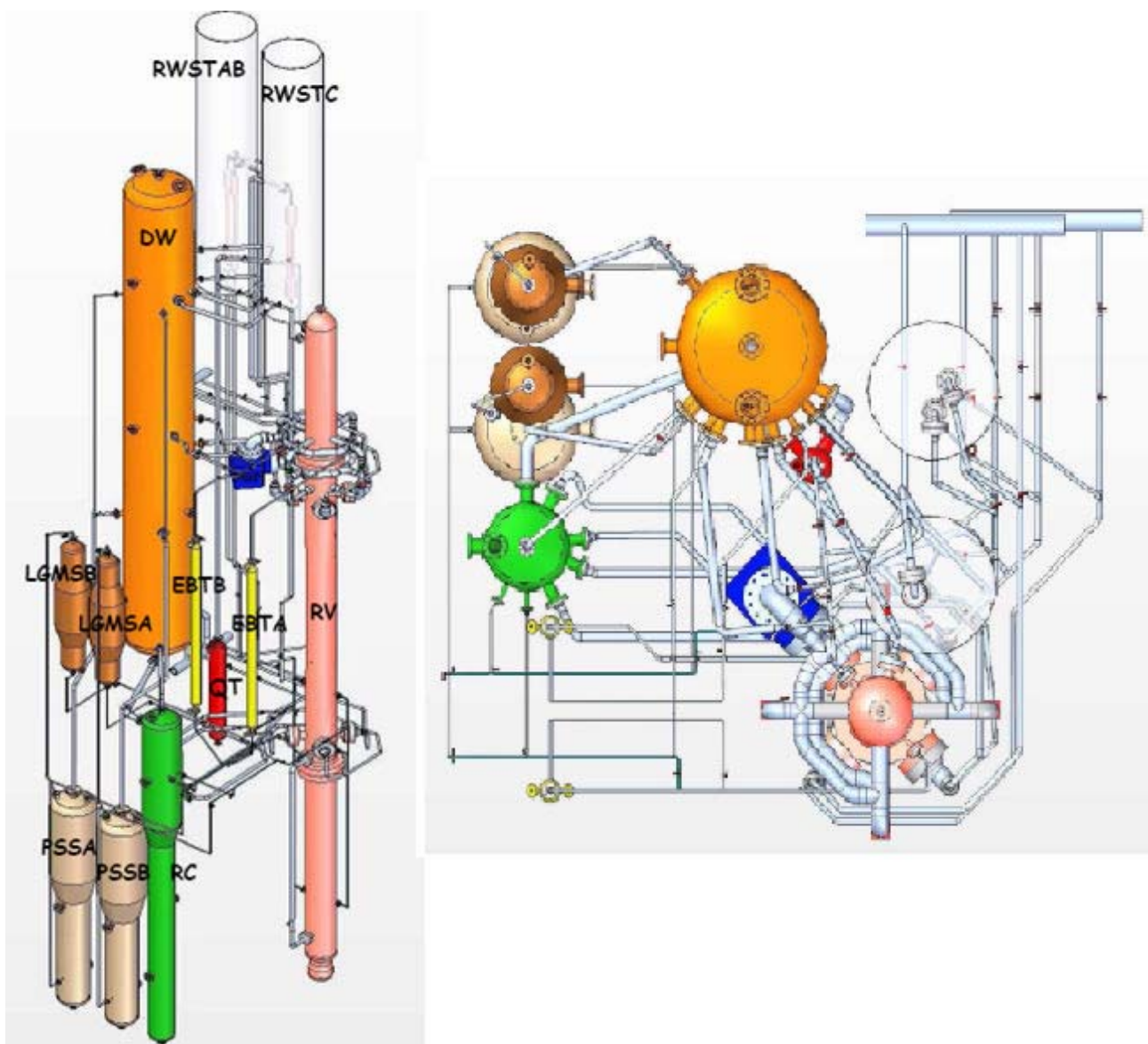


Figura 2-2: Vista principale e vista dall'alto dell'impianto sperimentale SPES-3.

Come già accennato il circuito secondario in SPES-3 consiste di 3 loop che simulano i

quattro di IRIS. Sono simulati il lato secondario di ogni SG, gli EHRS, le RWST, le FL fino alla MFIV e le SL fino alla MSIV. Ogni SG è connesso, tramite le SL, al rispettivo EHRS, che a sua volta è immerso nella RWST. In questo modo è permessa la rimozione del calore generato nel RPV che viene dunque trasferito nel loop di condensa e scarico. A questo punto il vapore condensato nella RWST, ritorna al circuito tramite la FL.

Nell'impianto sperimentale SPES-3, gli EHRS, connessi a ciascun loop, sono simulati con componenti di 3 tubi che rappresentano i due loop da 2/8 (EHRS A/B), e con componenti di 5 tubi che rappresentano il loop da 4/8 (EHRS-C). I collettori superiori ed inferiori sono simulati da opportune condotte verticali cilindriche per mantenere la corretta quota ed il volume scalato. SPES-3 ha due piscine identiche a base circolare, le RWST. Gli EHRS-A ed EHRS-B simulano due singoli circuiti che però sono collegati ad un'unica RWST-A/B. L'EHRS connesso al circuito C, che ricordiamo simula un doppio circuito, simula due EHRS ed è collegato al RWST-C.

Il volume dell'acqua presente nelle piscine è opportunamente scalato ed è di circa  $12 \text{ m}^3$ , mentre è mantenuta invariata la quota. In particolare, la parte inferiore del RWST è posizionata 4.277 m sopra la linea centrale del bocchello della SL. Al fine di mantenere gli EHRS sempre coperti per una settimana, considerando una diminuzione del livello dell'acqua di circa 0.5 m al giorno, è richiesto un livello nominale della piscina di circa 9 m.

Il sistema di contenimento è simulato da serbatoi opportunamente connessi fra di loro. Esso include il DW, una QT, il RC, due PSS, due LGMS, il PCC ed una porzione delle linee DVI. I serbatoi appartenenti al sistema contenimento sono connessi da tubazioni. In particolare le due EBT sono modellate separate e ognuna è connessa con la sua DVI.

In SPES-3, due treni ADS simulano i tre di IRIS: un singolo treno ADS ne simula due e l'altro ne simula uno. Ognuno dei tre treni del reattore IRIS consiste di due stadi: stadio I e stadio II. Lo stadio I, ad alta pressione, è una condotta da 4 pollici che termina all'interno della QT, mentre lo stadio II, a bassa pressione, è una condotta da 6 pollici che termina all'interno del DW. La linea che termina nella QT presenta alla sua estremità uno sparger.

# CAPITOLO 3

## *CENNI SUL CODICE TRACE*

### **3-1 INTRODUZIONE SUI CODICI DI SISTEMA**

Il primo codice utilizzato negli Stati Uniti, per le analisi di sicurezza nucleare, fu sviluppato da Westinghouse-Bettis, ed era basato su un approccio “node and branch” in cui in ogni nodo, che rappresentava un “control volume”, venivano applicate e risolte le equazioni di conservazione della massa e dell’energia per un fluido monofase, mentre nelle linee di connessione venivano applicate e risolte le equazioni di conservazione della quantità di moto considerando le resistenze della linea. Questo codice venne chiamato FLASH. La figura 3-1 mostra lo schema concettuale alla base di tale codice. 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.

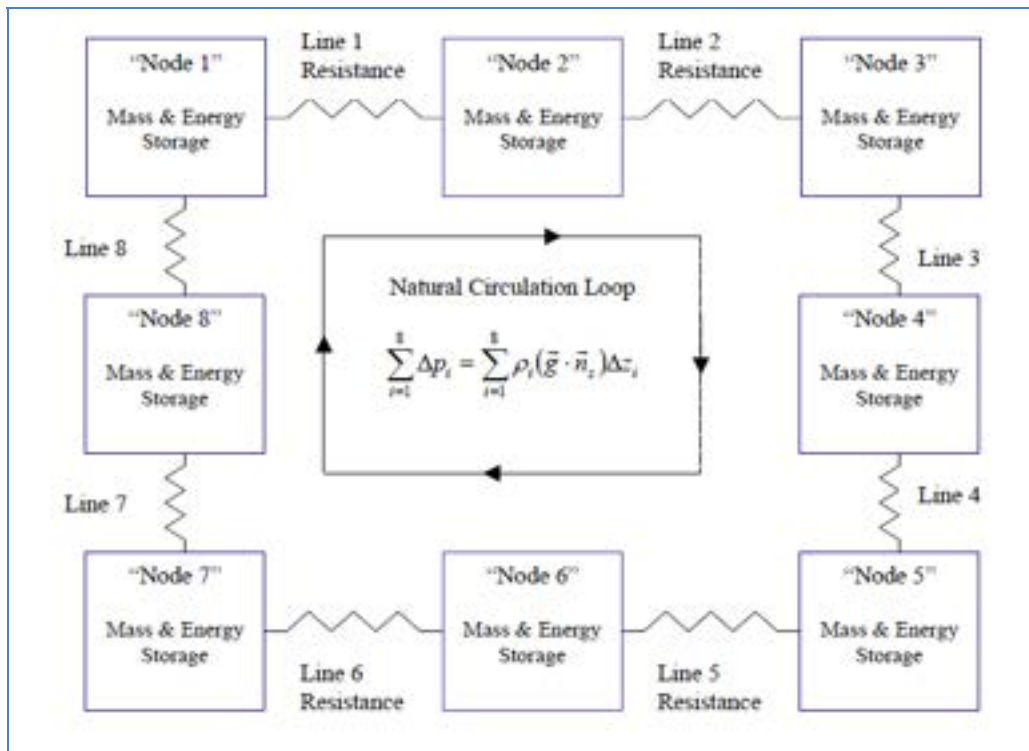


Figura 3-1: Schema concettuale alla base del codice FLASH.

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.

### 3.2 IL CODICE TRACE

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 è un codice a volumi finiti, a due fluidi con capacità di simulazione tridimensionali. La tabella 3-1 riporta i componenti utilizzati nel codice TRACE. Si sottolinea la presenza di un componente chiamato vessel, figura 3-2, che

permette, in particolare, un'analisi tridimensionale del core del reattore.

Tabella 3-1: Componenti utilizzati nel codice TRACE.

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.
--------	---

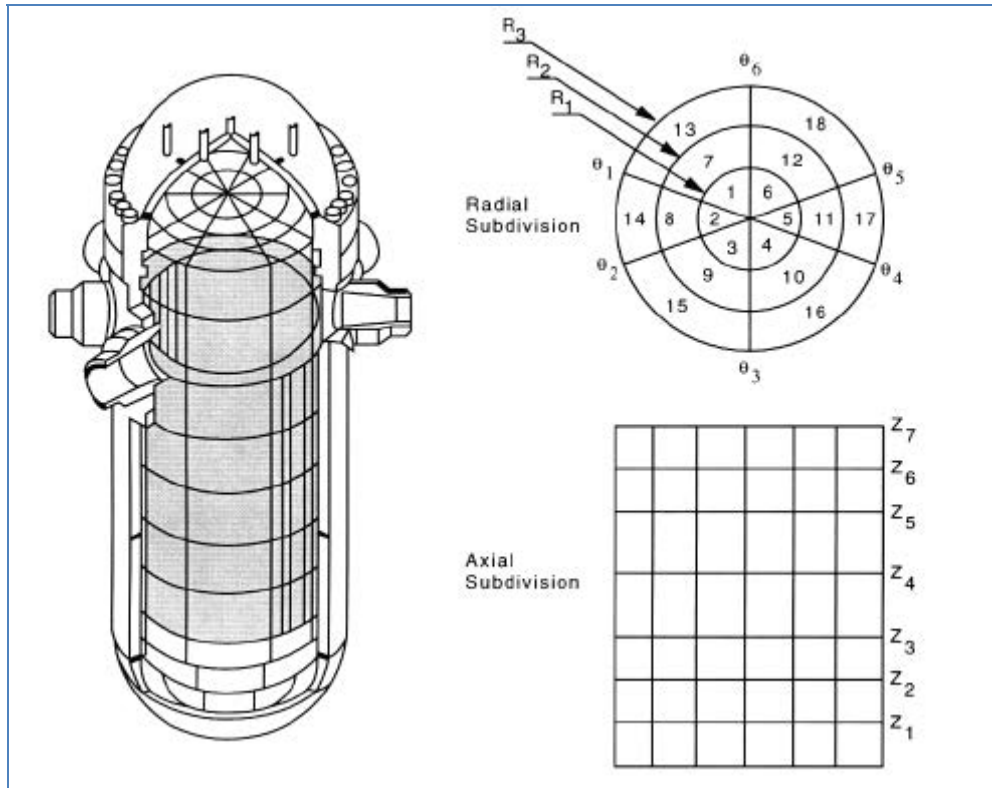


Figura 3-2: Suddivisione assiale, radiale e azimutale del componente vessel implementato nel codice TRACE.

Le equazioni alla base del codice TRACE – equazione di conservazione della massa, della quantità di moto, dell’energia per la fase liquida e quella vapore- sono riportate di seguito:

- equazione di conservazione della massa della miscela

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho_v \alpha + (1-\alpha)\rho_l) + \nabla \cdot (\rho_v \bar{v}_v \alpha + \rho_l \bar{v}_l (1-\alpha)) = 0$$

- equazione di conservazione della massa del vapore

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho_v \alpha) + \nabla \cdot (\rho_v \bar{v}_v \alpha) = \Gamma_v$$

- equazione di conservazione della quantità di moto del liquido

$$\frac{\delta \bar{v}_l}{\delta t} + \bar{v}_l \cdot \nabla \bar{v}_l = -\frac{1}{\rho_l} \nabla p + \frac{c_l}{(1-\alpha)\rho_l} (\bar{v}_v - \bar{v}_l) |\bar{v}_v - \bar{v}_l| - \frac{\Gamma_{Cond}}{(1-\alpha)\rho_l} (\bar{v}_v - \bar{v}_l) + \frac{c_w}{(1-\alpha)\rho_l} \bar{v}_l |\bar{v}_l| + \bar{g}$$

- equazione di conservazione della quantità di moto del gas

$$\frac{\delta \bar{v}_v}{\delta t} + \bar{v}_v \cdot \nabla \bar{v}_v = -\frac{1}{\rho_v} \nabla p + \frac{c_l}{\alpha \rho_v} (\bar{v}_v - \bar{v}_l) |\bar{v}_v - \bar{v}_l| - \frac{\Gamma_{Boiling}}{\alpha \rho_v} (\bar{v}_v - \bar{v}_l) + \frac{c_{wv}}{\alpha \rho_v} \bar{v}_v |\bar{v}_v| + \bar{g}$$

- equazione di conservazione dell'energia della miscela

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho_v \alpha e_v + e_l (1-\alpha) \rho_l) + \nabla \cdot (\rho_v \bar{v}_v \alpha e_v + \rho_l \bar{v}_l e_l (1-\alpha)) = -p \nabla \cdot (\bar{v}_v \alpha + \bar{v}_l (1-\alpha)) + q_{wl} + q_{dlv}$$

- equazione di conservazione dell'energia del vapore

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho_v \alpha e_v) + \nabla \cdot (\rho_v \bar{v}_v \alpha e_v) = -p \frac{\delta \alpha}{\delta t} - p \nabla \cdot (\bar{v}_v \alpha) + q_{wl} + q_{dv} + q_{rv} + \Gamma_v h_v$$

A questo insieme di equazioni se ne aggiungono altre al fine di caratterizzare il comportamento di gas incondensabili, del boro disciolto, dei sistemi di controllo e della potenza nel core. Per ragioni di chiusura, queste equazioni vengono accoppiate con altre relazioni (wall drag, interfacial drag, wall heat transfer, interfacial heat transfer, equation of state, static flow regime maps).

La figura 3-3 e la tabella 3-2 mostrano i file generati durante una simulazione del codice TRACE V5 e le azioni necessarie per realizzare un eventuale calcolo di restart. APTPLOT o ACGRACE sono gli strumenti grafici necessari per produrre grafici bidimensionali.

Il codice TRACE può essere usato insieme al codice PARCS al fine di produrre analisi accoppiate termoidrauliche e cinetiche neutroniche tridimensionali.

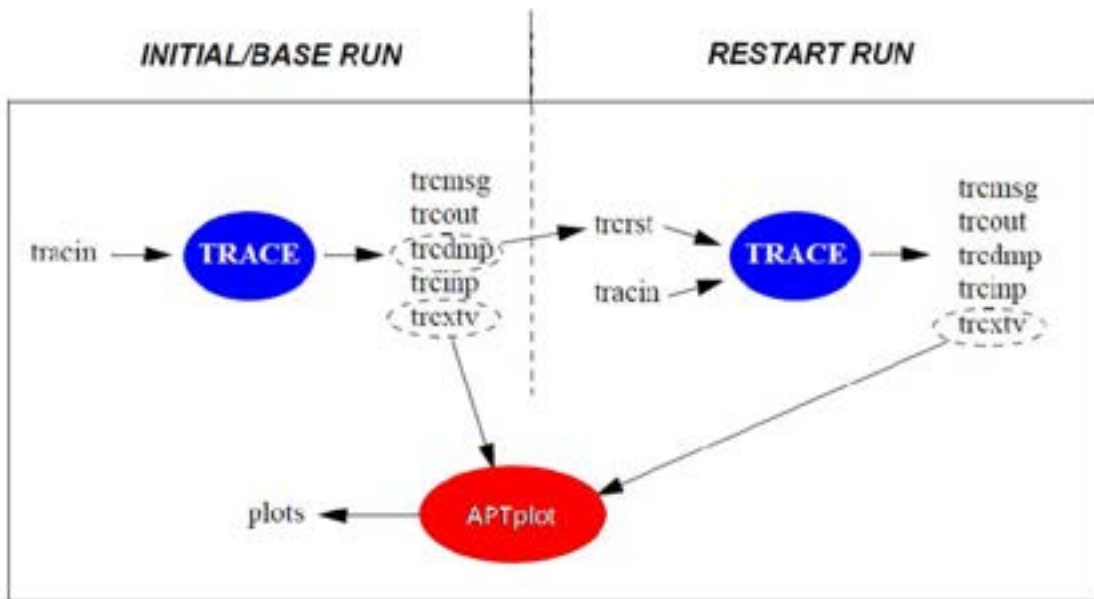


Figura 3-3: File di input e output generati durante una simulazione (base run o restart run) del codice TRACE V5.

Tabella 3-2: File di input/output del codice TRACE V5.

Default Naming Convention	Prefix Naming Convention	Comment
tracin	test.inp	Input file. Required
trcrst	test.rst	Restart dump file. Required for restart
tremsg	test.msg	Standard Messages Output
treout	test.out	Standard Edit Output
tredmp	test.dmp	Standard Dump Output
trextv	test.xtv	Standard Graphics Output
treinp	test.echo	Standard echo of stripped down input with line numbers

### 3.3 UTILIZZO DEL CODICE TRACE TRAMITE SNAP

Il codice TRACE può essere usato tramite il Symbolic Nuclear Analysis Package (SNAP), che è una interfaccia grafica tale da assistere l'utilizzatore del codice nello sviluppo e nella visualizzazione dell'inputdeck e nella visualizzazione di scelti dati, ottenuti a fronte di simulazioni, tramite delle "animation model". Una delle capacità di SNAP è quella di convertire input RELAP5 in input TRACE. L'architettura TRACE/SNAP è mostrata nella figura 3-4.

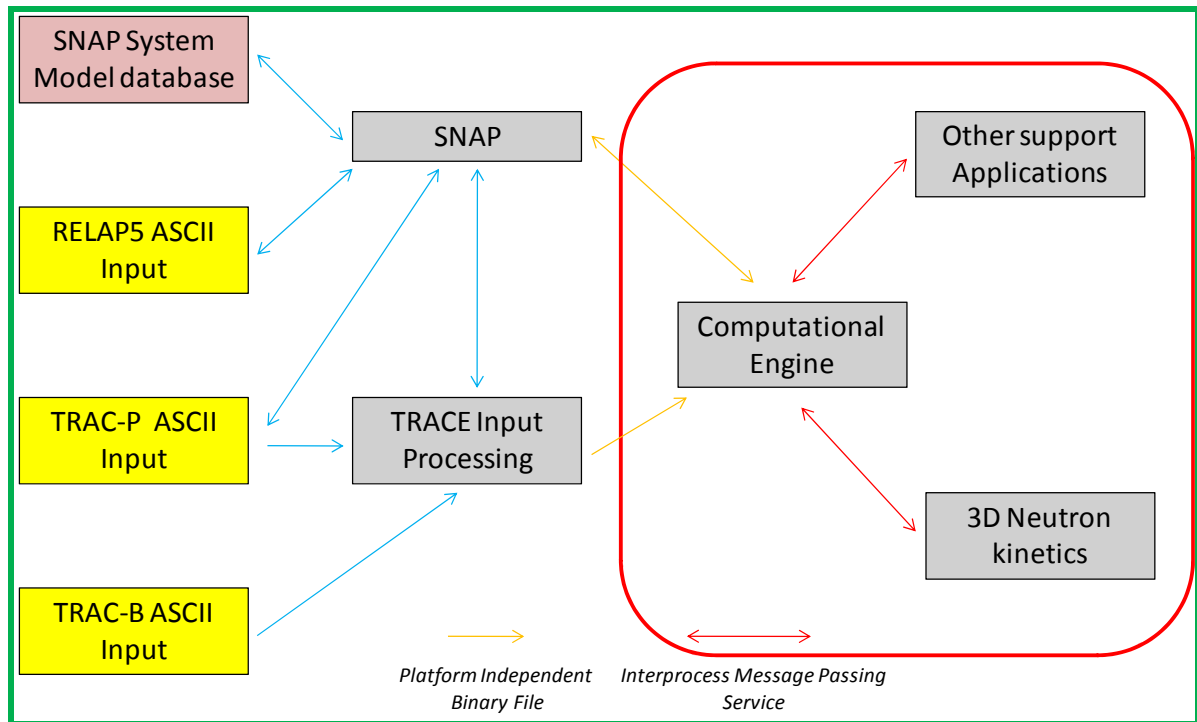


Figura 3-4: Architettura TRACE/SNAP.

Il pacchetto applicativo SNAP include differenti “applications” quali il “Model editor”, “Job Status”, “Configuration Tool” e un “Calculation Server”.

Il “Model Editor” è utilizzato dall’eventuale user per lo sviluppo e visualizzazione dell’inputdeck, per i codici ad oggi supportati (CONTAIN, COBRA, FRAPCON, MELCOR, PARCS, RELAP5, TRACE), e per la visualizzazione di selezionati dati prodotti dalle simulazioni. La figura 3-5 mostra un esempio di visualizzazione di inputdeck. La figura 3-6 mostra un esempio della divisione in celle assiali, radiali e azimutali del componente vessel.

Il “Configuratioun Tool”, figura 3-7, viene utilizzato per configurare le proprietà dei vari “client application” e rendere operativo o interrompere il “Calculation Server”. Il “Job Status”, figura 3-8, è utilizzato per visualizzare lo stato delle simulazioni in esecuzione.

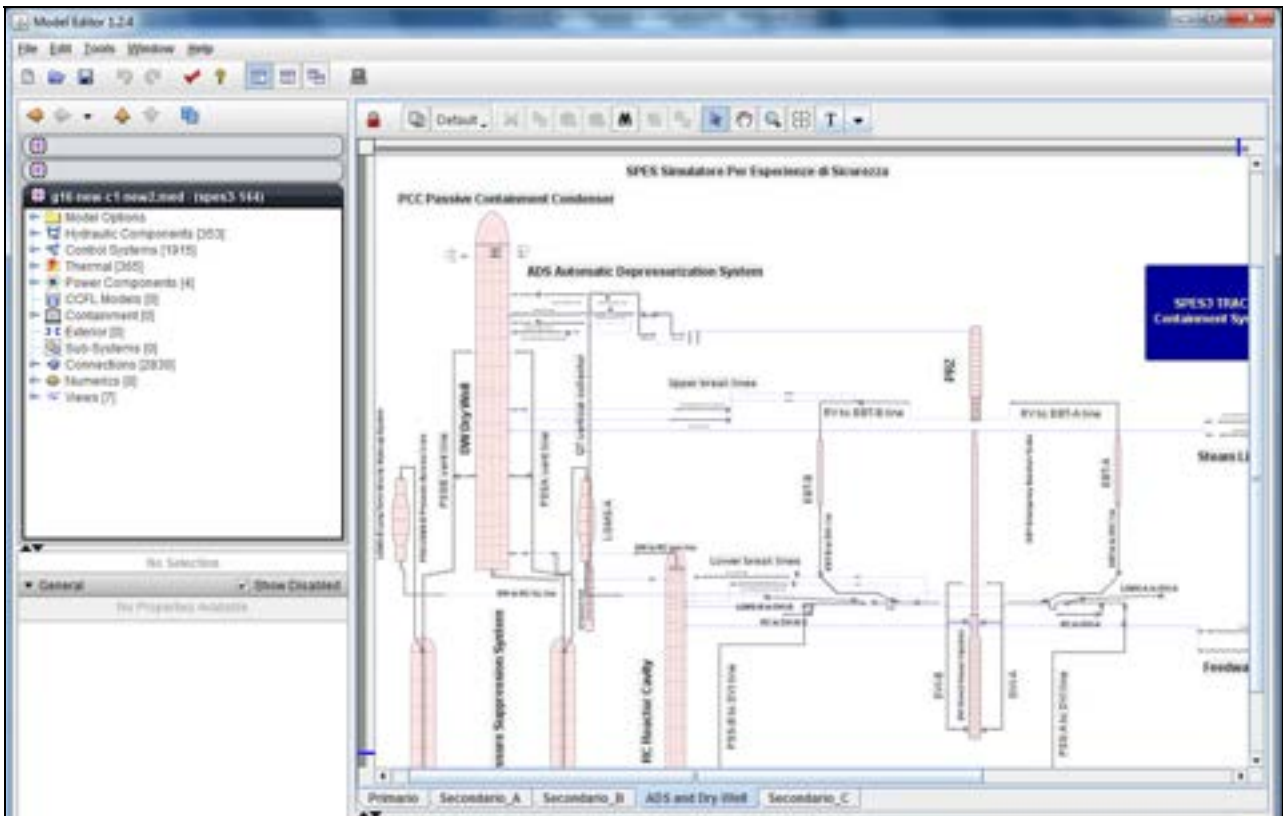


Figura 3-5: Tipica visualizzazione SNAP di un input TRACE.

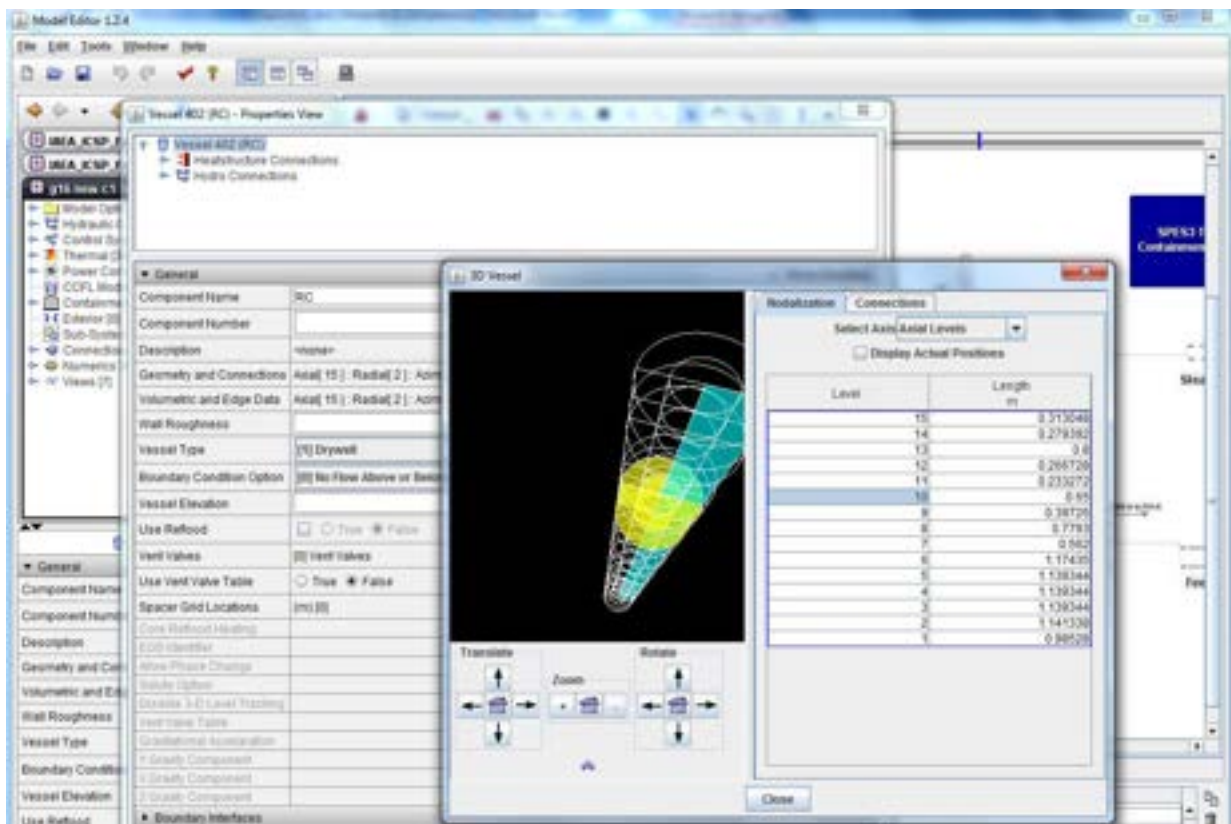


Figura 3-6: Tipica visualizzazione SNAP del componente 3D vessel.

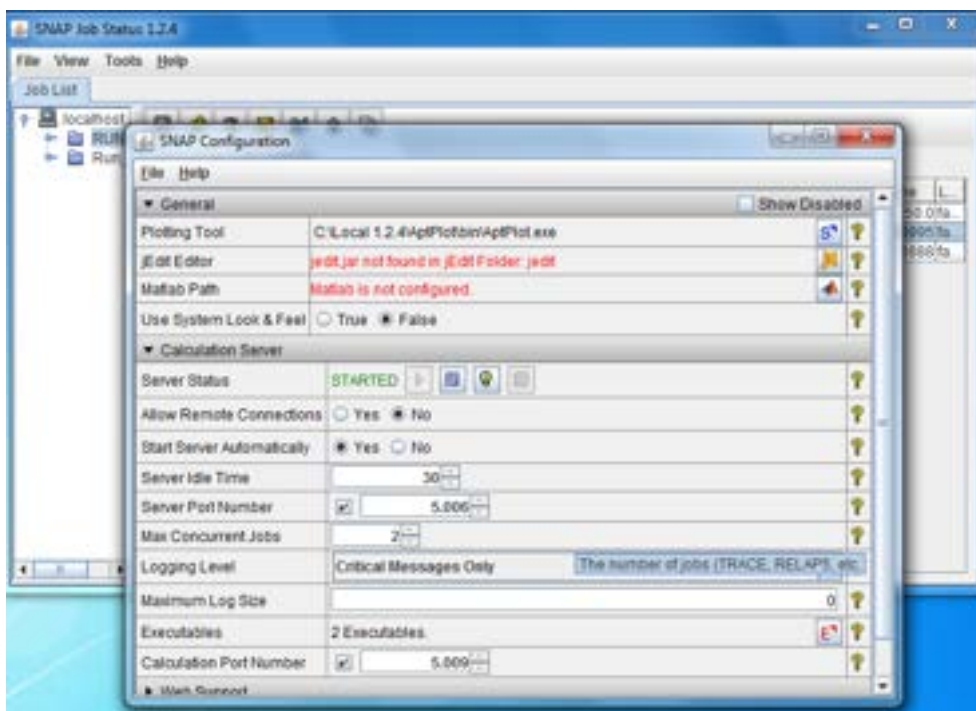


Figura 3-7: Tipica visualizzazione del “Configuration Tool” nel pacchetto applicativo SNAP.

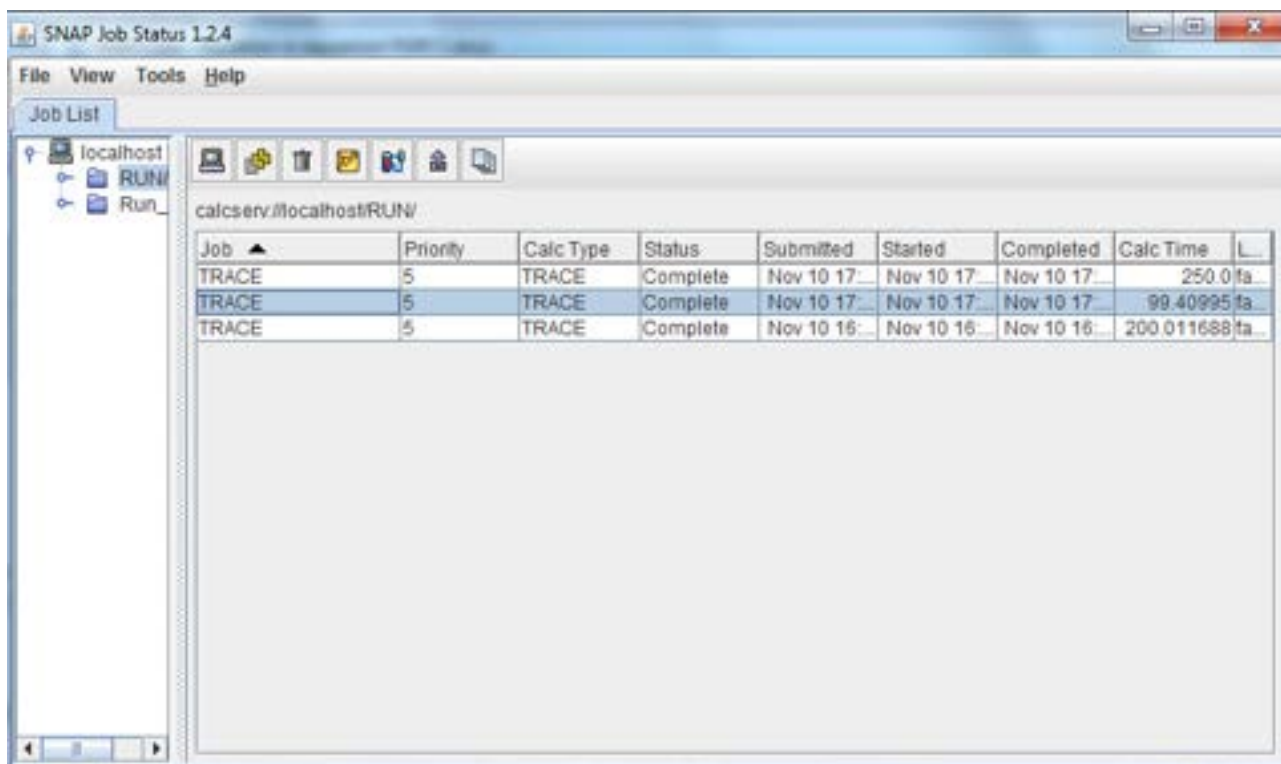


Figura 3-8: Tipica visualizzazione del “Job Status” nel pacchetto applicativo SNAP.

# CAPITOLO 4

## *MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO*

### *SPERIMENTALE SPES-3*

#### **4-1 BREVE DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DI SPES 3**

La nodalizzazione TRACE dell'impianto SPES-3, figure 4-1a e 4-1b, è stata sviluppata e messa a punto presso il Dipartimento dell'Energia dell'Università degli Studi di Palermo al fine di condurre analisi di eventuale supporto al progetto dell'impianto sperimentale SPES-3 e, dopo la costruzione dello stesso, calcoli di pre-test, per contribuire al progetto termoidraulico dei test di interesse, e calcoli di post-test, con lo scopo di validare il codice stesso. In particolare essa simula il circuito primario, il circuito secondario ed il contenimento dell'impianto sperimentale SPES-3.

Il sistema primario, figura 4-2, modella il RPV ed i suoi componenti interni quali il core, il LR, il RCCA, l'UR, il PRZ, il DC superiore nella zona dello SG, le check valve per collegare il riser al DC, il DC inferiore, il LP, il "core bypass", la pompa di circolazione ed una porzione delle linee DVI. Il core bypass è simulato da una condotta parallela al core che unisce il LP al LR, sopra la flangia di unione del RPV. Il riser in IRIS consiste di due parti: la parte inferiore, che contiene

l'RCCA, e la parte superiore che contiene il CRDM. In SPES-3 questi componenti sono simulati semplicemente con condotte e piastre perforate.

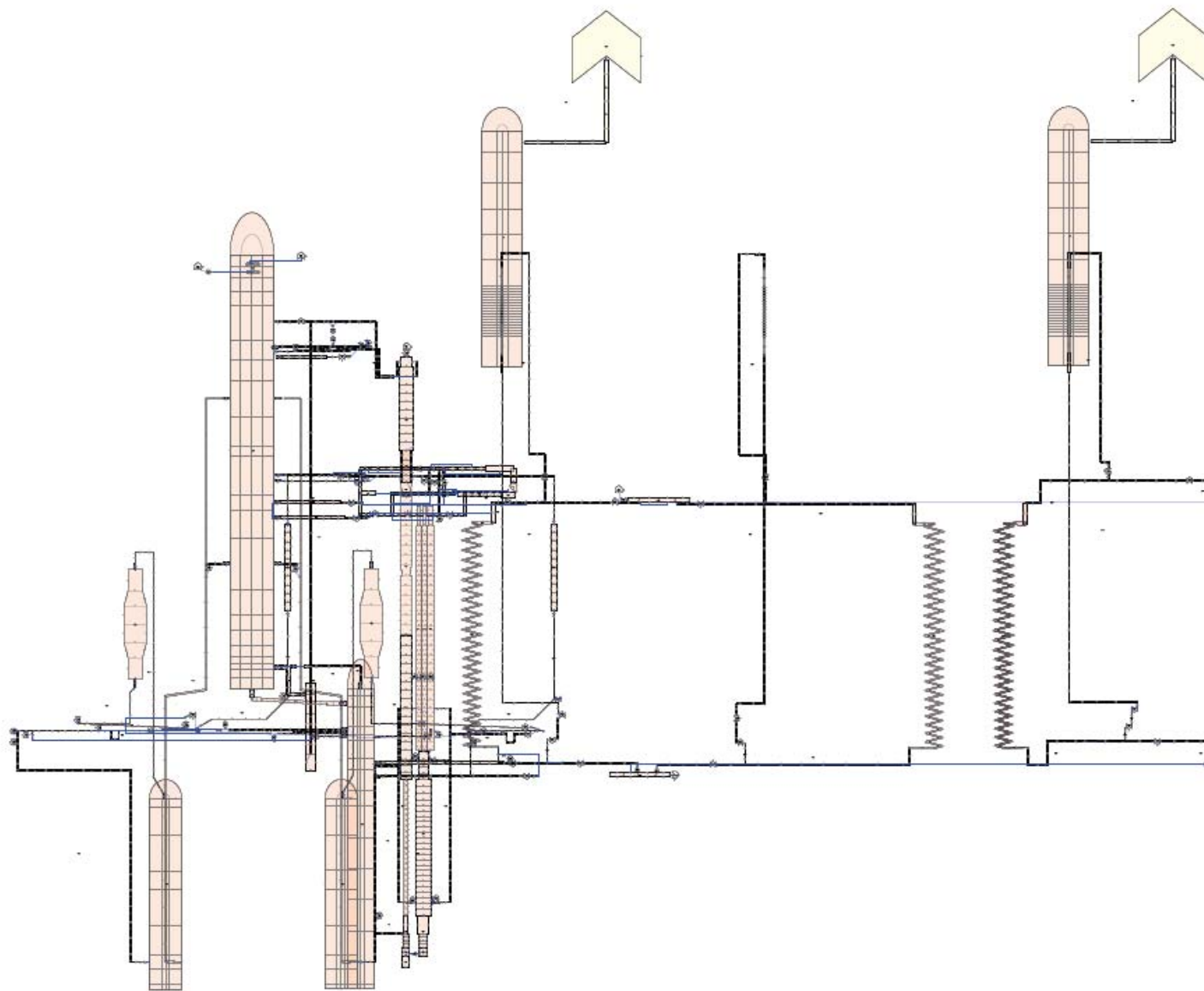


Fig. 4-1a. Vista generale della nodalizzazione TRACE di SPES-3.

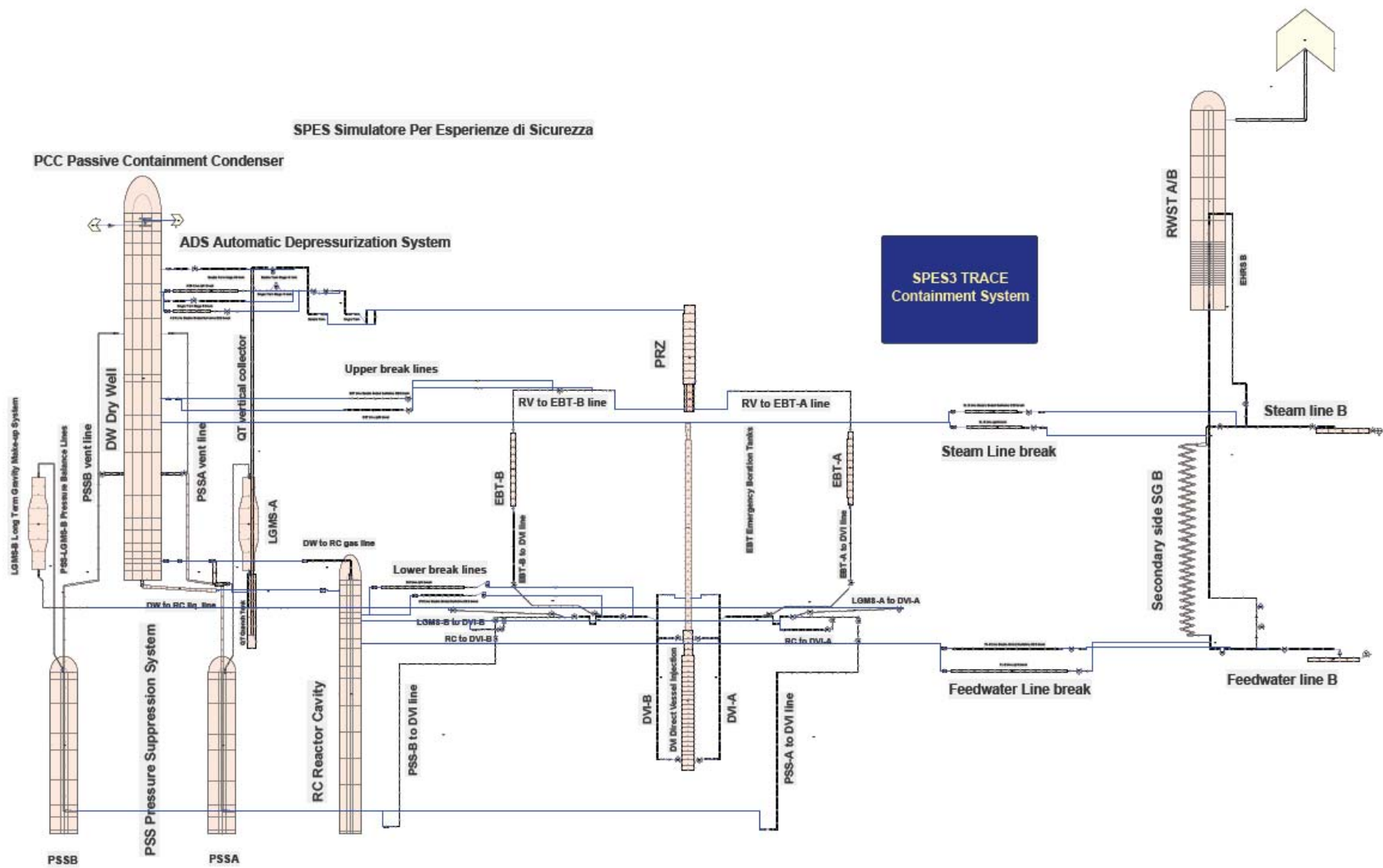


Fig. 4-1b. Vista generale della nodalizzazione TRACE dei componenti del sistema di contenimento di SPES-3.

Il modello TRACE simula le due parti di SPES-3 con due elementi di geometria cilindrica, tra loro collegati. Il LR è connesso lateralmente con il volume del core bypass e tramite check valve al lato primario di ciascun SG. Il PRZ è composto da due parti cilindriche; la parte inferiore è connessa all'estremità superiore dell'UR da una "surge hole". Le masse metalliche, esterne ed interne, sono simulate; l'isolamento termico è simulato dove presente.

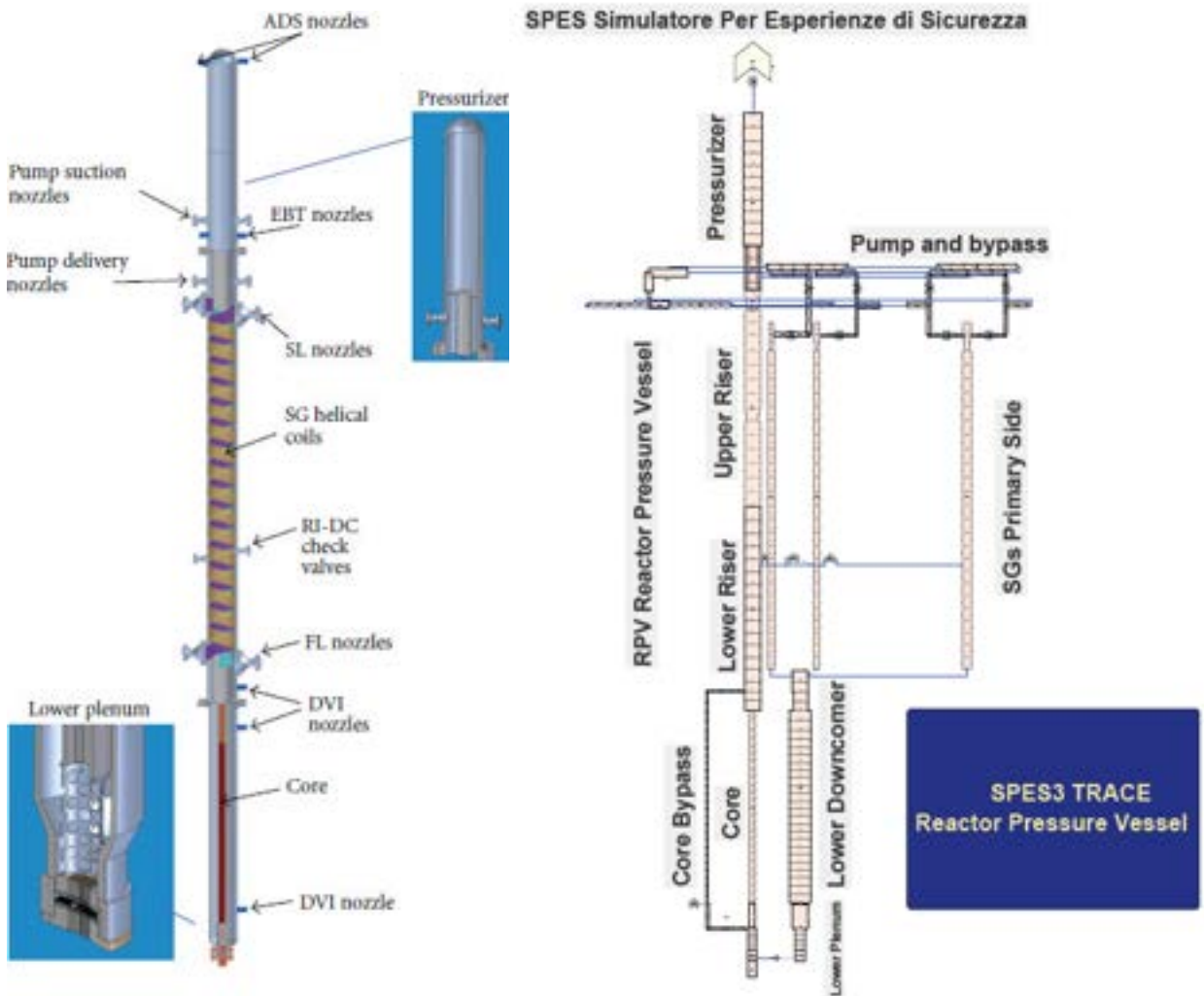


Fig. 4-2: Nodalizzazione del sistema primario di SPES-3.

I tre generatori di vapore elicoidali sono simulati con i componenti "pipe" accoppiati termicamente con le corrispondenti regioni primarie. Il lato primario dei tre SG è modellato con volumi che simulano ogni regione anulare contenente i tubi elicoidali. Sono altresì simulate le check valve che connettono il LR alla regione anulare degli SG. È importante notare che in tutte le check valve usate nella nodalizzazione il valore della "back pressure" è sempre positivo.

I tre circuiti secondari in SPES-3 sono modellati fino alla MSIV ed alla MFIV, e sono termicamente accoppiati al sistema primario dai tubi degli SG. Ogni loop del sistema secondario è

provvisto di un EHRS con relativa gamba fredda e gamba calda ed uno scambiatore di calore posizionato nella RWST. Due RWST ospitano rispettivamente gli EHRS-A/B ed l'EHRS-C. La nodalizzazione del sistema secondario SPES-3 è mostrata nelle Figg. 4-3 a, b e c. Si fa notare che nella Figg. 4-3 a e b sono mostrati i sistemi secondari A e B aventi in comune la stessa RWST. La Fig. 4-3c mostra la nodalizzazione dello SG-C lato secondario. I coefficienti di caduta di pressione del modello TRACE alle giunzioni delle condotte e delle valvole, in tutti i componenti sopra descritti, tengono conto della geometria delle linee (gomiti, restringimenti, allargamenti, ecc..) e pertanto sono già computati nel calcolo TRACE le relative perdite di carico concentrate.

I compartimenti e le condotte del sistema di contenimento sono modellati in tutte le loro parti, come mostrato in dettaglio Fig. 4-1 b. I serbatoi consistono di due EBT, due LGMS, una QT, un DW, una RC e due PSS. Le condotte sono dovute alle linee DVI, ai collegamenti dei sistemi EBT, ai sistemi ADS, alla connessione QT-DW, alle connessioni DW-RC, alle connessioni DW-PSS, alle connessioni PSS-LGMS, alle connessioni LGMS-DVI, alle connessioni RC-DVI, alle connessioni PSS-DVI ed al sistema PCC. Le linee di break consistono in: DVI-B, connessione fra l'EBT-B ed il RPV, linea del single train stadio I dell'ADS, linea FL-B e linea SL-B.

In particolare si sottolinea l'uso del componente tridimensionale vessel, disponibile in TRACE, per modellare il DW, i PSS e la RC. In particolare il DW è modellato con 22 livelli assiali, 2 anelli radiali e 4 settori azimutali; il PSS-A è modellato con 9 livelli assiali, 2 anelli radiali e 2 settori azimutali; il PSS-B è modellato con 9 livelli assiali, 2 anelli radiali e 2 settori azimutali; la RC è modellata con 16 livelli assiali, 2 anelli radiali e 2 settori azimutali.

La Tabella 4-1 riassume i componenti utilizzati nel modello TRACE per la simulazione dell'impianto sperimentale SPES-3.

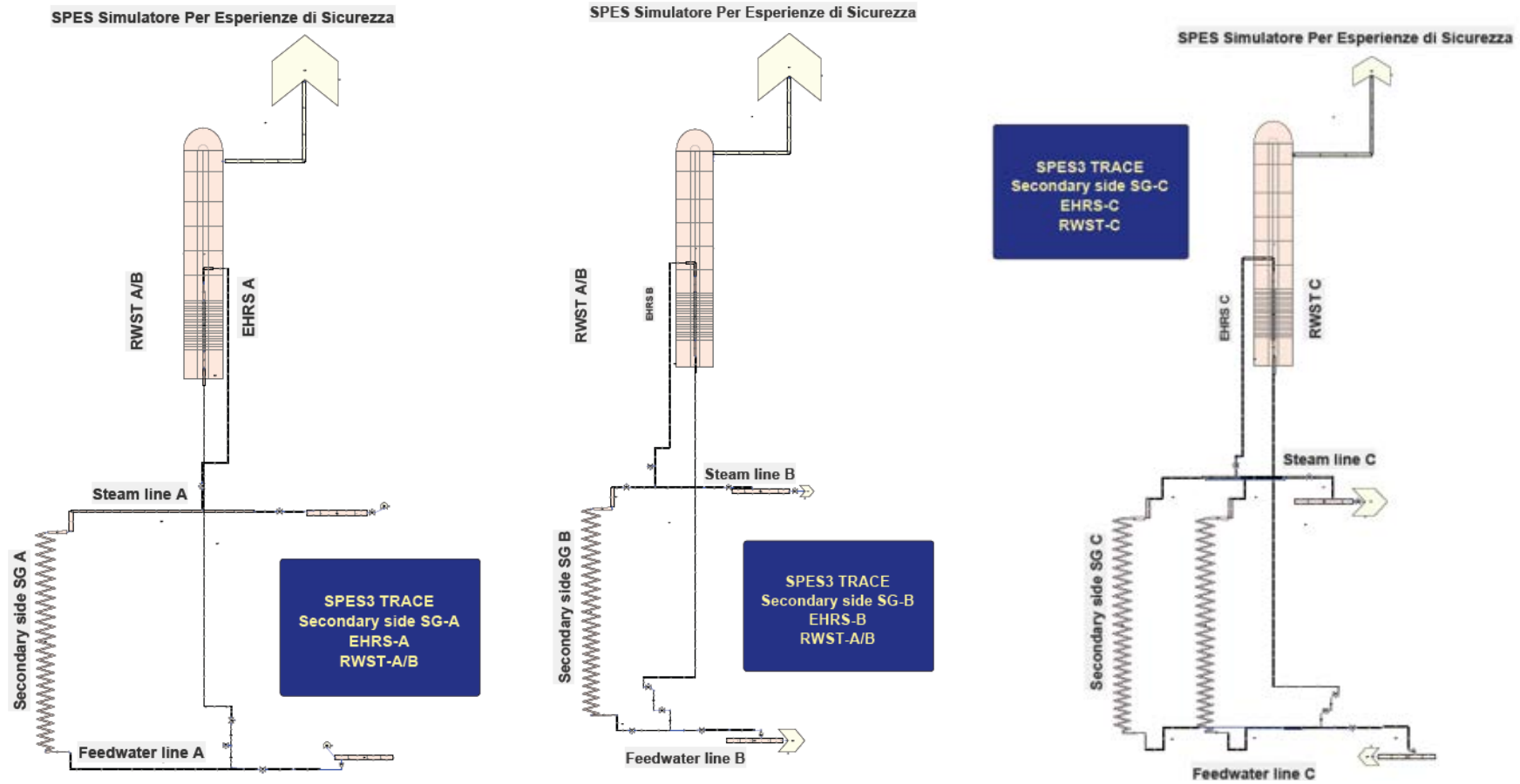


Fig. 4-3: Nodalizzazione dello SG-A lato secondario (a); nodalizzazione dello SG-B lato secondario (b); nodalizzazione dello SG-C lato secondario (c).

Tabella 4-1: Componenti utilizzati nel modello TRACE per la simulazione di SPES-3.

Hydraulic Components 341	Breaks		9
	Pipes		246
	Pumps (5 TDJ)		6
	Single Junctions		2
	Valves		72
	Vessel		6
Control Systems 1915	Trip		177
	Control Blocks 610	Arithmetic	408
		Controller	3
		Logical	127
		Manipulation	14
		Time Related	58
	Signal Variables 1121	General	2
		Volumetric	332
		Component	235
		Edge	4
		Heat	284
		Control	264
	General Tables		7
Thermal 363	Heat Structures		351
	User Defined Materials		12
Power Components			4
Connections			2805

# CAPITOLO 5

## *SIMULAZIONE DI STATI STAZIONARI*

### **5-1 ANALISI DELLO STAZIONARIO**

Le analisi dello stato stazionario sono state condotte per circa 3000 s. I calcoli sono stati eseguiti con un processore “intel xeon based” (CPU X5680 @ 3.33 GHz) e con un sistema operativo Windows 7 Professional a 64 bit.

Le analisi hanno assunto le ipotesi relative ad una configurazione di SPES 3 più aderente ai rapporti di scala adottati che prevede 13 tubi per ciascun fascio tubiero elicoidale.

La simulazione dello stato stazionario è stata compiuta per due differenti casi: nel primo si è assunta l'ipotesi che la potenza erogata dalle barre riscaldatrici di SPES 3 sia pari a 10 MW, nel secondo caso si è assunta l'ipotesi più realistica che la massima potenza erogabile, disponibile per l'impianto, sia 6.5 MW. Evidentemente nei due casi, durante lo stazionario, il rapporto potenza su volume non sarà uguale mentre, come ovvio, esso tenderà rapidamente a coincidere nei due casi già dalle prime fasi del transitorio. Affinché nelle due condizioni di stazionario si pervenga, in entrambi

i casi, ai valori termofluidodinamici di riferimento per IRIS (quali ad esempio la temperatura e la pressione del refrigerante nel core), nei due casi le portate primarie e secondarie sono state opportunamente regolate unitamente alla pressione di saturazione del refrigerante secondario.

La simulazione dello stato stazionario prevede che l'impianto sia in funzione ad una pressione primaria di 155.13 bar. La temperatura del fluido refrigerante all'ingresso del nocciolo è di circa 291°C, mentre all'uscita è di circa 329°C, producendo un incremento di temperatura del fluido primario nel core di circa 38 gradi. Il fluido così caldo percorre il riser fino ad arrivare alla pompa che lo invia così agli SG. La portata elaborata dalla pompa è di circa 47 kg/s nel caso di 10 MW e di circa 31 kg/s nel caso di 6.5 MW e la densità del fluido è di circa 663 kg/m<sup>3</sup>. La potenza termica asportata da ciascun SG è mediamente di 2.50 MW nel caso di 10 MW e circa 1.62 MW nel caso di 6.5 MW.

La pressione sul lato secondario degli SG è mantenuta a circa 59 bar nel caso di 10 MW e a circa 62 bar nel caso di 6.5 MW. Nei componenti quali QT, DW, PSS, RC e LGMS la pressione è molto prossima a quella atmosferica. Solo negli EBT la pressione si mantiene sostanzialmente uguale a quella che regna nel pressurizzatore.

Le condizioni stazionarie sono state ottenute senza il preriscaldamento delle strutture termiche dei: DW, QT, LGMS, PSS, RC. In particolare le strutture termiche di questi componenti si trovano alla temperatura di 48.9 °C. Negli RC, DW e QT contenenti inizialmente solo aria e negli PSS e LGMS, parzialmente riempiti con acqua, l'aria sovrastante il liquido si trova praticamente alla stessa temperatura di equilibrio con le pareti e con il liquido.

I principali risultati ottenuti nelle due simulazioni relative alle predette condizioni stazionarie sono riportati nelle tabelle 5-1 e 5-2 rispettivamente per il caso di 10 MW e di 6.5 MW.

Le Fig. 5-1 e 5-2 mostrano l'andamento della temperatura del fluido nel lato primario (in rosso) e lato secondario (in azzurro) nello SG-A, rispettivamente per il caso di 10 MW e di 6.5 MW.

In relazione alle due condizioni stazionarie descritte, è stata svolta un'analisi del pertinente transitorio di riferimento, limitatamente al compimento della fase di blow down e all'innesco della fase di long term injection con evidenza dell'interazione fra il sistema primario e quello di contenimento. I risultati ottenuti mostrano in entrambi i casi rispecchiano le fenomenologie attese e descritte in dettaglio nel capitolo successivo.



Tab. 5-1. Valori delle principali grandezze di interesse dell'impianto SPES 3 in condizioni stazionarie a 10 MW.

	RPV	primary			SG-A		SG-B		SG-C			EBT A/B	DW	QT	PSS A/B	RC	LGMS A/B	RWST A/B	RWST C
		Core	PRZ	Bypass Core	primary	secondary	primary	secondary	primary	secondary C1	secondary C2								
P-inlet (MPa)		15.683	15.512		15.616	5.931	15.617	5.924	15.617	5.962	5.962	primary	0.1013	0.1013	0.125	Cont	0.125	0.1013	0.1013
P-outlet (MPa)		15.608			15.642	5.738	15.642	5.738	15.642	5.784	5.783								
mass flow (kg/s)	47.02	45.00		2.02	11.78	1.270	11.73	1.270	23.52	1.270	1.270								
T-inlet (°C)		291.14		291.14	326.60	223.81	326.60	223.83	326.60	223.83	223.83	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90	20.00	20.00
T-outlet (°C)		329.28		291.07	293.23	314.42	290.11	310.52	289.97	304.42	304.41								
DT (°C)		38.14			33.36	90.61	36.49	86.69	36.63	80.60	80.58								
Tsat-outlet (°C)						272.68		272.68		273.20	273.20								
Superheating (°C)						41.74		37.84		31.22	31.21								
Collapsed level (m)			2.047			1.934		2.098		2.223	2.223	3.14	empty	empty	3.76	empty	2.457	6.9526	6.9525
Power (MW)		10				2.526		2.505		2.483	2.482								
Mass (kg)	3378											127			1480		986.5	11872	11872
Heat Losses (kW)	12.88											0.047	1.568	0.0702	0.272	0.474	0.110	-	-

Tab. 5-2. Valori delle principali grandezze di interesse dell'impianto SPES 3 in condizioni stazionarie a 6.5 MW.

	RPV	primary			SG-A		SG-B		SG-C			EBT A/B	DW	QT	PSS A/B	RC	LGMS A/B	RWST A/B	RWST C
		Core	PRZ	Bypass Core	primary	secondary	primary	secondary	primary	secondary C1	secondary C2								
P-inlet (MPa)		15.653	15.512		15.566	6.222	15.567	6.221	15.566	6.238	6.238	primary	0.1013	0.1013	0.125	Cont	0.125	0.1013	0.1013
P-outlet (MPa)		15.600			15.610	6.115	15.610	6.115	15.610	6.134	6.134								
mass flow (kg/s)	30.76	29.48		1.28	7.66	0.812	7.68	0.812	15.43	0.812	0.812								
T-inlet (°C)		291.24		291.24	326.33	223.77	326.33	223.81	326.33	223.79	223.79	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90	20.00	20.00
T-outlet (°C)		329.10		291.14	293.35	323.53	290.19	322.80	289.92	321.16	321.16								
DT (°C)		37.86			32.98	99.76	36.13	98.99	36.41	97.36	97.36								
Tsat-outlet (°C)						276.83		276.83		277.03	277.03								
Superheating (°C)						46.71		45.97		44.13	44.13								
Collapsed level (m)			2.047			1.805		1.984		2.101	2.101	3.14	empty	empty	3.7	empty	2.457	6.9526	6.9525
Power (MW)		6.5				1.624		1.624		1.619	1.619								
Mass (kg)	3378											127			1480		986.5	11872	11872
Heat Losses (kW)	12.88											0.047	1.568	0.0702	0.272	0.474	0.110	-	-



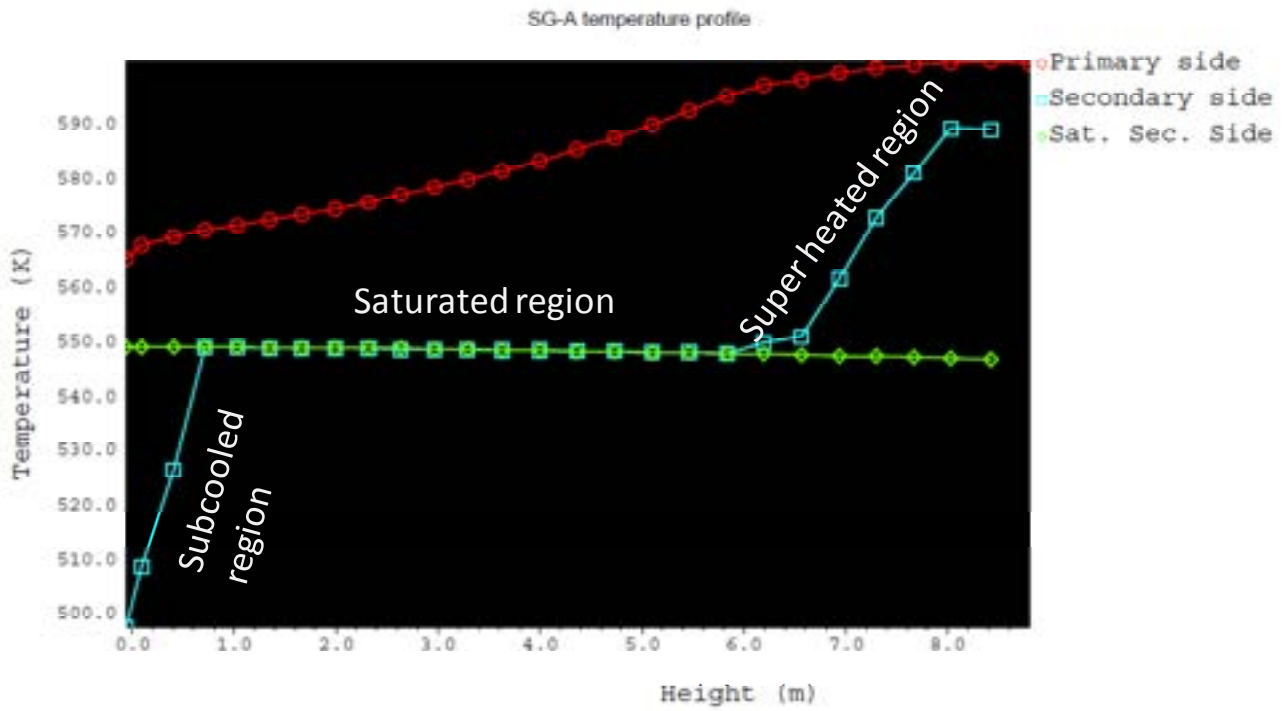


Figura 5-1 Profilo di temperatura nello SG-A (lato primario e secondario) ; caso a 10 MW.

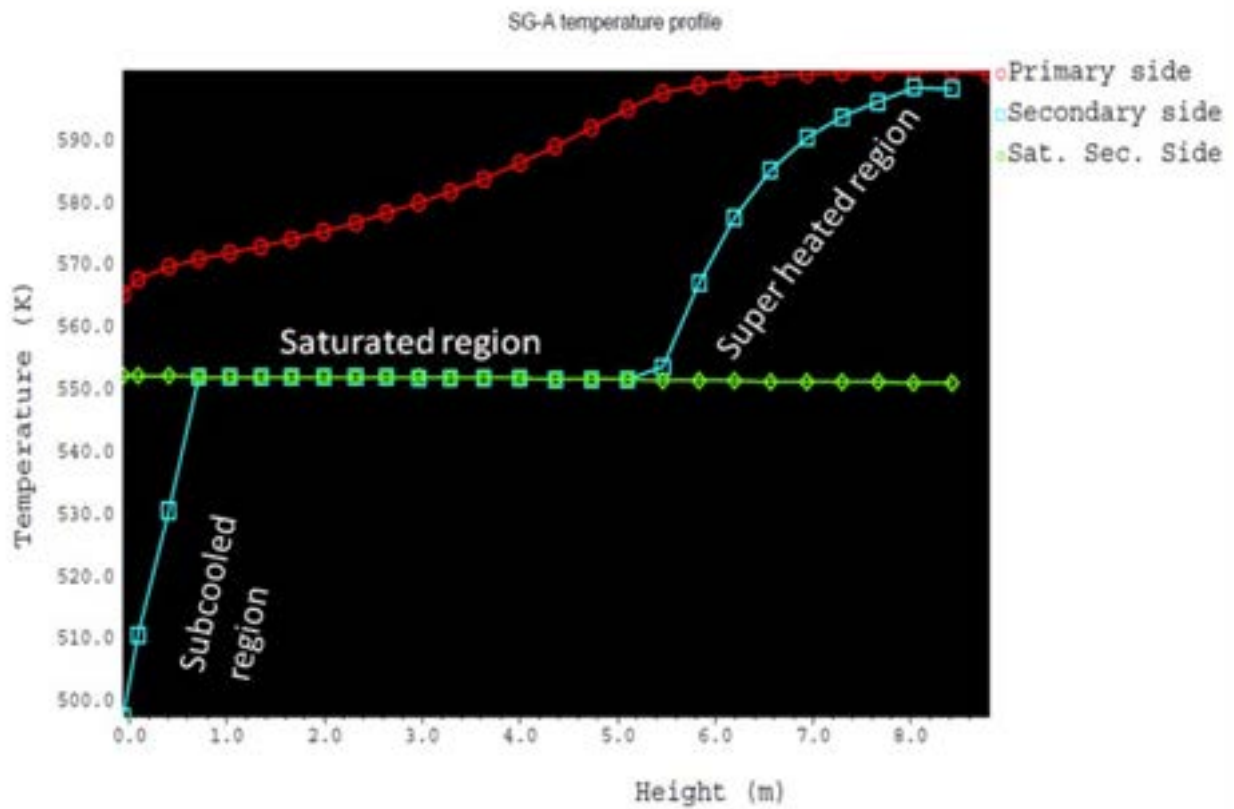


Figura 5-2 Profilo di temperatura nello SG-A (lato primario e secondario) ; caso a 6.5 MW.

# CAPITOLO 6

## *ANALISI DI UN CASO DI “LOW ELEVATION SBLOCA” DOVUTO AD UNA ROTTURA A GHIGLIOTTINA DELLA LINEA DI INIEZIONE DIRETTA NEL VESSEL*

### **6.1 ANALISI DEL TRANSITORIO**

Lo scopo di questa analisi è di studiare il comportamento termoidraulico del RPV e dei diversi componenti del contenimento durante una rottura a ghigliottina da due pollici nella linea DVI e di studiare le capacità del codice TRACE V5 di simulare i fenomeni tipici di questo transitorio quali l'accoppiamento primario secondario durante il blowdown, le interazioni tra i vari componenti del contenimento e l'efficacia dei sistemi passivi. Lo studio si basa sull'analisi di 150.000 s di transitorio.

Le analisi hanno assunto le ipotesi che ciascun fascio elicoidale degli SG di SPES fosse costituito da 14 tubi e con condizioni iniziali in cui la potenza erogata sia fissata a 10 MW.

Nella tabella 6-1 seguente sono riportate cronologicamente le fasi e gli interventi simulati nel corso del transitorio.



SPES-3 10 MW 14 tubes for each SG					
DVI-B break (2 inch equivalent DEG)					
N.	Phases and events	Time (s)	Quantity	Units	Notes
<b>0</b>	<b>0 Break</b>				
1	Break initiation	0			break valves 2 s stroke
2	Break flow peak (Containment side)	1	1.303	kg/s	
3	Break flow peak (RV side)	2	1.358	kg/s	
<b>1</b>	<b>4 Blowdown, RV depressurization, Containment pressurization, steam dumping into PSS.</b>				
5	Steam-air mixture begins to flow from RC top to DW bottom through RC gas-line	1			
6	Steam- air mixture begins to flow from RC top to DW bottom through RC liquid-line	1			
7	Steam - air mixture begins to flow from DW bottom to QT	1			
8	Steam-air mixture begins to flow from DW top to PSS-A vent line	1			
9	Steam-air mixture begins to flow from DW top to PSS-B vent line	1			
10	Steam-air mixture begins to flow from DW check valve to PSS-A	19			
11	Steam-air mixture begins to flow from DW check valve to PSS-B	19			
12	High Containment pressure signal	34.41	1.7	bar	Set-point for safety analyses ;
<b>2</b>	<b>13 S-Signal</b>				
14	Safety signal	34.41			
<b>3</b>	<b>15 Reactor scram</b>				
16	Reactor Trip start	34.41			
17	SCRAM begins	34.41			
18	Heaters PRZ Power-off	34.41			From 21.6 KW to 0
<b>4</b>	<b>19 Secondary loop isolation, EHRS-A and B actuation</b>				
20	MFIV-A, B, C closure start	34.41			MFIV-A, B, C 5 s stroke
21	MSIV-A, B, C closure start	34.41			MSIV-A, B, C 5 s stroke
22	EHRS-A and B opening start (EHRS 1 and 3 in IRIS)	34.41			EHRS-A, B isolation valve 2 s stroke
23	High SG pressure signal	47.54	90	bar	
24	SG-C high pressure reached	47.54	90	bar	
25	EHRS-A first peak mass flow	48.00	0.213	kg/s	
26	EHRS-B first peak mass flow	48.00	0.210	kg/s	
27	SG-A high pressure reached	50.72	90	bar	
28	SG-B high pressure reached	51.21	90	bar	
<b>5</b>	<b>29 RWST-A/B heat-up</b>				
30	RWST-A/B begins to heat-up	67.01			
<b>6</b>	<b>31 Blowdown, RV depressurization</b>				
32	Low PRZ water level signal	70.01	1.2	m	
33	Low Low PRZ water level signal	72.02	1.189	m	
<b>7</b>	<b>34 Secondary loop pressurization</b>				
35	Secondary loop pressure peak	76.02	113.859	bar	SG-C
<b>8</b>	<b>36 Pump coastdown</b>				
37	RCP coastdown starts	87.02			Signal of Low Low PRZ level + 15 s delay

<b>9</b>	38	<b>Primary circulation through RI-DC check valves</b>			
	39	natural circulation begins through RI-DC shroud check valve B	129.07		
	40	natural circulation begins through RI-DC shroud check valve A	129.07		
<b>SPES-3 10 MW 14 tubes for each SG</b>					
<b>DVI-B break (2 inch equivalent DEG)</b>					
N.		<b>Phases and events</b>	<b>Time (s)</b>	<b>Quantity</b>	<b>Units</b> <b>Notes</b>
<b>10</b>	41	<b>Blowdown, RV depressurization</b>			
	42	Low PRZ pressure signal	162.42	124	bar
	43	Low Low PRZ pressure signal	185.28	117.2	bar
<b>11</b>	44	<b>LM-Signal (High P cont + Low Low P PRZ)</b>			
	45	LM-Signal	185.28		
<b>12</b>	46	<b>LM-Signal: EHRS-C, ADS Stage-I and EBT actuation.</b>			
	47	EHRS-C opening start (EHRS 2 and 4 in IRIS)	185.28		EHRS-C isolation valve 2 s stroke
	48	ADS Stage I start opening (3 trains)	185.28		ADS valve 10 s stroke
	49	EBT-A and B valve opening start	185.28		EBT valve 15 s stroke
	50	Steam - air mixture begins to flow from QT to DW bottom	186.14		
	51	PRZ minimum level	187.14	0.016	m
	52	ADS Stage I first peak flow (3 trains)	193.15	0.557	kg/s
			193.15	0.891	kg/s
<b>13</b>	53	<b>Primary circulation through RI-DC check valves</b>			
	54	natural circulation through RI-DC shroud check valve A stops	194.15		
	55	natural circulation through RI-DC shroud check valve B stops	195.16		
	56	Break flow peak (Containment side)	201.17	0.696	kg/s
	57	Flashing begins at pump inlet	202.17	void >0	
	58	Flashing begins at EBT-B top	203.17	void >0	
<b>14</b>	59	<b>RWST-C heat-up</b>			
	60	RWST-C begins to heat-up	206.17		
<b>15</b>	61	<b>Primary circulation through pump-bypass</b>			
	62	Opening of the pump bypass check valve on branch A	220.19		
	63	Opening of the pump bypass check valve on branch B	220.19		
	64	Opening of the pump bypass check valve on branch C1	220.19		
	65	Opening of the pump bypass check valve on branch C2	220.19		
	66	Closure of the pump bypass check valve on branch A	224.20		
	67	Closure of the pump bypass check valve on branch C2	225.20		
<b>16</b>	68	<b>RV saturation</b>			
	69	Flashing begins at core outlet	226.20	void >0	
<b>17</b>	70	<b>Primary circulation through RI-DC check valves</b>			
	71	natural circulation begins through RI-DC shroud check valve C	229.21		
	72	natural circulation restarts through RI-DC shroud check valve A	229.21		

<b>18</b>	73	<b>Primary circulation through pump-bypass</b>			
	74	Closure of the pump bypass check valve on branch B	231.21		
<b>19</b>	75	<b>Primary circulation through RI-DC check valves</b>			
	76	natural circulation restarts through RI-DC shroud check valve B	233.21		

SPES-3 10 MW 14 tubes for each SG					
DVI-B break (2 inch equivalent DEG)					
N.	Phases and events	Time (s)	Quantity	Units	Notes
<b>20</b>	77	<b>Primary circulation through pump-bypass</b>			
	78	Closure of the pump bypass check valve on branch C1	235.22		
	79	Opening of the pump bypass check valve on branch C2	242.23		
	80	Closure of the pump bypass check valve on branch C2	247.24		
	81	Natural circulation interrupted at SGs top	248.24		Pump inlet uncovered (void ~1)
	82	PRZ maximum level	266.27	3.026 m	
<b>21</b>	83	<b>RV saturation</b>			
	84	Flashing begins at EBT-A top	282.29	void >0	
<b>22</b>	85	<b>Core in saturation conditions</b>			
	86	Flashing begins at core inlet	302.32	void >0	
<b>23</b>	87	<b>RWST power peak</b>			
	88	RWST-C net input power peak	413.50	592.600 kW	
	89	RWST-A/B net input power peak	426.53	564.710 kW	
<b>24</b>	90	<b>Primary circulation through RI-DC check valves</b>			
	91	natural circulation through RI-DC shroud check valve C stops	452.58		
	92	restart of the natural circulation through RI-DC shroud check valve C	473.62		
	93	natural circulation through RI-DC shroud check valve C stops	492.00		
	94	EBT-B empty	552.12		552.12 s almost empty Level < 20 mm ; 802.61 s completely empty
	95	EBT-B line empty	655.32		655.32 s almost empty Level < 20 mm ; 1120.25 s completely empty
	96	T core inlet <260 C set point	705.42		
	97	P SS SG-C out <2.76 MPa set point	1032.08		
	98	P SS SG-A out <2.76 MPa set point	1055.13		
	99	P SS SG-B out <2.76 MPa set point	1065.15		
<b>25</b>	100	<b>Primary circulation through RI-DC check valves</b>			
	101	restart of the natural circulation through RI-DC shroud check valve C	1257.52		
	102	stop of the natural circulation through RI-DC shroud check valve C	1989.95		
	103	stop of the natural circulation through RI-DC shroud check valve A	1999.02		
	104	stop of the natural circulation through RI-DC shroud check valve B	1999.02		
	105	Low and oscillating core mass flow	2005.03		
	106	Core minimum level	2150.3069	2.159 m	minimum collapsed water level
	107	RPV minimum mass inventory	2490.96	1777.880 kg	minimum RPV mass inventory
	108	Low DP RV-Containment	2583.00		DP RV-Containment < 50e3 Pa

<b>26</b>	109	<b>Low DP RV-Containment signal, LGMS and RC to DVI valve actuation</b>			
	110	LGMS A/B valve opening signal ; LM + low DP RV-cont signals	2583.00		
	111	LGMS -A/B valve opening start	2583.00		LGMS A /B valve 2 s stroke
	112	RC to DVI line valve opening signal; LM + low DP RV-cont signals	2583.00		
	113	RC to DVI line A/B valve opening start	2583.00		RC to DVI line A valve 2 s stroke
	114	Containment pressure peak	2623.21	9.316	bar DW top
	115	LGMS-B starts to inject into RC through DVI broken loop	2625.22		
	116	mass flow from the DEG break line increases	2627.22		

<b>SPES-3 10 MW 14 tubes for each SG</b>					
<b>DVI-B break (2 inch equivalent DEG)</b>					
N.	<b>Phases and events</b>	<b>Time (s)</b>	<b>Quantity</b>	<b>Units</b>	<b>Notes</b>

<b>27</b>	117	<b>Primary circulation through RI-DC check valves</b>			
	118	Restart of natural circulation through RI-DC shroud check valve A	2638.24		
	119	Restart of natural circulation through RI-DC shroud check valve B	2638.24		
	120	Core mass flow increasing	2642.25		
	121	LGMS-A starts to inject into RV through DVI intact loop	2731.42		
	122	Steam-air mixture flow, from DW check valve to PSS-A, practically stops; noisy and oscillations	2747		
	123	Steam-air mixture flow from DW check valve to PSS-B, practically stops; noisy and oscillations.	2747		
	124	Restart of natural circulation through RI-DC shroud check valve C	2790.53		
	125	Containment and RV pressure equalization	2814		Drywell and PRZ pressure at the top PRZ elevation
<b>28</b>	126	<b>Containment pressure greater than primary pressure</b>			
	127	<b>Reverse flow from containment to RV; Refilling of the RPV</b>			
	128	Reverse mass flow through the ADS Stage-I valves	2815		
	129	Reverse flow from RC to RV trough break RV side	2816.58		
	130	PRZ empty	2841.63		2841.63 s almost empty Level < 20 mm;
	131	Mixture starts to flow from RC to DVI-A	2910.76		2995.92 s completely empty
	132	DW top pressure lower than PSS-B top pressure	3029		
	133	DW top pressure lower than PSS-A top pressure	3034		
	134	EBT-A empty	3165.24		2841.63 s almost empty Level < 20 mm; 5054.18 completely empty
<b>29</b>	135	<b>PSS water flow to DW</b>			
	136	Water start to flow from top of PSS-B vent line to DW	5684.49		
	137	Water start to flow from top of PSS-A vent line to DW	5950.19		
<b>30</b>	138	<b>RC flooding</b>			
	139	Mass flows again from RV to RC trough break RV side	6412.43		
	140	Containment pressure returns to be lower than primary pressure	6474		
	141	Steam and gas mixture flows again from RV to QT (RV P > DW P)	6480.46		
	142	RC level at nozzle of RC to DVI line elevation	6758.61		RC collapsed level at 9.228 m
	143	RC level at DVI line elevation	6819.64		RC collapsed level at 9.483 m
	144	RC level at nozzle of RC to DW liquid line elevation	7123.23		RC collapsed level at 10.547 m
	145	Containment pressure greater than primary pressure	7438		
	146	Reverse flow from RC to RV trough break RV side	7462.89		
	147	Mass flows again from RV to RC trough break RV side	18094.31		
	148	RPV maximum mass inventory, during refilling. (end of refilling)	18914.68	2982.260 kg	2982.26 kg; maximum RPV mass inventory (end of refilling)

SPES-3 10 MW 14 tubes for each SG						
DVI-B break (2 inch equivalent DEG)						
N.	Phases and events	Time (s)	Quantity	Units	Notes	
<b>31</b>	149	<b>End of RPV refilling</b>				
	150	Low LGMS A mass	22405.14	198 kg	20% mass (198 kg) LGMS A	
	151	Low LGMS B mass	31990.28	198 kg	20% mass (198 kg) LGMS B	
<b>32</b>	152	<b>Low LGMS mass signal: ADS Stage-II actuation</b>				
	153	ADS stage-II start opening	31990.28		ADS stage II opens on AND LGMS A and B low mass signal	
	154	QT fill-up starts from DW connection	31990.28		from 32010. s to 46400 s	
	155	RPV (UP) collapsed water level below the RI-DC Check Valves elevation	44755.00		RPV (UP) level < 10.5616 m	
	156	Flow restarts from RC to DVI-A (check-valve)	47685.17		<b>Negligible</b>	
	157	RPV (UP) collapsed water level stabilizes at about 10 m, between the RI-DC Check Valves elevation and the RPV -DVI nozzles elevation	48000.20		9.437 m < RPV (UP) level < 10.5616 m	
	158	LGMS-B empty	49550.05		49550 s almost empty Level < 20 mm ; 50630. s completely empty	
	159	Flow starts from RC to DVI-B (check valve)	52630.37		<b>Negligible</b>	
	160	LGMS-A empty	54485.06		54485 s almost empty Level < 20 mm; 55565 s completely empty	
<b>33</b>	161	<b>Primary circulation through RI-DC check valves</b>				
	162	Stop of natural circulation through RI-DC shroud check valve C	72175.16			
	163	Natural circulation only through RI-DC shroud check valve A & B, oscillating and continuous	72175.16			
	164	RWST-A/B temperature	81990.15	100 °C	top RWST	
	165	Core power	87960.18	46.550 kW	constant from now on	
	166	RWST-C temperature	107290.15	100 °C	top RWST	
<b>34</b>	167	<b>Long Term conditions</b>				
	168	<b>EHRSA power</b>	150000	13.219 kW		
	169	<b>EHRSB power</b>	150000	10.570 kW		
	170	<b>EHRSC1 power</b>	150000	7.806 kW		
	171	<b>EHRSC2 power</b>	150000	7.974 kW		
	172	<b>Heat losses EBT</b>	150000	523 W		
	173	<b>Heat losses DVI lines</b>	150000	274 W		
	174	<b>Heat losses ADS lines</b>	150000	523 W		
	175	<b>Heat losses QT</b>	150000	189 W		
	176	<b>Heat losses LGMS</b>	150000	89 W		
	177	<b>Heat losses PSS</b>	150000	1.275 kW		
	178	<b>Heat losses RC</b>	150000	1.270 kW		
	179	<b>Heat losses DW</b>	150000	3.244 kW		
	180	<b>Heat losses RPV</b>	150000	3.815 kW		

Dopo l'apertura del break, una rottura a ghigliottina DEG, si innesca lo svuotamento del sistema primario, rilasciando all'interno della RC poco più di 1.3 kg/s di acqua in pressione dal lato del RPV, Fig. 6-1. Il codice predice l'efflusso critico alla rottura. Questa fuoriuscita di liquido produce uno svuotamento del RPV, Fig. 6-2, con conseguente depressurizzazione del sistema primario, come si nota dalla Fig. 6-3, che rappresenta l'andamento della pressione nel PRZ.

Il fluido fuoriuscito dunque dal break si riverserà nella RC, incrementandone la massa di acqua, Fig. 6-4, ed il suo livello, provocandone la pressurizzazione. Poiché la RC è connessa al DW, una miscela di aria-acqua-vapore andrà all'interno di quest'ultimo. La Fig. 6-5 mostra le portate alle giunzioni del DW. La Fig. 6-6 mostra l'andamento del livello collassato nel DW che dopo un primo aumento, tenderà successivamente a diminuire.

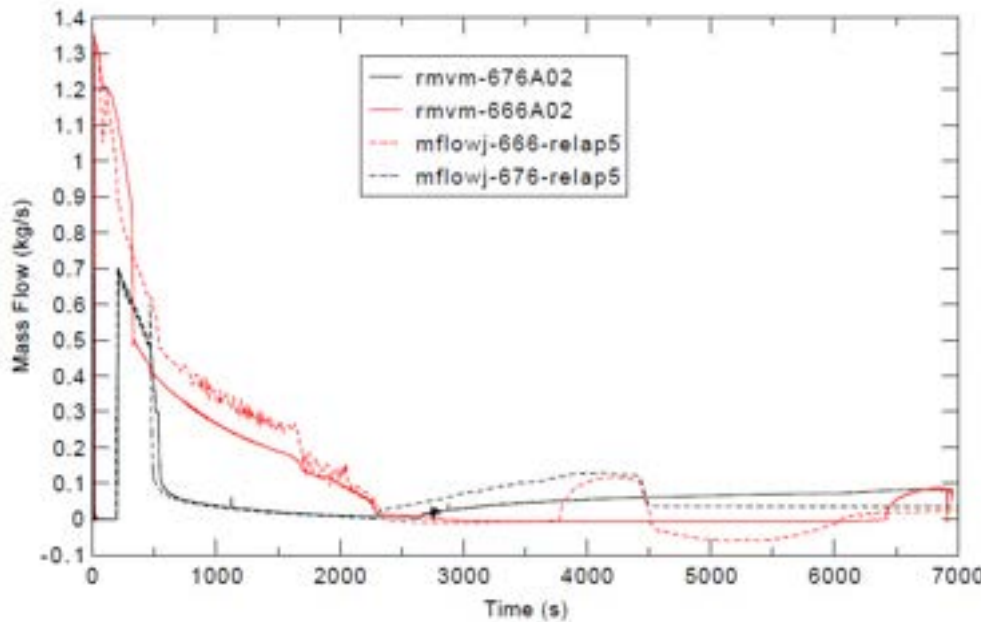


Figura 6-1: Portata nei Break.

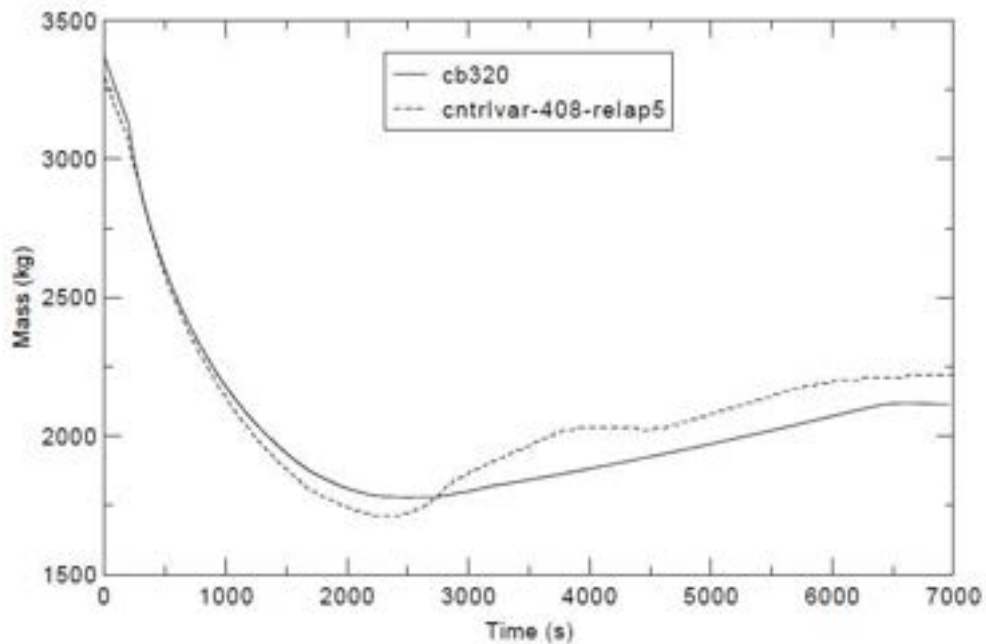


Figura 6-2: Inventario di massa nel RPV.

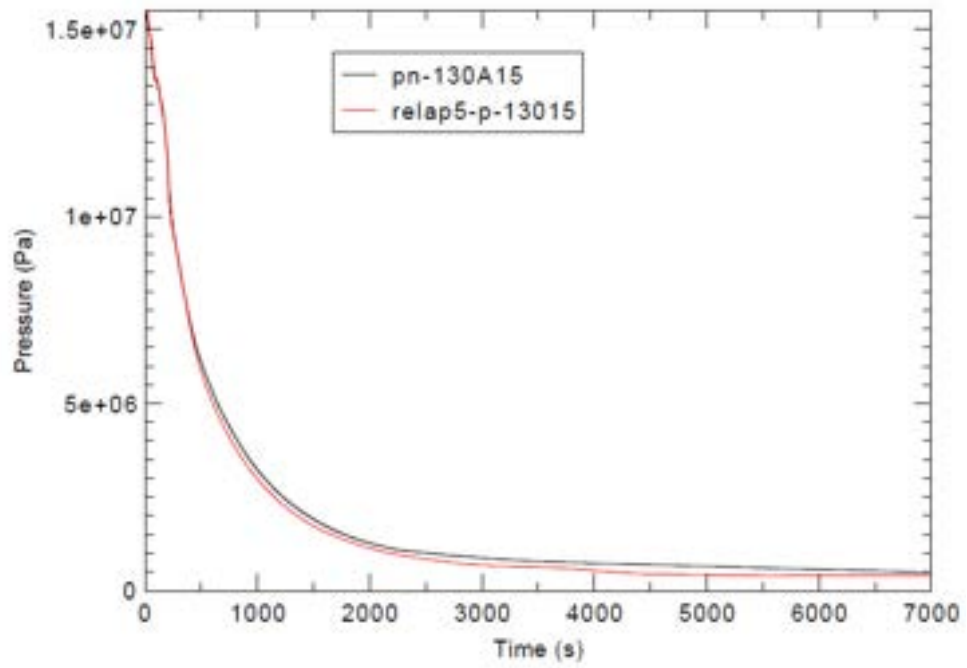


Figura 6-3: Pressione nel PRZ.

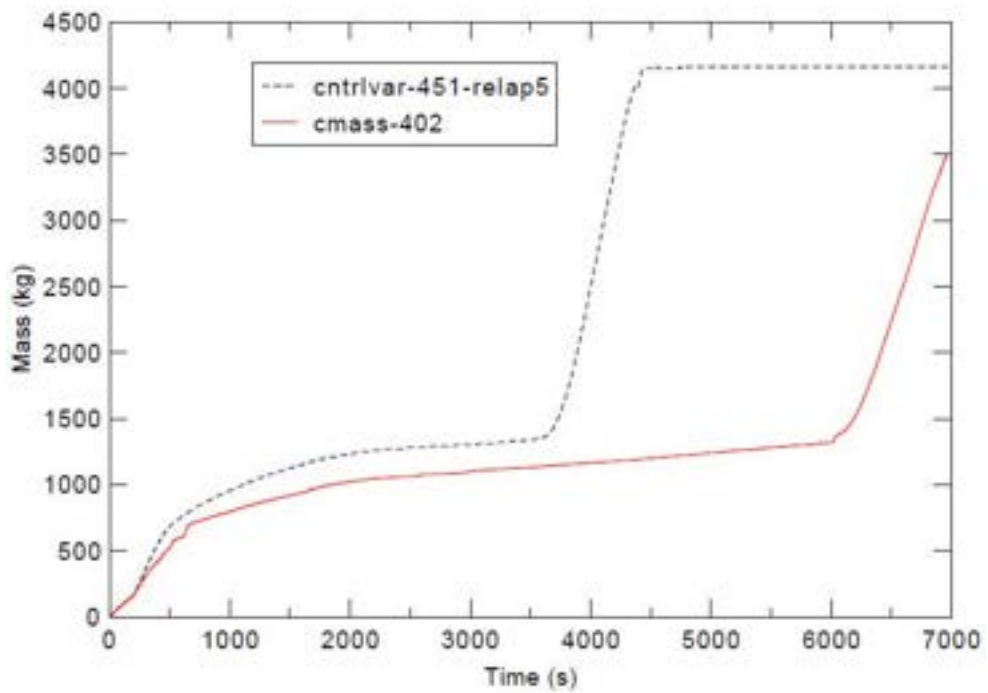


Figure 6-4: Massa di fluido nel RC.

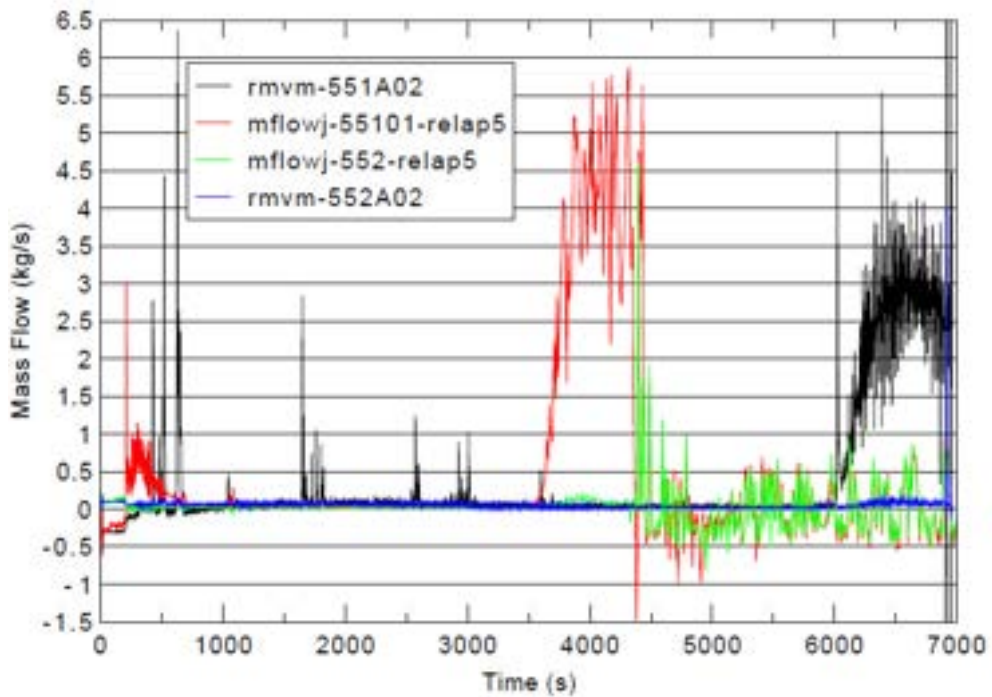


Figura 6-5: Portate che dalla RC vanno al DW.

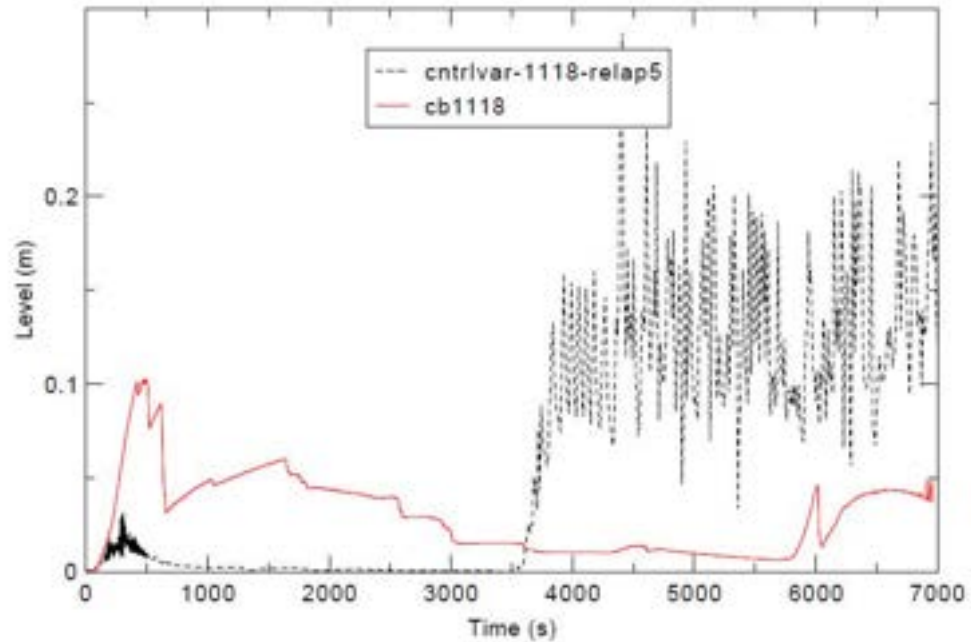


Figura 6-6: Livello collassato nel DW.

Allorché la pressione nel DW raggiunge il set - point di sicurezza posto a 1.7 bar (vedi Tab. 6-1) si innesca il trip del reattore e dunque l'attuazione degli EHRS. Gli EHRS-A e B cominciano a fare circolare l'acqua nel lato secondario, attraverso la circolazione naturale, e raggiungeranno un

picco di portata pari a circa 0.21 kg/.

In seguito, 15 s dopo l'innescò del segnale di Low – Low Level nel pressurizzatore, si arresta la pompa. Successivamente con il raggiungimento del segnale di Low – Low Pressure nel pressurizzatore si attiva il trip di LOCA MITIGATION (LM). Il codice predice l'attuazione degli EBT, che forniscono acqua borata al sistema primario.

I sistemi ADS sono attuati per assistere gli EHRS nella depressurizzazione del RPV, ma mentre l'EHRS depressurizza il sistema primario senza perdita di massa, l'ADS attua la stessa funzione con perdita di massa. La fase di svuotamento del sistema primario termina quando la pressione del RPV uguaglia quella del CV, a circa 2600 s, figura 6-7.

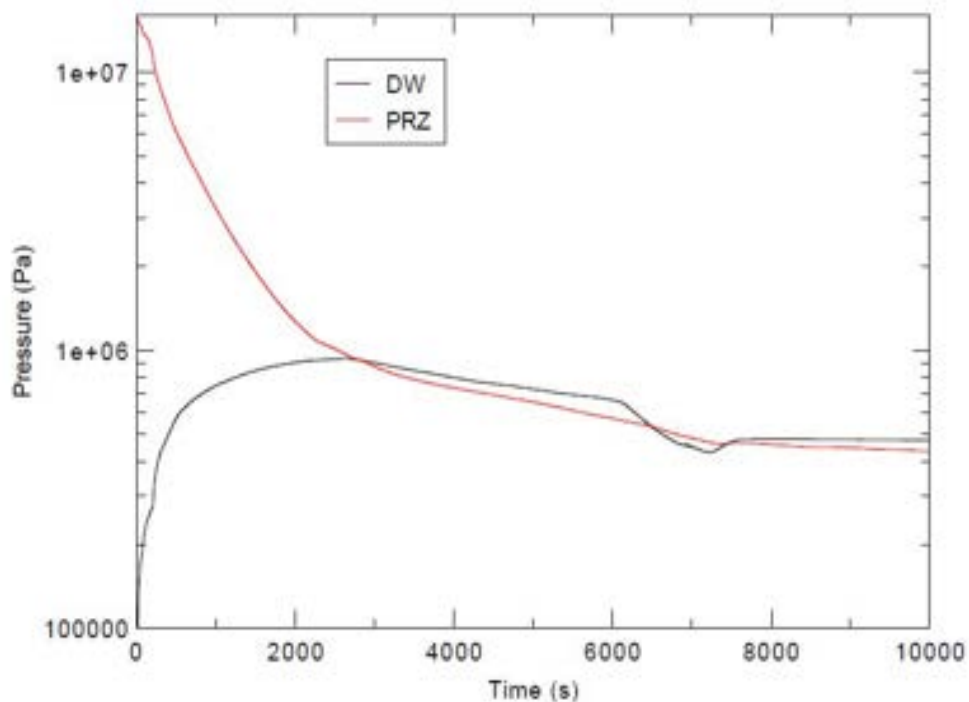


Figura 6-7: Andamenti delle pressioni nel PRZ e nel DW.

Il sistema accoppiato RPV/CV è depressurizzato dagli EHRS. In questa fase la portata al break cambia direzione e il calore non è rimosso dal contenimento ma direttamente dall'interno del vessel. Quando il vapore, proveniente dal contenimento, condensa all'interno del vessel e quando la pressione del contenimento si riduce, una certa quantità d'acqua, proveniente dalla piscina a soppressione, entra nel contenimento attraverso le vent lines e contribuisce a refrigerare la cavità del vessel nonché a contribuire al suo parziale riempimento. Il livello collassato nel RPV è mostrato nella figura 6-8.

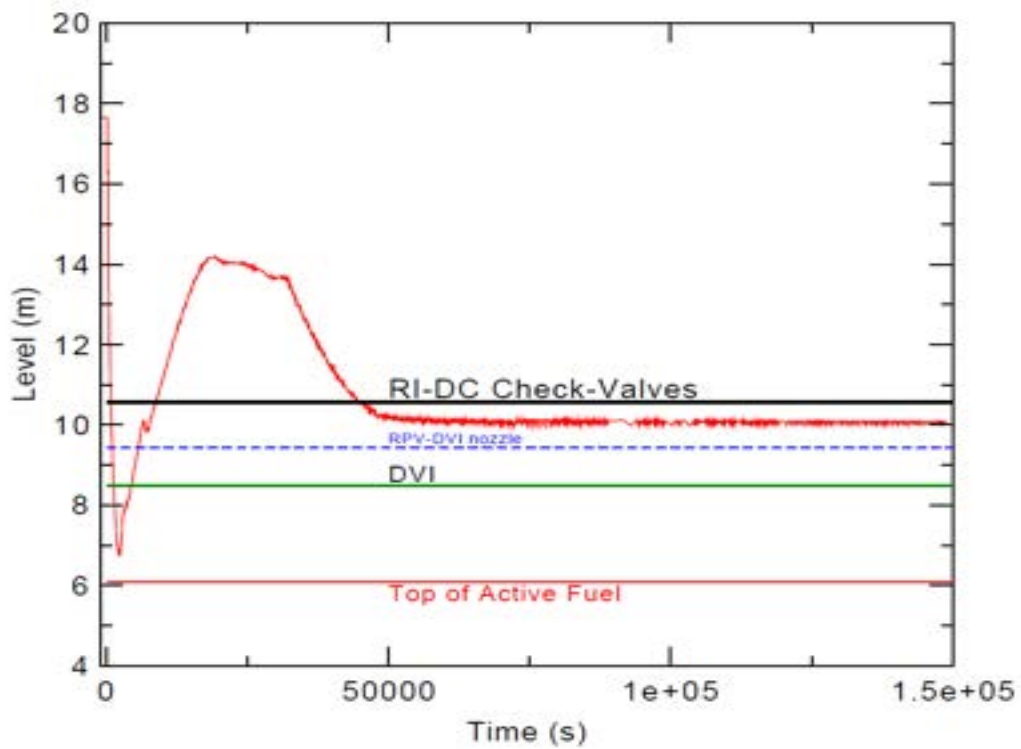


Figura 6-8: Livello collassato nel vessel.

La rappresentazione temporale delle principali fenomenologie termoidrauliche che si manifestano nel corso del transitorio sono mostrate nelle figure 6-9 – 6-11.

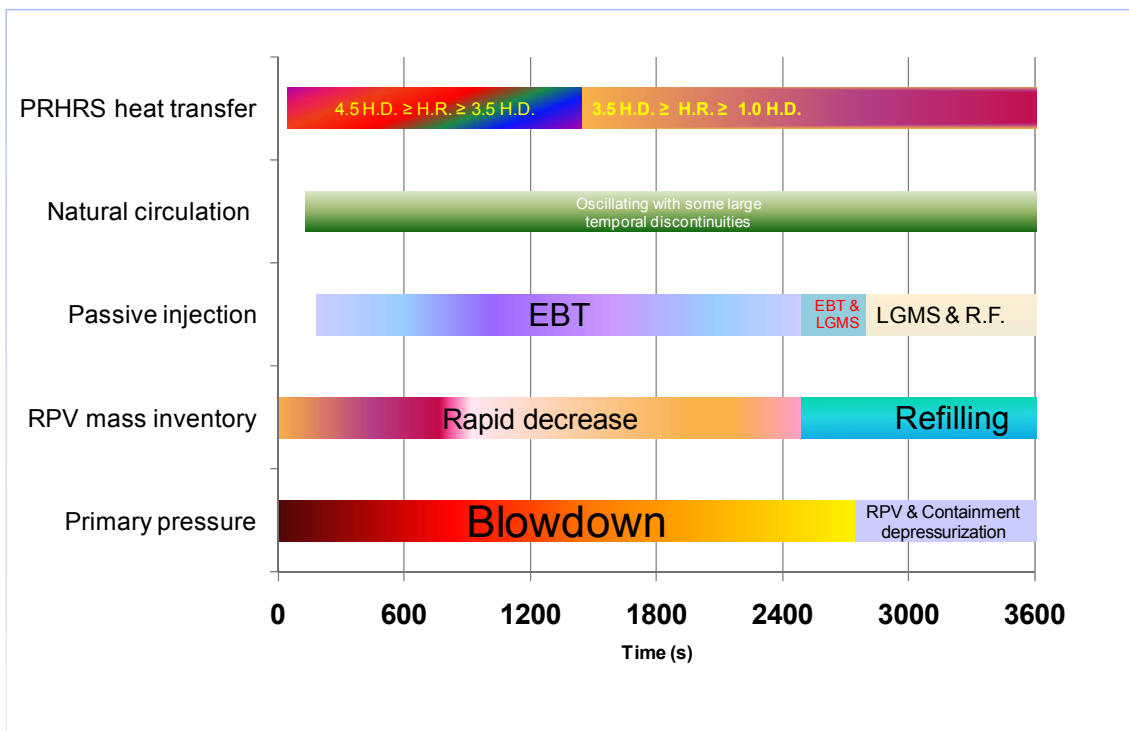


Figura 6-9: Sequenza temporale delle principali fenomenologie termoidrauliche che si manifestano nel corso del transitorio nei primi 3600s.

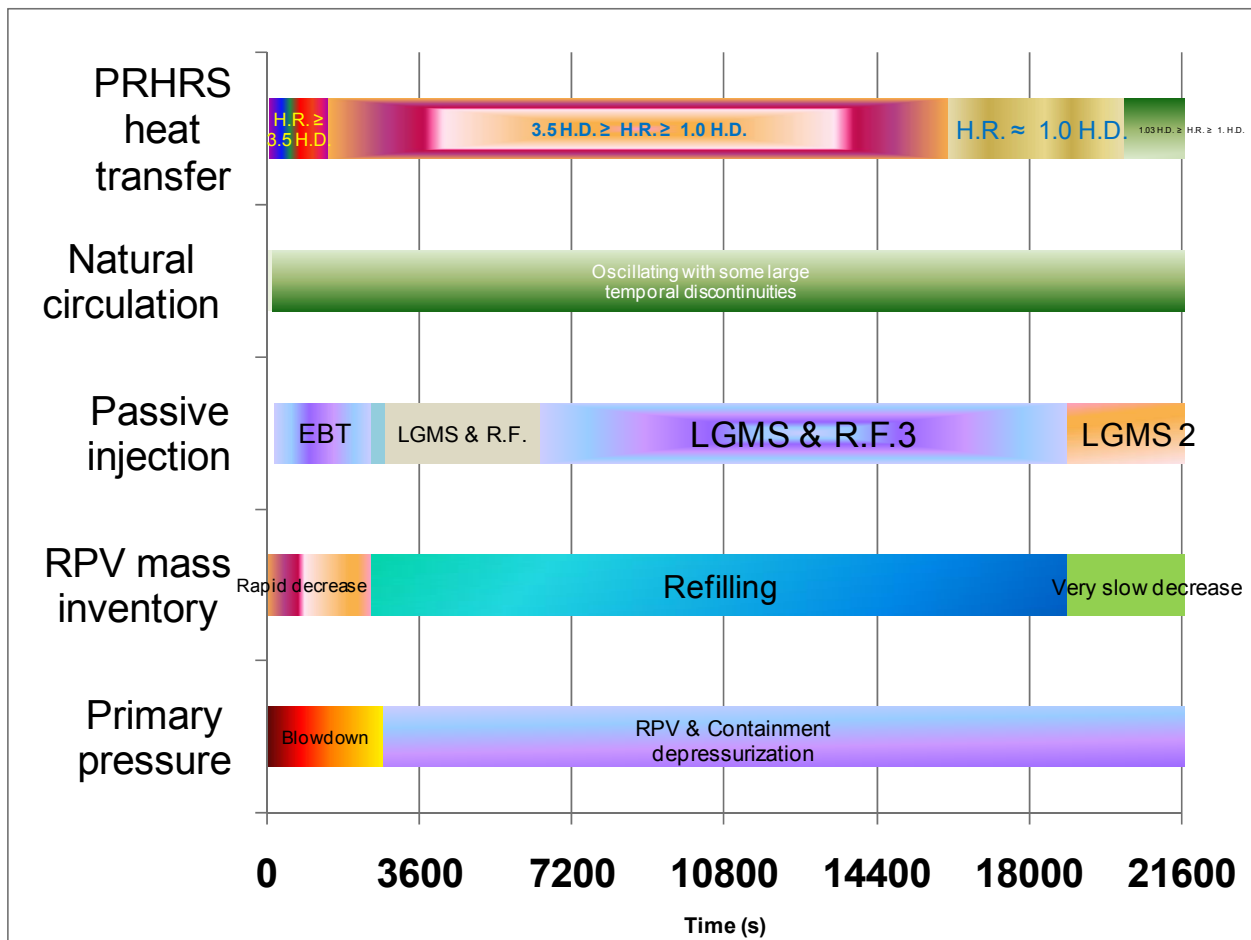


Figura 6-10: Sequenza temporale delle principali fenomenologie termoidrauliche che si manifestano nel corso del transitorio nelle prime 6 h.

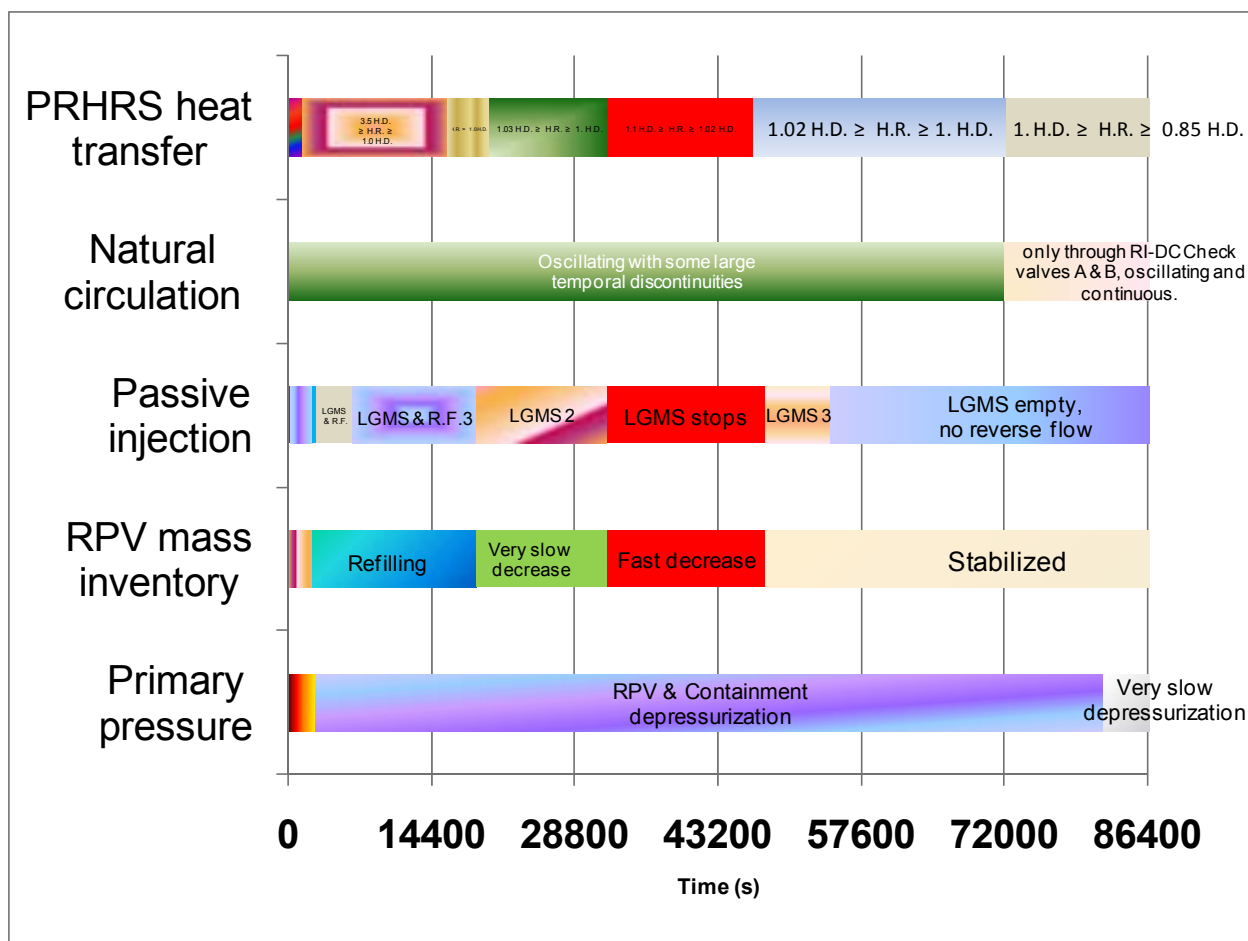


Figura 6-11: Sequenza temporale delle principali fenomenologie termoidrauliche che si manifestano nel corso del transitorio nelle prime 24 h.

Il paragone con i dati di simulazioni RELAP5, sviluppate dalla SIET, mostra un buon accordo in relazione ai più importanti parametri termoidraulici caratterizzanti il transitorio. In generale comunque delle discrepanze sono state riscontrate nel Refill del RPV e nello scambio termico tra gli EHRS e le accoppiate RWST. In particolare l’inventario primario predetto dal codice RELAP, durante il refill è inferiore rispetto a quello predetto dal TRACE. Questo può essere legato alle differenti “user choice” riguardo le opzioni legate allo scambio termico.

L’uso del componente tridimensionale vessel nella modellazione della RC, PSS, DW and RWST permette una più dettagliata analisi dei fenomeni attesi senza ricorrere all’accoppiamento di codici di sistema e specifici codici di contenimento. Questo, ovviamente, implica un incremento del tempo di calcolo (intorno a 20 volte il tempo reale).

Le figure 6-12 e 6-13 mostrano rispettivamente l’inventario primario e la pressione del PRZ predetta dal codice TRACE e dal codice RELAP5. E’ da sottolineare che il comportamento delle check valve è predetto in modo diverso dai due codici. In particolare i dati prodotti dal codice TRACE mostrano che nel long term cooling le check valve tra il DC e il SG-C sono sempre chiuse

riducendo la circolazione naturale primaria.

Si sottolinea, infine, che la portata predetta dal codice nella fase di long term cooling nelle linee che connettono la cavità del reattore al sistema DVI risulta particolarmente esigua e tale da non consentire autonomamente una efficace rimozione del calore di decadimento. Questo risultato suggerisce l'opportunità di ridimensionare, con diametri maggiori, le valvole su tali linee.

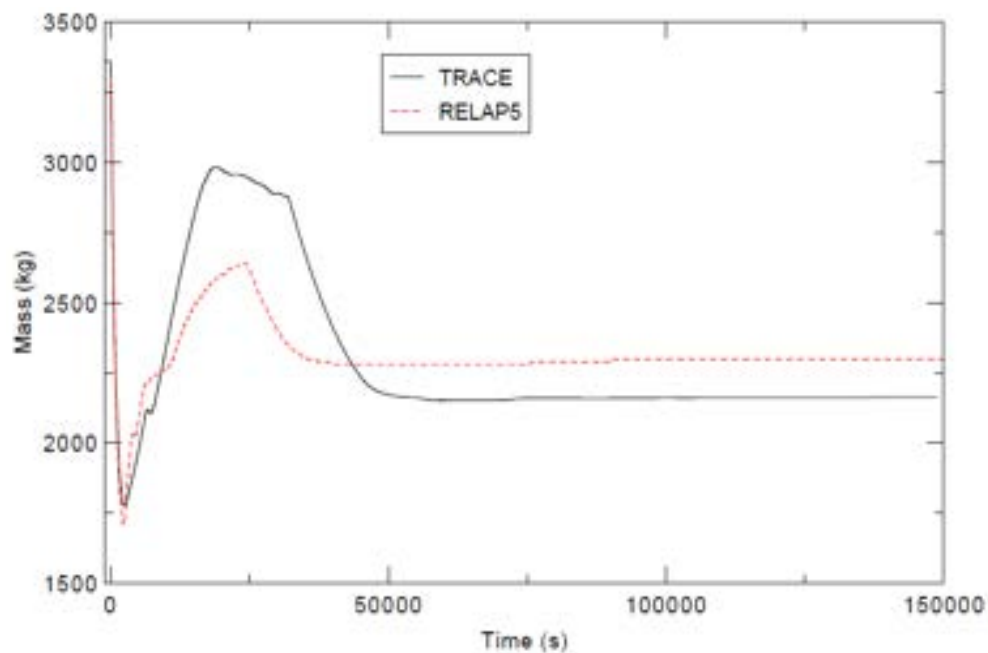


Figure 6-12: Inventario primario predetto dal codice TRACE e RELAP5.

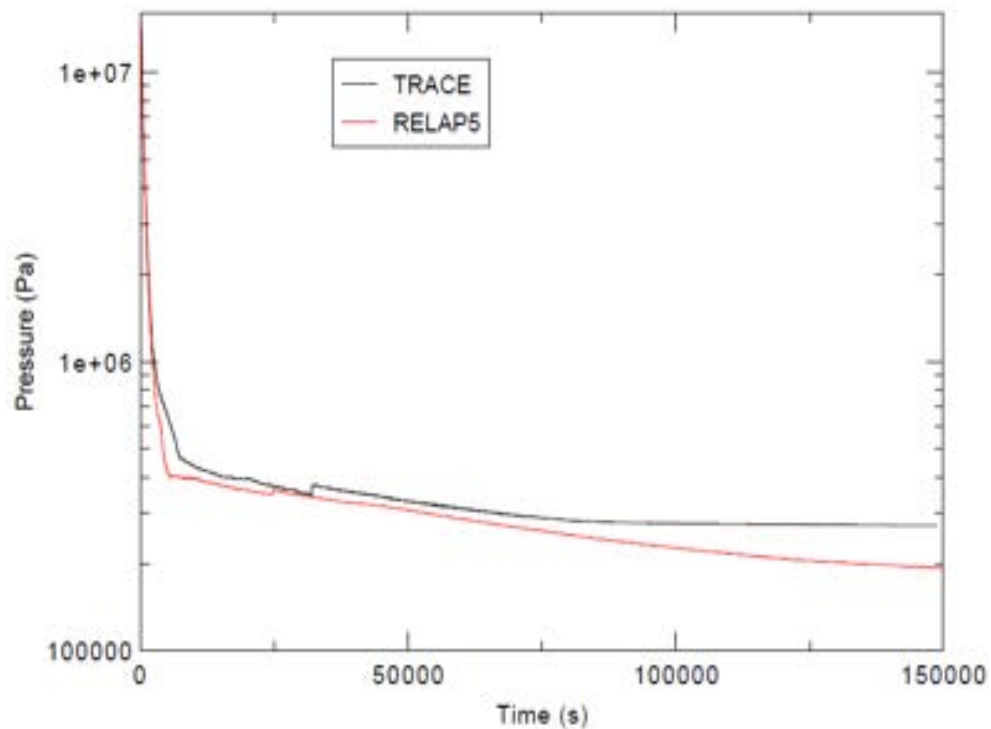


Figure 6-13: Pressione nel PRZ predetta dal codice TRACE e RELAP5.

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. M. D. Carelli, L.E. Conway, L. Oriani, B. Petrović, C.V. Lombardi, M.E. Ricotti, A.C.O. Barroso, J.M. Collado, L. Cinotti, N.E. Todreas, D. Grgić, M.M. Moraes, R.D. Boroughs, H. Ninokata, D.T. Ingersoll, F. Oriolo. The design and safety features of the IRIS reactor, *Nuclear Engineering and Design* 230 (2004) 151–167.
- [2]. M. Carelli, L. Conway, M. Dzodzo, A. Maioli, L. Oriani, G. Storricks, B. Petrovic, A. Achilli, G. Cattadori, C. Congiu, R. Ferri, M. Ricotti, D. Papini, F. Bianchi, P. Meloni, S. Monti, F. Berra, D. Grgic, G. Yoder, and A. Alemberti. The SPES3 Experimental Facility Design for the IRIS Reactor Simulation. Hindawi Publishing Corporation Science and Technology of Nuclear Installations Volume 2009, Article ID 579430, 12 pages doi:10.1155/2009/579430.
- [3]. Status of advanced light water reactor designs, 2004. IAEA-TECDOC-1391.
- [4]. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1624.
- [5]. T.K. Larson, F.J. Moody, G.E. Wilson, W.L. Brown, C. Frepoli, J. Hartz, B.G. Woods, L. Oriani. IRIS small break loca phenomena identification and ranking table (PIRT). *Nuclear Engineering and Design* 237 (2007) 618-626.
- [6]. R. Ferri, C. Congiu. Conceptual design of the SPES3-IRIS facility. SIET 01 334 RT 07 Rev.1. September 5, 2008.
- [7]. D. Papini. Tesi di Dottorato. Modelling and Experimental investigation of helical coil steam generator for IRIS Small-medium Modular Reactor. XXXIII cycle. Politecnico di Milano, January 2011.
- [8]. F.Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, M. Di liberto, P.A. Di Maio, I. Di Piazza, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella. TRACE input model for SPES3 facility. CIRTEN-UNIPAR-1208/2010.
- [9]. N. Reyes, Jr. Governing Equation in Two-Phase Fluid Natural Circulation Flows. IAEA TECDOC 1474 Natural Circulation In water cooled nuclear power plants. November 2005.
- [10]. F. Mascari, G. Vella, B.G. Woods, K. Welter, J. Pottorf, E. Young, M. Adorni, F. D’Auria. Sensitivity analysis of the MASLWR helical coil steam generator using TRACE. *Nuclear Engineering and Design* 241 (2011) 1137–1144.
- [11]. TRACE V5.0, Theory and User’s manuals, 2008. Division of System Analysis, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory
- [12]. Symbolic Nuclear Analysis Package (SNAP) Users Manual, April 2007. Applied Programming Technology, Inc. 240.

- [13]. Pierluigi Chiovaro, Pietro Alessandro Di Maio, Fulvio Mascari, Giuseppe Vella., “Analysys of the SPES-3 direct vessel injection line break by using trace code”. XXIX Congresso UIT sulla Trasmissione del Calore Torino, 20-22 Giugno 2011.