



Ricerca di Sistema elettrico

Fattibilità di una diversa configurazione della facility SPES-3

*C. Lombardo, M. Polidori, P. Chiovaro, S. D'Amico, P.A. Di Maio,
F. Mascari, I. Moscato, G. Vella*



FATTIBILITÀ DI UNA DIVERSA CONFIGURAZIONE DELLA FACILITY SPES-3

C. Lombardo, M. Polidori (ENEA), P. Chiovaro, S. D'Amico, P.A. Di Maio, F. Mascari, I. Moscato, G. Vella (Università di Palermo)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

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

Responsabile scientifico ENEA: Felice De Rosa.

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi

Titolo
FATTIBILITA' DI UNA DIVERSA CONFIGURAZIONE DELLA FACILITY SPES3
Descrittori
Tipologia del documento: Rapporto tecnico

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

Argomenti trattati: Reattori nucleari evolutivi
Sicurezza nucleare

Sommario

Il presente documento è stato preparato nel corso della prima annualità del PAR2012 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 ricerca volta alla valutazione della possibilità di completare la facility sperimentale SPES3 (simulatore integrale di SMR), parzialmente realizzata presso i laboratori SIET nel corso dei PAR precedenti, utilizzando componentistica e strumentazione esistente.

Preliminarmente, i risultati ottenuti da SIET con il modello di SPES-3 per il codice termoidraulico RELAP5 di un transitorio di station black-out sono stati confrontati con quelli ottenuti da un modello per codice TRACE.

Nella nuova configurazione proposta sono stati modificati principalmente la regione scaldante e il sistema di pompaggio del circuito primario con componenti derivati dalla facility SPES2.

Lo scopo principale delle valutazioni è la verifica della rappresentatività della nuova configurazione effettuata attraverso il confronto di due transitori accidentali opportunamente selezionati (SBO, rottura linea EBT) e simulati con il codice RELAP5. Nel caso di SBO, la nuova configurazione ha dato risultati comparabili con quella originale. Scostamenti non trascurabili sono ravvisati nel caso di rottura. Questo ha condotto all'analisi di possibili miglioramenti della configurazione proposta, mettendo in luce la necessità di ulteriori approfondimenti.

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, P.A. Di Maio, F. Mascari, I. Moscato, G. Vella (Università di Palermo)

Sigla documento rif. :CIRTEN-UNIPA RL- PAR 2011 1221/2013


Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	13/09/2013	NOME	Calogera Lombardo	Paride Meloni	Felice De Rosa
			FIRMA	<i>Calogera Lombardo</i>	<i>Paride Meloni</i>	<i>Felice De Rosa</i>
REV.	DESCRIZIONE	DATA	13/09/2013	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

INDICE

LISTA DELLE FIGURE.....	3
LISTA DELLE TABELLE	8
1. INTRODUZIONE	9
2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPES-3.....	11
2.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO DI SPES-3.....	13
2.2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA SECONDARIO DI SPES-3	14
2.3 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO DI SPES-3.....	14
3. DESCRIZIONE DEL CODICE TRACE.....	16
4. DESCRIZIONE DEL CODICE RELAP5/MOD3.3	17
5. SIMULAZIONE TRACE DEL TRANSITORIO DI SBO SU SPES-3	19
5.1 BREVE DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO SPES-3.....	19
5.2 ANALISI DEL TRANSITORIO DI SBO IN SPES-3 TRAMITE TRACE.....	22
5.3 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO.....	23
5.3.1 <i>SBO: perdita dell'energia elettrica esterna</i>	23
5.3.2 <i>Segnale di bassa portata nella FW: SCRAM del reattore e avaria della Start-Up FW....</i>	23
5.3.3 <i>Segnale di basso livello SGs: isolamento degli SGs ed intervento degli EHRS A e B. .</i>	24
5.3.4 <i>Segnale di bassa temperatura all'ingresso del core: intervento delle EBT.</i>	24
5.3.5 <i>Condizioni a lungo termine.</i>	25
5.4 CONCLUSIONI SULLA SIMULAZIONE DI SBO CON TRACE	44
6. NUOVA CONFIGURAZIONE DI SPES-3 E SIMULAZIONE RELAP5 DEL TRANSITORIO DI SBO.....	45
6.1 COMPONENTISTICA DISPONIBILE DA SPES-2	46
6.1.1 <i>Canale di potenza</i>	46
6.1.2 <i>Pompe</i>	47
6.2 IL MODELLO RELAP5 DI SPES-3	48
6.3 LE MODIFICHE APPORTATE AL MODELLO RELAP5.....	54
6.4 TRANSITORIO DI STATION BLACK-OUT (177)	61
6.4.1 <i>Descrizione del transitorio</i>	61
6.4.2 <i>Risultati del transitorio SBO (177)</i>	65
6.5 TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA LINEA SUPERIORE EBT-B (180).....	96
6.5.1 <i>Descrizione del transitorio</i>	97
6.5.2 <i>Risultati del transitorio di rottura della linea EBT (180)</i>	102
6.5.3 <i>Osservazioni sul transitorio di rottura</i>	160
6.6 VARIAZIONI AL NODING RELAP DELLA CONFIGURAZIONE SPES3_2013.....	160
7. CONCLUSIONI.....	165
ACRONIMI	167
BIBLIOGRAFIA	169
CURRICULUM PERSONALE CIRTEN	170

LISTA DELLE FIGURE

Fig. 2.1 – Vista generale di SPES-3.	12
Fig. 2.2 – Vista d’insieme dei sistemi EBT, ADS e LGMS di SPES-3.	13
Fig. 2.3 – Vista d’insieme dei sistemi RWST e EHRS di SPES-3.	14
Fig. 5.1 – Vista della nodalizzazione del circuito primario.	19
Fig. 5.2 – Vista della nodalizzazione del circuito secondario.	20
Fig. 5.3 – Coast-down della pompa del primario.	25
Fig. 5.4 – Prevalenza della pompa del primario	26
Fig. 5.5 – Portata check valve RI-DC (part.).	26
Fig. 5.6 – Portata check valve RI-DC.	27
Fig. 5.7 – Portata bypass della pompa (part.).	27
Fig. 5.8 – Portata bypass della pompa.	28
Fig. 5.9 – Portata elaborata dalla pompa.	28
Fig. 5.10 – Potenza scambiata nei generatori di vapore (part.).	29
Fig. 5.11 – Frazione di vuoto del fluido in ingresso alla pompa.	29
Fig. 5.12 – Portata nei secondari dei generatori di vapore (part.).	30
Fig. 5.13 – Portata nei secondari dei generatori di vapore.	30
Fig. 5.14 – Potenza generata nel core e scambiata nei generatori di vapore (part.).	31
Fig. 5.15 – Potenza generata nel core e scambiata nei generatori di vapore.	31
Fig. 5.16 – Livello di liquido nei generatori di vapore (part.).	32
Fig. 5.17 – Livello di liquido nei generatori di vapore.	32
Fig. 5.18 – Portata di liquido iniettata dal sistema EHRS-A, B e C (part.).	33
Fig. 5.19 – Portata di liquido iniettata dal sistema EHRS-A, B e C.	33
Fig. 5.20 – Potenza asportata dal sistema EHRS-A e B (part.).	34
Fig. 5.21 – Potenza asportata dal sistema EHRS-A e B.	34
Fig. 5.22 – Temperatura del fluido nel sistema RWST-A e B.	35
Fig. 5.23 – Massa del fluido nel sistema RWST-A e B.	35
Fig. 5.24 – Livello di liquido nel sistema RWST-A e B.	36
Fig. 5.25 – Portata attraverso il core e il by-pass del core (part.).	36
Fig. 5.26 – Portata attraverso il core e il by-pass del core.	37
Fig. 5.27 – Pressione nei secondari del generatore di vapore (part.).	37
Fig. 5.28 – Pressione nei secondari del generatore di vapore.	38
Fig. 5.29 – Pressione nel PRZ (part.).	38
Fig. 5.30 – Pressione nel PRZ.	39
Fig. 5.31 – Temperatura del fluido in ingresso e in uscita dal core (part.).	39
Fig. 5.32 – Temperatura del fluido in ingresso e in uscita dal core.	40
Fig. 5.33 – Grado di vuoto nel core.	40
Fig. 5.34 – Temperatura di parete nel canale di potenza (part.).	41
Fig. 5.35 – Temperatura di parete nel canale di potenza.	41
Fig. 5.36 – Livello di liquido nel PRZ.	42
Fig. 5.37 – Livello di liquido nel down comer e nel riser del RPV.	42
Fig. 5.38 – Livello di liquido nel sistema EBT.	43
Fig. 5.39 – Portata di fluido iniettata dal sistema EBT nella balance line del RPV.	43
Fig. 5.40 – Portata di fluido iniettata dal sistema nel RPV.	44
Fig. 6.1 – Nodalizzazione circuito primario SPES-3.	49
Fig. 6.2 – Nodalizzazione circuito secondario A e EHRS-A SPES-3.	50
Fig. 6.3 – Nodalizzazione circuito secondario B e EHRS-B SPES-3.	51

Fig. 6.4 – Nodalizzazione circuito secondario C e EHRS-C SPES-3.	52
Fig. 6.5 – Nodalizzazione sistema di contenimento SPES-3.	53
Fig. 6.6 – Modifiche apportate all’RV di SPES-3.	55
Fig. 6.7 – Modifiche apportate alla regione core di SPES2.	56
Fig. 6.8 – Particolare della nodalizzazione della nuova regione core.	57
Fig. 6.9 – Schema delle modifiche apportate alla regione pompe.	58
Fig. 6.10 – Particolare della nodalizzazione della nuova regione pompe.	58
Fig. 6.11 – Nodalizzazione del nuovo circuito primario.	60
Fig. 6.12 – Velocità della pompa SPES3.	65
Fig. 6.13 – Velocità delle pompe SPES3_2013.	65
Fig. 6.14 – Head della pompa SPES3.	66
Fig. 6.15 – Head delle pompe SPES3_2013.	66
Fig. 6.16 – Portata check valve RI-DC in SPES3 (part.).	67
Fig. 6.17 – Portata check valve RI-DC in SPES3_2013 (part.).	67
Fig. 6.18 – Portata check valve RI-DC in SPES3.	68
Fig. 6.19 – Portata check valve RI-DC in SPES3_2013.	68
Fig. 6.20 – Portata bypass della pompa in SPES3 (part.).	69
Fig. 6.21 – Portata bypass delle pompe in SPES3_2013 (part.).	69
Fig. 6.22 – Potenza rimossa dai secondari SG in SPES3 (part.).	70
Fig. 6.23 – Potenza rimossa dai secondari SG in SPES3_2013 (part.).	70
Fig. 6.24 – Frazione di liquido in ingresso pompa SPES3 (part.).	71
Fig. 6.25 – Frazione di liquido in ingresso pompe SPES3_2013 (part.).	71
Fig. 6.26 – Portata degli SGs SPES3 (part.).	72
Fig. 6.27 – Portata degli SGs SPES3_2013 (part.).	72
Fig. 6.28 – Portata degli SGs SPES3.	73
Fig. 6.29 – Portata degli SGs SPES3_2013.	73
Fig. 6.30 – Potenza totale del core e degli SGs SPES3 (part.).	74
Fig. 6.31 – Potenza totale del core e degli SGs SPES3_2013 (part.).	74
Fig. 6.32 – Potenza totale del core e degli SGs SPES3.	75
Fig. 6.33 – Potenza totale del core e degli SGs SPES3_2013.	75
Fig. 6.34 – Livello collassato nei secondari SGs in SPES3 (part.).	76
Fig. 6.35 – Livello collassato nei secondari SGs in SPES3_2013 (part.).	76
Fig. 6.36 – Livello collassato nei secondari SGs in SPES3.	77
Fig. 6.37 – Livello collassato nei secondari SGs in SPES3_2013.	77
Fig. 6.38 – Portata degli EHRS in SPES3 (part.).	78
Fig. 6.39 – Portata degli EHRS in SPES3_2013 (part.).	78
Fig. 6.40 – Portata degli EHRS in SPES3.	79
Fig. 6.41 – Portata degli EHRS in SPES3_2013.	79
Fig. 6.42 – Potenza rimossa dagli EHRS in SPES3 (part.).	80
Fig. 6.43 – Potenza rimossa dagli EHRS in SPES3_2013 (part.).	80
Fig. 6.44 – Potenza rimossa dagli EHRS in SPES3.	81
Fig. 6.45 – Potenza rimossa dagli EHRS in SPES3_2013.	81
Fig. 6.46 – Temperatura degli RWST in SPES3.	82
Fig. 6.47 – Temperatura degli RWST in SPES3_2013.	82
Fig. 6.48 – Massa degli RWST in SPES3.	83
Fig. 6.49 – Massa degli RWST in SPES3_2013.	83
Fig. 6.50 – Portata del core SPES3.	84
Fig. 6.51 – Portata del core SPES3_2013.	84

Fig. 6.52 – Pressione in uscita dagli SG lato secondario in SPES3 (part.).	85
Fig. 6.53 – Pressione in uscita dagli SG lato secondario in SPES3_2013 (part.).	85
Fig. 6.54 – Pressione in uscita dagli SG lato secondario in SPES3.	86
Fig. 6.55 – Pressione in uscita dagli SG lato secondario in SPES3_2013.	86
Fig. 6.56 – Confronto delle pressioni del circuito primario (part.).	87
Fig. 6.57 – Confronto delle pressioni del circuito primario.	87
Fig. 6.58 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita core (part.).	88
Fig. 6.59 – Confronto delle temperature ingresso/uscita core.	88
Fig. 6.60 – Temperature ingresso/uscita e saturazione del core SPES3.	89
Fig. 6.61 – Temperature ingresso/uscita e saturazione del core SPES3_2013.	89
Fig. 6.62 – Frazione di liquido nel core di SPES3.	90
Fig. 6.63 – Frazione di liquido nel core di SPES3_2013.	90
Fig. 6.64 – Confronto livello del pressurizzatore (part.).	91
Fig. 6.65 – Confronto livello del downcomer.	91
Fig. 6.66 – Confronto portata di iniezione degli EBT (part.).	92
Fig. 6.67 – Confronto portata delle balance line degli EBT (part.).	92
Fig. 6.68 – Confronto portata delle DVI (part.).	93
Fig. 6.69 – Confronto livello degli EBT.	93
Fig. 6.70 – Confronto delle masse di liquido negli RPV.	94
Fig. 6.71 – Confronto delle temperature delle barre scaldanti (part.).	94
Fig. 6.72 – Confronto delle temperature delle barre scaldanti.	95
Fig. 6.73 – Portata attraverso la rottura in SPES3 (part.).	102
Fig. 6.74 – Portata attraverso la rottura in SPES3_2013 (part.).	102
Fig. 6.75 – Portata attraverso la rottura in SPES3.	103
Fig. 6.76 – Portata attraverso la rottura in SPES3_2013.	103
Fig. 6.77 – Frazione di liquido della miscela all’uscita della rottura in SPES3.	104
Fig. 6.78 – Frazione di liquido della miscela all’uscita della rottura in SPES3_2013 .	104
Fig. 6.79 – Pressione nel PRZ (part.).	105
Fig. 6.80 – Pressione nel PRZ.	105
Fig. 6.81 – Pressione nel DW (part.).	106
Fig. 6.82 – Pressione nel DW.	106
Fig. 6.83 – Pressione nel PRZ e nel DW in SPES3.	107
Fig. 6.84 – Pressione nel PRZ e nel DW in SPES3_2013.	107
Fig. 6.85 – Portata attraverso la “vent line” A e B del PPS in SPES3 (part.).	108
Fig. 6.86 – Portata attraverso la “vent line” A e B del PPS in SPES3_2013 (part.).	108
Fig. 6.87 – Portata attraverso la “vent line” A e B del PPS in SPES3.	109
Fig. 6.88 – Portata attraverso la “vent line” A e B del PPS in SPES3_2013.	109
Fig. 6.89 – Quality della miscela in uscita dal DW in SPES3 (part.).	110
Fig. 6.90 – Quality della miscela in uscita dal DW in SPES3_2013 (part.).	110
Fig. 6.91 – Quality della miscela in uscita dal DW in SPES3.	111
Fig. 6.92 – Quality della miscela in uscita dal DW in SPES3 (part.).	111
Fig. 6.93 – Pressione nel sistema PSS A e B (part.).	112
Fig. 6.94 – Pressione nel sistema PSS A e B.	112
Fig. 6.95 – Pressione nel sistema LGMS PSS A e B (part.).	113
Fig. 6.96 – Pressione nel sistema LGMS PSS A e B.	113
Fig. 6.97 – Temperatura del fluido del sistema PSS A e B in SPES3 (part.).	114
Fig. 6.98 – Temperatura del fluido del sistema PSS A e B in SPES3_2013 (part.).	114
Fig. 6.99 – Temperatura del fluido del sistema PSS A e B in SPES3.	115

Fig. 6.100 – Temperatura del fluido del sistema PSS A e B in SPES3_2013.	115
Fig. 6.101 – Potenza prodotta dal core e asportata dagli SGs in SPES3 (part.).	116
Fig. 6.102 – Potenza prodotta dal core e asportata dagli SGs in SPES3_2013 (part.).	116
Fig. 6.103 – Potenza prodotta dal core e asportata dagli SGs in SPES3.	117
Fig. 6.104 – Potenza prodotta dal core e asportata dagli SGs in SPES3_2013.	117
Fig. 6.105 – Portata lato secondario dei SGs in SPES3.	118
Fig. 6.106 – Portata lato secondario dei SGs in SPES3_2013.	118
Fig. 6.107 – Pressione lato secondario dei SGs in SPES3 (part.).	119
Fig. 6.108 – Pressione lato secondario dei SGs in SPES3_2013 (part.).	119
Fig. 6.109 – Pressione lato secondario dei SGs in SPES3 (part.).	120
Fig. 6.110 – Pressione lato secondario dei SGs in SPES3_2013 (part.).	120
Fig. 6.111 – Livello nel secondario dei SGs in SPES3 (part.).	121
Fig. 6.112 – Livello nel secondario dei SGs in SPES3_2013 (part.).	121
Fig. 6.113 – Livello nel secondario dei SGs in SPES3.	122
Fig. 6.114 – Livello nel secondario dei SGs in SPES3_2013.	122
Fig. 6.115 – Livello di liquido nel PRZ.	123
Fig. 6.116 – Grado di vuoto all’ingresso della pompa del primario.	123
Fig. 6.117 – Portata attraverso il core in SPES3 (part.).	124
Fig. 6.118 – Portata attraverso il core in SPES3_2013 (part.).	124
Fig. 6.119 – Portata attraverso il core in SPES3.	125
Fig. 6.120 – Portata attraverso il core in SPES3_2013.	125
Fig. 6.121 – Portata tra RI e DC in SPES3 (part.).	126
Fig. 6.122 – Portata tra RI e DC in SPES3_2013 (part.).	126
Fig. 6.123 – Portata tra RI e DC in SPES3.	127
Fig. 6.124 – Portata tra RI e DC in SPES3_2013.	127
Fig. 6.125 – Portata ADS I stadio in SPES3 (part.).	128
Fig. 6.126 – Portata ADS I stadio in SPES3_2013 (part.).	128
Fig. 6.127 – Portata ADS I stadio in SPES3.	129
Fig. 6.128 – Portata ADS I stadio in SPES3_2013.	129
Fig. 6.129 – Portata ADS I stadio e grado di vuoto nel PRZ in SPES3.	130
Fig. 6.130 – Portata ADS I stadio e grado di vuoto nel PRZ in SPES3_2013.	130
Fig. 6.131 – Portata ADS II stadio in SPES3 (part.).	131
Fig. 6.132 – Portata ADS II stadio in SPES3_2013 (part.).	131
Fig. 6.133 – Portata ADS II stadio in SPES3.	132
Fig. 6.134 – Portata ADS II stadio in SPES3_2013.	132
Fig. 6.135 – Portata ADS II stadio e grado di vuoto nel PRZ in SPES3.	133
Fig. 6.136 – Portata ADS II stadio e grado di vuoto nel PRZ in SPES3_2013.	133
Fig. 6.137 – Portata iniettata dal sistema EBT A e B.	134
Fig. 6.138 – Inventario di massa del sistema EBT A e B.	134
Fig. 6.139 – Livello di liquido nel sistema EBT A e B.	135
Fig. 6.140 – Portata nella “balance line” del sistema EBT A e B in SPES3 (part.).	136
Fig. 6.141 – Portata nella “balance line” del sistema EBT A e B in SPES3_2013 (part.).	136
Fig. 6.142 – Portata nella “balance line” del sistema EBT A e B in SPES3.	137
Fig. 6.143 – Portata nella “balance line” del sistema EBT A e B in SPES3_2013.	137
Fig. 6.144 – Grado di vuoto nel core in SPES3 (part.).	138
Fig. 6.145 – Grado di vuoto nel core in SPES3_2013 (part.).	138
Fig. 6.146 – Grado di vuoto nel core in SPES3.	139
Fig. 6.147 – Grado di vuoto nel core in SPES3_2013.	139

Fig. 6.148 – Temperatura del fluido ingresso uscita core (part.).	140
Fig. 6.149 – Temperatura del fluido ingresso uscita core.	140
Fig. 6.150 – Temperatura del canale di potenza in SPES3.	141
Fig. 6.151 – Temperatura del canale di potenza in SPES3_2013.	141
Fig. 6.152 – Temperatura del canale di potenza in SPES3_2013 (part.).	142
Fig. 6.153 – Inventario di massa nel RPV.	142
Fig. 6.154 – Portata attraverso il sistema PCC.	143
Fig. 6.155 – Livello di liquido nel sistema PCC.	143
Fig. 6.156 – Temperatura fluido ingresso uscita dal sistema PCC in SPES3.	144
Fig. 6.157 – Temperatura fluido ingresso uscita dal sistema PCC in SPES3_2013.	144
Fig. 6.158 – Gradi di vuoto del fluido del sistema PCC in SPES3 (part.).	145
Fig. 6.159 – Gradi di vuoto del fluido del sistema PCC in SPES3_2013 (part.).	145
Fig. 6.160 – Gradi di vuoto del fluido del sistema PCC in SPES3.	146
Fig. 6.161 – Gradi di vuoto del fluido del sistema PCC in SPES3_2013.	146
Fig. 6.162 – Potenza asportata dal sistema PCC (part.).	147
Fig. 6.163 – Potenza asportata dal sistema PCC.	147
Fig. 6.164 – Portata iniettata dal sistema LGMS - A e B in SPES3.	148
Fig. 6.165 – Portata iniettata dal sistema LGMS - A e B in SPES3_2013.	148
Fig. 6.166 – Inventario di massa nel sistema LGMS - A e B.	149
Fig. 6.167 – Livello di liquido nel sistema LGMS - A e B.	149
Fig. 6.168 – Pressione nel sistema PSS - A e B e nel DW in SPES3 (part.).	150
Fig. 6.169 – Pressione nel sistema PSS - A e B e nel DW in SPES3_2013 (part.).	150
Fig. 6.170 – Pressione nel sistema PSS - A e B e nel DW in SPES3.	151
Fig. 6.171 – Pressione nel sistema PSS - A e B e nel DW in SPES3_2013.	151
Fig. 6.172 – Livello di liquido nella “vent” A e B del sistema PSS in SPES3.	152
Fig. 6.173 – Livello di liquido nella “vent” A e B del sistema PSS in SPES3_2013.	152
Fig. 6.174 – Livello di liquido nel sistema PSS - A e B (part.).	153
Fig. 6.175 – Livello di liquido nel sistema PSS - A e B.	153
Fig. 6.176 – Inventario di massa nel sistema PSS - A e B.	154
Fig. 6.177 – Livello di liquido in RC.	154
Fig. 6.178 – Portata tra RC DVI A e B in SPES3.	155
Fig. 6.179 – Portata tra RC DVI A e B in SPES3_2013.	155
Fig. 6.180 – Portata attraverso la DVI A e B in SPES3.	156
Fig. 6.181 – Portata attraverso la DVI A e B in SPES3.	156
Fig. 6.182 – Livello di liquido nel DW.	157
Fig. 6.183 – Inventario di massa nel DW.	157
Fig. 6.184 – Portata di gas e di liquido tra DW e RC in SPES3.	158
Fig. 6.185 – Portata di gas e di liquido tra DW e RC in SPES3_2013.	158
Fig. 6.186 – Livello di liquido nel sistema QT.	159
Fig. 6.187 – Inventario di massa nel sistema QT.	159
Fig. 6.188 – Inventario di massa del circuito primario.	160
Fig. 6.189 – Temperatura del canale di potenza.	162
Fig. 6.190 – Portata in circolazione naturale.	162
Fig. 6.191 – Portata in circolazione naturale.	163
Fig. 6.192 – Temperatura del canale di potenza.	163
Fig. 6.193 – Coastdown delle pompe del primario.	164
Fig. 6.194 – Temperatura del canale di potenza.	164

LISTA DELLE TABELLE

Tab. 2.1 – Condizioni nominali dell'impianto SPES-3.	11
Tab. 5.1 – Componenti utilizzati nella nodalizzazione TRACE.	21
Tab. 5.2 – Condizioni iniziali.	22
Tab. 6.1 – Caratteristiche principali del canale di SPES-2.	46
Tab. 6.2 – Caratteristiche principali delle pompe di SPES-2.	47

1. INTRODUZIONE

Gli strumenti di calcolo e le metodologie utilizzati per le verifiche di sicurezza nei reattori attuali e per supportare il progetto dei reattori innovativi richiedono di essere validati e qualificati a fronte di appropriate prove sperimentali. Tali prove devono riguardare sia specifiche fenomenologie (separate effect tests) che il comportamento integrale di sistema (integral tests).

Nei PAR precedenti sono stati effettuati cospicui investimenti e condotti numerosi studi per la costruzione della facility integrale SPES-3 capace di simulare il comportamento in fase operativa e incidentale, di un generico impianto SMR innovativo. L'impianto permetterebbe oltre la valutazione dei principi di sicurezza intrinseca che sono alla base del "safety by design" dei reattori innovativi, anche la validazione-verifica dei codici termoidraulici di sistema utilizzati per la simulazione di reattori. Attualmente la facility, ubicata presso i laboratori della SIET di Piacenza, è realizzata per circa il 50%. Infatti risultano:

- completati il progetto operativo e la struttura portante della facility;
- acquistati e montati i serbatoi per il sistema di contenimento, le piscine e gli scambiatori del sistema di rimozione del calore residuo ed il trasformatore della stazione elettrica;
- acquisita parte della strumentazione commerciale, mentre è in fase di sviluppo avanzato la strumentazione speciale per la misura della portata bifase (sonda capacitiva).

A partire da un impianto realizzato ad hoc sono state condotte le verifiche sperimentali delle prestazioni di due tipologie di elementi scaldanti per il canale di potenza di SPES-3 sia in condizioni di potenza nominale che in condizioni rappresentative di eventi incidentali.

Inoltre le verifiche numeriche effettuate con il codice RELAP5 hanno confermato la sufficiente flessibilità dell'impianto SPES-3, progettato nel precedente triennio, per simulare condizioni incidentali di progetto (Design Basic Event) in impianti SMR di diversa taglia pur mantenendo lo stesso layout impiantistico. Ulteriori analisi effettuate a seguito dell'evento di Fukushima hanno dimostrato la capacità dell'impianto di simulare condizioni incidentali estreme (Beyond Design Basic Event) inclusa una sequenza incidentale del tipo accaduto sugli impianti di Fukushima.

L'obiettivo della presente attività è di valutare la possibilità di completare la facility SPES-3 utilizzando componentistica e strumentazione già esistente.

Dato che l'impianto SPES-3 è stato sempre simulato da SIET con il codice di termoidraulica di sistema RELAP5, in primo luogo si è deciso di condurre una verifica dei risultati ottenuti da SIET attraverso il confronto con i risultati ottenuti da un analogo modello sviluppato per il codice TRACE. Un transitorio di Station Black-Out (SBO) è stato preso in considerazione.

In parallelo, è stato effettuato uno studio di fattibilità relativo alla configurazione di un impianto che preveda l'utilizzo combinato dei componenti esistenti delle facility SPES-2 e SPES-3. Di tale nuova configurazione è stata valutata la rappresentatività nei confronti di tutte quelle fenomenologie ritenute critiche nell'accoppiamento "circuito primario - contenimento" e l'adeguatezza al suo utilizzo ai fini della validazione dei codici termoidraulici di sicurezza. A tal fine, un transitorio di SBO (transitorio-177) e uno di rottura da 4" equivalenti della linea superiore EBT (transitorio-180) sono stati considerati adeguati alle verifiche richieste. I risultati ottenuti nella nuova configurazione saranno messi a confronto con quanto ottenuto nella configurazione originale da SIET.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 - 009	0	L	10	170

Lo studio ha preso in considerazione, nel dettaglio, tutti gli aspetti critici, in particolare quelli derivanti dalla necessità di utilizzo di componenti esistenti, riducendo all'indispensabile gli interventi di modifica dell'hardware.

2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPES-3

L'impianto sperimentale SPES-3 include il sistema primario, il sistema secondario, il sistema di contenimento e i sistemi di sicurezza.

Il fluido di processo è acqua, e la potenza massima è di 6.5 MW. La pressione e la temperatura di progetto del sistema primario sono di 17.25 MPa e di 353.5 °C (temperatura di saturazione alla pressione di 17.25 MPa). Gli stessi valori di progetto, sia della pressione che della temperatura, vengono assunti anche per il sistema secondario e i sistemi di rimozione del calore in condizione di emergenza. I valori di progetto di pressione e temperatura del sistema di contenimento sono invece di 2 MPa e di 212.4 °C (temperatura di saturazione alla pressione di 2 MPa).

Il fattore di scaling della facility (rispetto all'impianto IRIS) è di 1:100 riguardo al volume mentre tale rapporto è di 1:1 riguardo alle altezze.

I principali parametri preservati attraverso lo scaling sono:

1. condizioni termodinamiche del fluido (temperatura, pressione, entalpia)
2. elevazione verticale
3. rapporto tra la potenza ed il volume del fluido (tale rapporto non risulta effettivamente conservata in condizioni stazionarie e nei primi istanti dei transitori in quanto la potenza elettrica disponibile in SIET è di 6.5 MW)
4. rapporto tra la potenza ed il flusso
5. il tempo di transito del fluido
6. il flusso termico
7. le perdite di carico del circuito.

Lo schema d'insieme e le condizioni nominali della facility SPES-3 vengono riportate rispettivamente nella Tab. 2.1 e nella Fig. 2.1.

Tab. 2.1 – Condizioni nominali dell'impianto SPES-3.

		Circuito primario	SG-A	SG-B	SG-C	EBTA/B	QT	DW	PSSA/B	RC	LGMS/A	RWST A/B	RWST C
Pressione [MPa]	PRZ	15,51	6,01	6,01	6,03	Primario	Cont	0,1013	Cont	Cont	Cont	0,1013	0,1013
	Pump Head	0,041											
T _{in} [°C]		290,6	223,8	223,8	223,8	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	20	20
T _{out} [°C]		328,5	324,8	324,4	324,3								
ΔT [°C]		37,9	101	100,6	100,5								
Surriscaldamento [°C]			49,1	48,7	48,7								
Portata primario [kgs ⁻¹]	Core	29,566	0,8125	0,8125	1,619								
	Bypass	1,342											
Potenza [MW]		6,5	1,625	1,624	3,246								
Livello collassato [m]		2,145	1,466	1,625	1,64	3,14	0	0	3,77	0	2,454	6,961	6,954
Massa [kg]		3322				127			1480		985	11869	11876

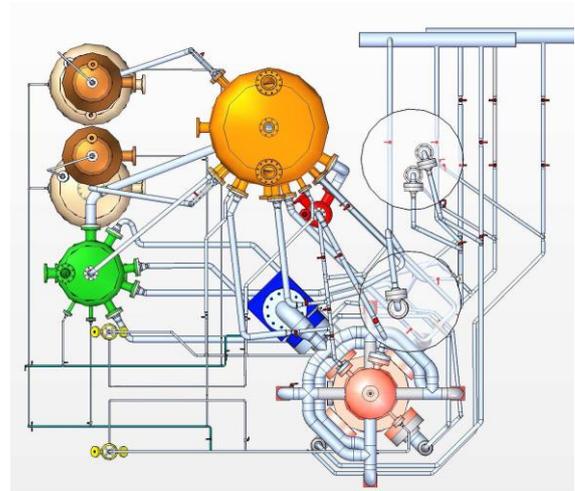
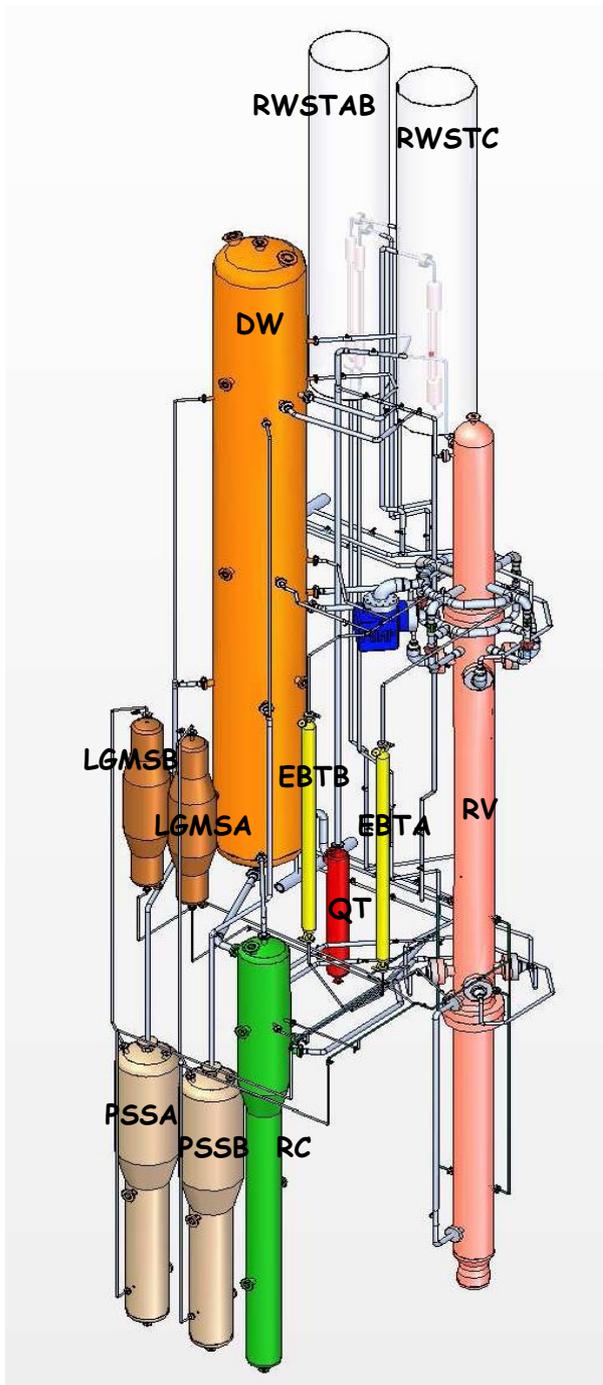


Fig. 2.1 – Vista generale di SPES-3.

2.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA PRIMARIO DI SPES-3

Il sistema primario è costituito da:

- Reactor Pressure Vessel (RPV) che include il canale di potenza, i tubi elicoidali del lato primario dei generatori di vapore, le pompe di circolazione e il pressurizzatore,
- Emergency Boration Tank (EBT): recipienti contenenti come fluido di refrigerazione di emergenza acqua borata.

Il RPV è un cilindro in pressione costituito da 3 parti principali flangiate tra loro. La parte in basso contiene il canale di potenza il lower downcomer e i supporti del canale. La parte intermedia contiene il riser, l'upper downcomer e i 3 scambiatori di calore. Nella parte alta del RPV è contenuto il pressurizzatore mentre il by pass del core è rappresentato da un tubo esterno. Inoltre il RPV è equipaggiato con una serie di bocchelli che consentono la penetrazione delle linee di adduzione dell'acqua ai secondari dei generatori di vapore, delle linee di scarico del vapore dai secondari dei generatori, delle DVI etc...

L'elevazione del canale di potenza è mantenuta uguale a quella di un elemento di combustibile standard di Westinghouse del tipo 17x17 così come il passo ed il diametro. Il numero delle barrette è scalato di un fattore 1:100 (235 barrette scaldate e una dummy centrale). L'altezza attiva del canale di potenza è di 4.191 m, mentre alla base e alla sommità della parte scaldante del canale di potenza sono presi in considerazione dei tratti di altezza 0.254 m e 0.406 m rispettivamente in modo che l'altezza totale del canale di potenza risulti pari a 4.851 m. Inoltre, alla base il canale presenta un tratto di 0.5 m che uscendo dal RPV, ne consente il collegamento elettrico. Le barrette sono mantenute in posizione grazie alla presenza di 14 griglie distanziatrici posizionate a differenti altezze lungo il canale.

Il limitato spazio disponibile dentro al RPV non consente di inserirvi le pompe all'interno, quindi il sistema è servito da un'unica pompa esterna che provvede alla distribuzione dell'acqua ai tre generatori di vapore.

Il pressurizzatore a forma di 'cappello invertito' è tale da preservare l'elevazione dell'impianto e l'altezza del pressurizzatore stesso.

Il sistema EBT è costituito da due recipienti cilindrici (volume di 0.178 m³, diametro di 0.204 m e altezza di 5.5 m) riempiti con acqua borata, a pressione pari a quella del primario e bassa temperatura, capaci di intervenire, ad esempio, in caso transitorio del tipo ATWS (Anticipated Transient Without Scram) mantenendo il sistema primario in condizioni di sottocriticità. Il sistema EBT è collegato al circuito primario attraverso delle linee di scarico chiamate DVI (vedi Fig. 2.2).

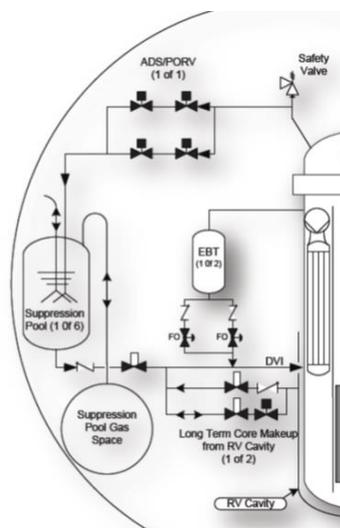


Fig. 2.2 – Vista d'insieme dei sistemi EBT, ADS e LGMS di SPES-3.

2.2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA SECONDARIO DI SPES-3

Il sistema secondario della facility SPES-3 è costituito da:

- Lato secondario dei generatori di vapore
- Emergency Heat Removal System (EHRS) ;
- Refuelling Water Storage Tank (RWST).

Il sistema EHRS ha il compito di rimuovere il calore residuo in condizioni incidentali, ad esempio in caso di incidenti di: rottura della linea di adduzione del vapore in turbina (SLB), rottura della linea di alimentazione del secondario dei generatori di vapore (FLB), di perdita del pozzo freddo (LOHS), perdita di refrigerante primario (LOCA). Accoppiato al sistema EHRS ritroviamo la piscina che rappresenta il RWST, con un volume di 12 m³ base di 1.33 m² e altezza di 9 m, all'interno del quale viene inserito lo scambiatore di calore del sistema EHRS (vedi Fig. 2.3).

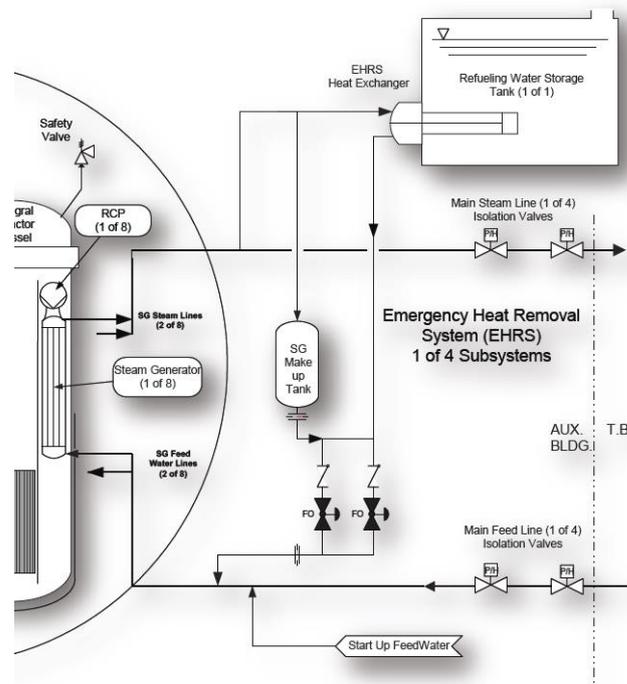


Fig. 2.3 – Vista d'insieme dei sistemi RWST e EHRS di SPES-3.

2.3 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO DI SPES-3

Il sistema di contenimento è costituito da:

- dry well (DW),
- PCC
- quench tank (QT),
- reactor vessel cavity (RVC) ,
- Pressure Suppression System (PSS),
- Long term Gravity Make-up System (LGMS)

Il DW è rappresentato da un vessel cilindrico di volume pari a 35.36 m^3 con altezza di 15.9 m.

Il sistema PCC è rappresentato da un condensatore installato nella parte alta del DW. Esso è capace di rimuovere il calore residuo dell'edificio di contenimento in seguito al verificarsi di un ipotetico incidente durante il quale il sistema EHRS non dovesse funzionare. Esso è stato progettato per rimuovere fino a 0.5 MW di potenza ed è costituito da un bundle di 12 tubi ad U orizzontali di AISI 304, di lunghezza complessiva di circa 2.8 m.

La QT è rappresentata da vessel cilindrico di volume pari a 0.336 m^3 con altezza di 3.2 m.

Il sistema RVC insieme con le DVI sono simulate tramite un unico recipiente cilindrico (caratterizzato da due differenti sezioni) del volume totale di 5 m^3 e 11 m di altezza.

La parte inferiore del vessel ha un volume di 17 m^3 e 7 m di altezza, la parte superiore invece ha un volume di 3.30 m^3 e 4 m di altezza.

Il sistema ADS è costituito da due treni di valvole di sicurezza che hanno il compito di equilibrare la pressione tra il circuito primario e il sistema di contenimento in caso di incidente di LOCA (vedi Fig. 2.2).

Il sistema PSS è costituito da due recipienti con volume di 5.01 m^3 . Ciascuno dei recipienti consiste di due differenti recipienti cilindrici connessi tra loro da una sezione conica (il recipiente cilindrico in basso ha un volume di 1.5 m^3 e un'altezza di 4 m; il recipiente cilindrico in alto ha un volume di 3.51 m^3 e un'altezza di 3 m) (vedi Fig. 2.2).

Il sistema LGMS è simulato da un vessel cilindrico a tre differenti sezioni, raccordate tra loro da sezioni coniche. Il volume totale del vessel è di 1.663 m^3 mentre la sua altezza è pari a 4.2 m.

3. DESCRIZIONE DEL CODICE TRACE

TRACE [1] (TRAC/RELAP Advanced Computational Engine) è un codice di calcolo messo a punto per eseguire analisi di incidenti di perdita di refrigerante (LOCAs), di transitori operativi e di altri scenari incidentali in reattori ad acqua leggera sia del tipo pressurizzati (PWR) che bollenti (BWR). Esso può inoltre descrivere i fenomeni che si verificano all'interno delle facilities sperimentali progettate e costruite per simulare i transitori incidentali tipici degli impianti nucleari.

Il codice include:

- modelli multidimensionali per flussi bifasi,
- modelli termo-dinamici in condizioni di non equilibrio,
- modelli di scambio termico generalizzato,
- modelli di reflood,
- modelli di cinetica del reattore.

Il codice tratta la termoidraulica del fluido termovettore tramite l'applicazione di un modello a due fluidi (liquido e vapore) risolvendo 6 equazioni di bilancio e permettendo la simulazione esplicita del flusso controcorrente. Descrive inoltre il comportamento dei gas non condensabili e di soluti anche in concentrazione superiore al valore di solubilità.

TRACE consente la modellazione di un impianto nucleare tramite l'impiego di vari singoli elementi tra loro collegati in modo opportuno. Ogni singolo pezzo fisico del circuito che si vuole schematizzare può essere rappresentato da vari tipi di componenti, e ciascun componente può essere ulteriormente nodalizzato con un certo numero di volumi fisici (chiamati anche celle) all'interno dei quali le proprietà fisiche di fluidi sono da intendere come valori medi e le equazioni di conduzione e di conservazione dell'energia cinetica vengono risolte, anche esse, in forma media. Il numero di componenti con il quale schematizzare un determinato impianto ed il modo in cui essi sono accoppiati è del tutto arbitrario. Gli elementi HTSTR e REPEAT - HTSTR sono dei componenti che servono a modellare gli elementi di combustibile e le pareti scaldate e che servono a simulare i fenomeni di conduzione in geometria bidimensionale e di convezione in geometria cilindrica e cartesiana. Il componente chiamato POWER consente di fornire energia al fluido attraverso il componente HTSTR o le pareti dei componenti idraulici. Il componente FLPOWER è capace di fornire energia direttamente al fluido. Il componente RADENC può essere utilizzato per simulare il trasferimento di calore di radiazione tra più superfici arbitrarie. I componenti FILL e BREAK invece sono utilizzati sia per imporre particolari condizioni al contorno nel sistema all'esame, rispettivamente valori di portata il primo e di pressione il secondo, sia per raggiungere le condizioni di stazionarietà che per calcoli di transitori. Il componente EXTERIOR può utilizzarsi per facilitare lo sviluppo di modelli di input attraverso i quali potere sfruttare la potenzialità offerta da TRACE di esecuzione in parallelo. I tempi di esecuzione del codice sono fortemente dipendenti dalle prestazioni del computer su cui il codice viene fatto girare, dal numero totale delle celle scelto per la nodalizzazione, dal passo temporale scelto e dalla velocità di variazione dei fenomeni sia di natura neutronica che termoidraulica durante l'esecuzione dell'analisi. Anche i modelli e le correlazioni interne al codice possono avere un impatto significativo sulla velocità di calcolo; spesso infatti influiscono sul numero di iterazioni necessarie per il raggiungimento della stabilità del calcolo stesso. A causa di ciò e del fatto che i modelli e le correlazioni influiscono fortemente sull'accuratezza dei risultati forniti dal codice, l'area di sviluppo dei modelli e delle correlazioni richiede continui e significativi sforzi al fine di migliorarne le prestazioni generali.

Come conseguenza della possibilità di descrivere in modo dettagliato la geometria degli impianti di cui si vuole indagare il comportamento, il codice TRACE consente di simulare

fenomeni fisici particolarmente importanti nelle analisi di transitori del tipo “large-break” e “small-break LOCA”.

A seguire forniamo un elenco di alcuni di questi fenomeni:

- 1) effetti dei fenomeni di penetrazione e bypass dei sistemi di refrigerazione d'emergenza del reattore, tenendo conto del flusso controcorrente e delle pareti calde;
- 2) fase di refill del lower-plenum tenendo conto dell'influenza dei fenomeni di trascinarsi e di separazione delle fasi;
- 3) avanzamento del quench front nel ribagnamento dal basso e dall'alto;
- 4) andamento della temperatura di guaina della barretta media e calda;
- 5) iniezione diretta di acqua sottoraffreddata da parte dei sistemi di raffreddamento di emergenza senza presenza di zone di miscelamento;
- 6) efflusso in condizioni di criticità;
- 7) liquido scaricato durante il reflood;
- 8) reazione acqua metallo;
- 9) stratificazione in condotti orizzontali.

Il codice TRACE non risulta appropriato per descrivere delle fenomenologie, alcune delle quali riportiamo a seguire:

- quelle situazioni nelle quali il trasferimento della quantità di moto a livello locale gioca un ruolo primario. Per esempio, TRACE non riesce a descrivere in dettaglio i fenomeni fluidodinamici all'interno di un pipe, di un branch o di un plenum o comunque in quei componenti nei quali il profilo radiale di velocità non è piatto,
- quei transitori nei quali si verifica una variazione asimmetrica dell'andamento della potenza del core,
- quegli scenari per i quali i coefficienti d'attrito dovuti alla viscosità del fluido risultano comparabili o addirittura superiori rispetto agli stessi coefficienti valutati in corrispondenza alla parete,
- gli effetti di stress dovuti ai gradienti di temperatura,
- gli effetti di shock termici in elementi in pressione.

4. DESCRIZIONE DEL CODICE RELAP5/MOD3.3

Il RELAP5/MOD3 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) [2] è un codice di calcolo termoidraulico sviluppato per analisi di transitori nei reattori ad acqua leggera ed utilizzato per studi di licensing, per regolamentare l'esercizio di tali impianti e per la stesura delle linee guide che devono essere seguite dagli operatori d'impianto. Nello specifico tale codice viene applicato per la simulazione di transitori del tipo LOCA, ATWS (Anticipated Transient Without Scram) e operazionali (come ad esempio gli incidenti di perdita di alimentazione dei secondari dei generatori di vapore, trip delle turbine etc,) in impianti della filiera LWR. Il Relap è un codice che a parte a simulare il comportamento del reattore durante un transitorio, consente di descrivere il comportamento termoidraulico di una grande varietà di sistemi nucleari e non.

In particolare, questo codice è stato sviluppato da NRC in collaborazione con un consorzio di vari paesi membri dell'ICAP (International Code Assessment and Applications Program) prima e successivamente con i paesi che hanno preso parte all'accordo CAMP (Code Applications and Maintenance Program). Lo scopo del continuo sviluppo di tale codice è quello di ottenerne una versione affidabile da applicare per lo studio di un gran numero di

transitori incidentali, tra cui sia large che small break LOCA, e operazionali. In RELAP i componenti idraulici grazie ai quali si può schematizzare un impianto, complesso quanto si vuole, comprendono PIPEs, ANNULUSs, PRIZERs, BRANCHs, PUMPs, ACCs, TURBs, VALVEs...

Lo scambio termico tra il fluido e le pareti dei contenitori viene invece simulato tramite l'introduzione delle strutture termiche.

Il RELAP5/MOD3 usa un modello idrodinamico del tipo monodimensionale bifase monocomponente con la possibilità di tenere conto della eventuale presenza di n componenti gassosi non condensabili nella fase vapore o di un soluto non volatile nella fase liquida. Una ipotesi base del RELAP è quella di disequilibrio meccanico e termodinamico tra le fasi, ma esso permette anche di utilizzare modelli più semplici come quello omogeneo, dell'equilibrio termico e del moto senza attrito.

La versione MOD3 di RELAP5 è stata sviluppata ampliando e migliorando i modelli base introdotti nella versione MOD2 rilasciata agli utilizzatori nel 1985. I difetti presentati da questa versione del codice sono stati messi in luce dai membri di ICAP e di CAMP attraverso processi di validazione. In conseguenza di ciò vari nuovi modelli, in aggiunta o in sostituzione di quelli già esistenti, sono stati introdotti nell'attuale versione di RELAP5.

Tra i nuovi modelli introdotti ricordiamo brevemente:

- la correlazione di Bankoff per il flusso in controcorrente, che può essere attivata dall'utente in corrispondenza di ciascuna giunzione singola.
- Il componente ECCMIX che può essere utilizzato per schematizzare il mescolamento del liquido sottoraffreddato di alimentazione dei sistemi di refrigerazione di emergenza del core e il conseguente fenomeno di condensazione all'interfaccia.
- Un modello per descrivere la reazione esotermica zirconio-acqua a cui vanno incontro le guaine delle barrette di combustibile sottoposte ad elevata temperatura.
- Un modello di trasferimento del calore tra superfici per effetto radiativo.
- Un modello di stratificazione termica.
- Un nuovo set di dati inerenti le tabelle delle proprietà termodinamiche del vapore valide per acqua leggera, nella formulazione del 1995 fornita da International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS).

I miglioramenti apportati ai modelli già presenti nella versione MOD2 includono invece:

- Nuove correlazioni valide per il calcolo dei fattori di attrito all'interfaccia per ogni tipo di geometria in regime di moto del tipo bubbly-slug flow e in condotti verticali.
- Un modello migliore per la valutazione della quantità di liquido trascinato dal vapore in condotti orizzontali al fine di ottenere una migliore caratterizzazione della miscela bifase scaricata attraverso un break.
- Una nuova correlazione per la valutazione del flusso critico valida per fasci di barrette, basata su dati sperimentali.
- Un criterio migliore per la valutazione della transizione da regime di moto del tipo "stratified" a "dispersed" valido per flussi orizzontali.
- Un modello di trasferimento di calore in reflood.
- Un termine radiativo aggiuntivo al modello di trasferimento di calore nel gap della barretta di combustibile.
- Modifiche al modello dei gas non condensabili per eliminare difetti e comportamenti errati da parte del codice.
- Modelli di Henry-Fauske e di Moody.

5. SIMULAZIONE TRACE DEL TRANSITORIO DI SBO SU SPES-3

Il presente capitolo riporta i risultati di un transitorio di SBO simulato sulla configurazione SPES-3 tramite l'utilizzo di una nodalizzazione TRACE sviluppata e messa a punto presso il Dipartimento dell'Energia dell'Università degli Studi di Palermo al fine sia di condurre analisi di supporto al progetto dell'impianto sperimentale SPES-3 che di validare il codice stesso. In particolare essa simula il circuito primario, il circuito secondario ed il contenimento dell'impianto sperimentale SPES-3.

5.1 BREVE DESCRIZIONE DEL MODELLO TRACE DELL'IMPIANTO SPES-3

Il sistema primario, Fig. 5.1, 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 valves 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 forate.

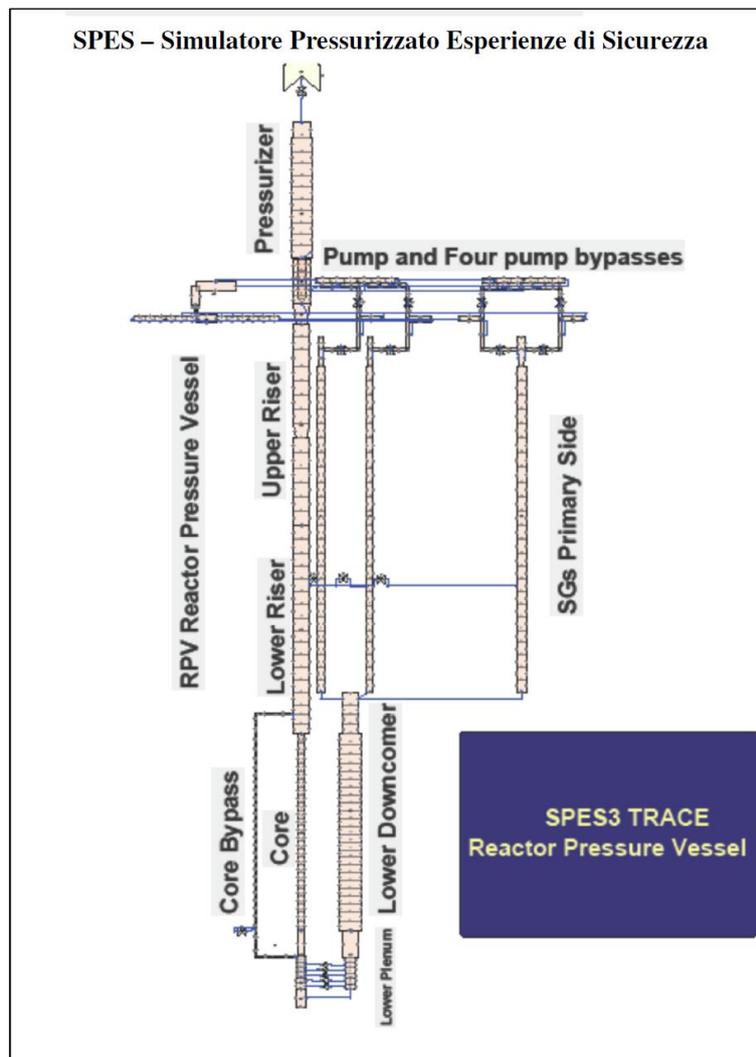


Fig. 5.1 – Vista della nodalizzazione del circuito primario.

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 valves 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. 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 valves che connettono il LR alla regione anulare degli SG. 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. Un esempio di nodalizzazione del sistema secondario e della RWST è mostrato nella Fig. 5.2. 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.

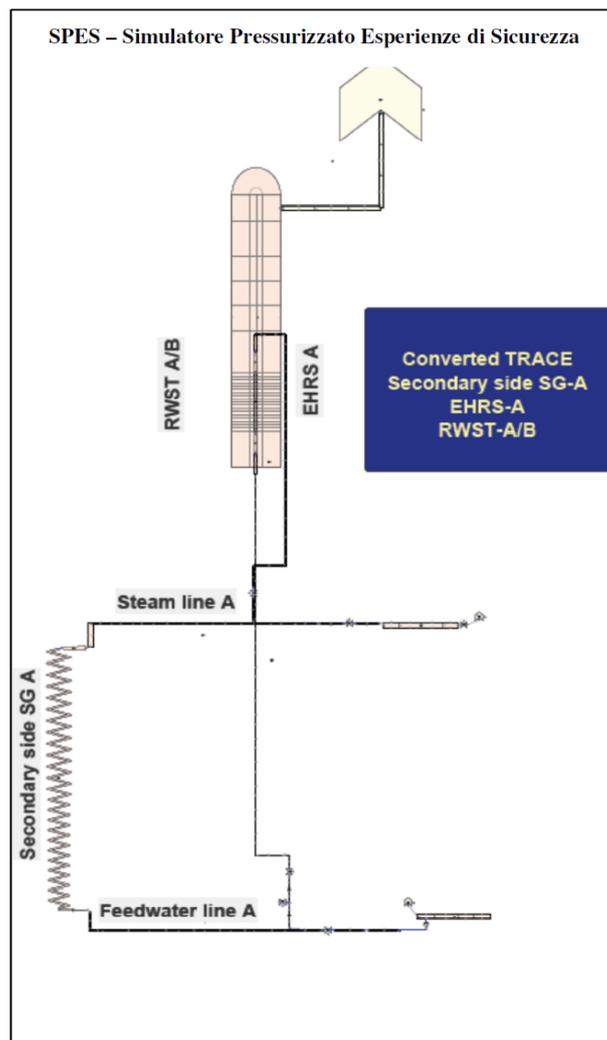


Fig. 5.2 – Vista della nodalizzazione del circuito secondario.

I compartimenti e le condotte del sistema di contenimento sono modellati in tutte le loro parti. 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, la RC e le due RWST. 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 Tab. 5.1 riassume i componenti utilizzati nel modello TRACE per la simulazione dell'impianto sperimentale SPES-3.

Tab. 5.1 – Componenti utilizzati nella nodalizzazione TRACE.

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	

5.2 ANALISI DEL TRANSITORIO DI SBO IN SPES-3 TRAMITE TRACE

Per poter effettuare lo studio del transitorio incidentale è stato necessario modificare la logica d'intervento di alcuni trips rispetto al modello utilizzato nell'analisi di precedenti transitori di tipo LOCA:

- Il transitorio inizia con l'arresto della pompa del circuito primario e di quella del circuito secondario.
- Un segnale di bassa portata della FW da avvio allo SCRAM del reattore.
- Un segnale di basso livello di liquido negli SGs aziona l'isolamento del circuito secondario chiudendo le MSIV e MFIV.
- Un segnale di basso livello di liquido o di alta pressione negli SGs aziona l'intervento degli EHRS A e B; l'EHRS C non interviene in questo tipo di transitorio non trattandosi di un LOCA.
- Le EBT intervengono su segnale di bassa temperatura all'ingresso del core.

Lo studio del transitorio incidentale è stato effettuato dopo una simulazione del funzionamento in regime stazionario dell'impianto. Le condizioni stazionarie sono state simulate per 1010 secondi poiché i calcoli raggiungono la convergenza numerica in breve tempo. Come si può osservare nella

Tab. 5.2 i risultati dello stazionario si possono ritenere pianamente in accordo con i dati calcolati da SIET mediante il codice RELAP5. In seguito verranno presentati i risultati ottenuti nella simulazione del transitorio confrontandoli con quelli ottenuti da SIET [3].

Tab. 5.2 – Condizioni iniziali.

	Vessel/ Core	SG-A	SG-B	SG-C	EBT A/B	QT	DW	PSS A/B	RC	LGMS A/B	RWST AB C
Pressure (bar)	155.13 (PRZ) 0.464 (Pump Head)	61.15 (out)	61.15 (out)	61.34 (out)	155.13	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013
T_{in} (°C)	290.90	223.80	223.80	223.80	48.9	48.9	48.9	48.9	48.9	48.9	20.0
T_{out} (°C)	328.90	322.91	322.19	320.32							
ΔT (°C)	38.00	99.11	98.39	96.52							
Superheating (°C)		46.08 (T _{sat} 276.8)	45.36 (T _{sat} 276.8)	43.29 (T _{sat} 277.03)							
Mass flow (kg/s)	29.415 (By-pass 1.275)	0.8125	0.8125	1.625							
Power (MW)	6.5	1.625	1.623	3.233							
Level Collapsed (m)	2.05 (PRZ)	1.816	1.969	2.097	3.14 (full)	empty	empty	3.77	empty	2.45	6.95-6.96
Mass (kg)	3398 (RPV)	12.582	13.483	28.494	127			1470		986	11869 11876

Il transitorio incidentale è stato simulato per oltre 28 ore. Le fasi significative dell'evento possono essere così riassunte:

- Perdita di energia elettrica nell'impianto conseguente allo SBO ed inizio del coast-down della pompa di circolazione del circuito primario e della pompa alimento agli SG.

- Inizio della circolazione naturale attraverso le valvole di by-pass della pompa e delle check valves che collegano il riser al downcomer (RI-DC check valves).
- SCRAM del reattore azionato dal segnale di bassa portata della FW.
- E' assunto che l'avviamento della Start-Up FW fallisca (questa è presente in IRIS manell'impianto SPES-3 non è simulata) con conseguente isolamento degli SG.
- Il segnale di basso livello dal lato secondario degli SG permette l'avvio dei sistemi EHRS A e B. Come conseguenza del raffreddamento il circuito primario inizia la depressurizzazione ed il livello di liquido nel vessel diminuisce provocando la scopertura della pompa e l'arresto della circolazione nella parte alta del recipiente in pressione. La circolazione naturale è ancora permessa dalle RI-DC check valves.
- Il segnale di bassa temperatura all'ingresso del core aziona le EBT che immettono acqua all'interno del circuito primario fin quando i livelli di liquido in queste e nel vessel si eguagliano.
- Il raffreddamento a lungo termine dell'impianto è assicurato dai sistemi EHRS che asportano il calore di decadimento del core cedendolo alle RWST

5.3 DESCRIZIONE DEL TRANSITORIO

5.3.1 SBO: perdita dell'energia elettrica esterna

E' assunto che lo SBO avvenga all'istante 0 e che come conseguenza venga a mancare l'energia elettrica in tutto l'impianto. Le pompe dei circuiti primario e secondario si spengono ed inizia il loro coast-down. La pompa di circolazione primaria si ferma all'istante 100 s, Fig. 5.3. La prevalenza offerta dalla pompa diminuisce, Fig. 5.4, permettendo alle RI-DC check valves di aprirsi facendo instaurare la circolazione naturale nella zona inferiore del vessel. La circolazione naturale inizia all'istante 6 s nei tre SG A, B e C, tuttavia si stabilizza soltanto dopo circa un centinaio di secondi, Fig. 5.5 e Fig. 5.6. Contrariamente a quanto visto con il codice RELAP5 dalla SIET le valvole di by-pass della pompa non sembrano essere così efficaci, tuttavia, l'acqua continua a fluire attraverso la pompa (ormai spenta) e le valvole mantenendo così la circolazione naturale anche nella parte alta del vessel, Fig. 5.7, Fig. 5.8 e Fig. 5.9. Lo SG C cessa di fungere da pozzo termico dopo circa 300 s, poiché l'EHRS C non viene attivato non trattandosi di un incidente di tipo LOCA, Fig. 5.10. Per via del continuo decremento di livello di liquido nel vessel, la pompa risulterà completamente scoperta dopo 5227 secondi, Fig. 5.11; la circolazione naturale attraverso la pompa e/o le valvole di by-pass non può più aver luogo.

Nel circuito secondario l'arresto della MFW avviene dopo 4.9 secondi dall'inizio del transitorio e la circolazione del fluido è permessa solo dall'avvio del sistema EHRS, Fig. 5.12 e Fig. 5.13.

5.3.2 Segnale di bassa portata nella FW: SCRAM del reattore e avaria della Start-Up FW.

Lo SCRAM del reattore avviene all'istante 1.3 s, sul segnale di bassa portata della FW, il cui setpoint è il 75% del valore della portata nominale. La potenza del reattore e la potenza asportata dagli SGs è mostrata nelle Fig. 5.14 e Fig. 5.15. Dal confronto con i risultati ottenuti nelle analisi condotte con il RELAP5, emerge una significativa differenza nella potenza prodotta nel core.

Ciò sembra essere attribuibile a una differenza tra le curve del calore residuo di decadimento adottate nelle due simulazioni.

Si assume che la Start-Up FW, la quale dovrebbe intervenire in caso di SCRAM del reattore ma che non è simulata nell'impianto SPES-3, sia in avaria. Questo permette di isolare il circuito secondario.

5.3.3 Segnale di basso livello SGs: isolamento degli SGs ed intervento degli EHRS A e B.

La perdita di portata nel circuito secondario causa una rapida riduzione della massa negli SGs. Dopo 61 secondi il livello di liquido collassato nello SG A raggiunge i 0.25 m: si aziona il segnale di basso livello negli SGs, Fig. 5.16 e Fig. 5.17. Sulla base di questo segnale viene attuato l'isolamento del circuito secondario e l'avviamento dell'EHRS. La MFIV e la MSIV si chiudono contemporaneamente in 5 secondi mentre i sistemi di rimozione passiva del calore sono disponibili dopo 1 secondo. Può dunque instaurarsi la circolazione naturale all'interno degli SGs permettendo così la rimozione del calore di decadimento, Fig. 5.12, Fig. 5.13, Fig. 5.14 e Fig. 5.15.

Gli EHRS A e B raggiungono il picco di portata 7 secondi dopo il loro avviamento, facendo passare all'interno del fascio tubiero una portata rispettivamente di 0.221 kg/s e di 0.218 kg/s, Fig. 5.18 e Fig. 5.19. La massima potenza asportata si registra dopo circa 655 secondi: l'EHRS A cede alla RWST 295 kW mentre l'EHRS B ne cede 298 kW, Fig. 5.20 e Fig. 5.21. La RWST-A/B inizia a riscaldarsi e dopo circa 8770 secondi, avendo raggiunto le condizioni di saturazione, inizia a perdere, significativamente, massa per via della ebollizione dell'acqua, Fig. 5.22, Fig. 5.23 e Fig. 5.24.

Subito dopo l'arresto della pompa di circolazione primaria la portata che si instaura nel core è di circa 3.2 kg/s, assume valori oscillanti quando la circolazione naturale nella parte alta del vessel si arresta per via della scopertura della pompa e a lungo termine, con un andamento oscillante, si porta ad un valore medio di circa 1.9 kg/s, Fig. 5.25 e Fig. 5.26.

L'isolamento degli SGs causa un incremento di pressione nel circuito secondario fino a raggiungere un picco di circa 79.3 bar nella SG A all'istante 230 s, di circa 82.5 bar nello SG B all'istante 209 s e di circa 80.26 bar nello SB C all'istante 266 s, Fig. 5.27 e Fig. 5.28.

5.3.4 Segnale di bassa temperatura all'ingresso del core: intervento delle EBT.

Il raffreddamento del sistema porta ad una depressurizzazione del circuito primario il quale, dopo circa 20 ore, si porterà ad una pressione di circa 2.8 bar, Fig. 5.29 e Fig. 5.30. Le temperature in ingresso ed in uscita dal core sono mostrate nella Fig. 5.31 e nella Fig. 5.32 assieme alla temperatura di saturazione corrispondente alla pressione del liquido in uscita dal core. Si può notare come dall'istante 7960 s il fluido in uscita dal core risulti essere in saturazione (nella simulazione RELAP5 il core non raggiunge mai le condizioni di saturazione con sviluppo di vapore) ma la presenza di una piccola frazione della fase vapore nella parte alta del core non sembra avere effetti negativi sul raffreddamento delle barre scaldanti, Fig. 5.33, Fig. 5.34 e Fig. 5.35.

Il fluido all'interno del circuito primario, raffreddandosi, subisce un incremento di densità. Il livello del liquido all'interno del vessel va dunque diminuendo ed al 2826-esimo secondo di transitorio il pressurizzatore risulta completamente vuoto; dopo l'intervento delle EBT si registra un breve fenomeno di insurge e a partire da circa 5550 s il pressurizzatore rimarrà privo di liquido e occupato soltanto da vapore molto surriscaldato, Fig. 5.36. Dopo circa 14400 secondi il livello del liquido nel DC del vessel si è stabilizzato, Fig. 5.37. All'istante

3594 s la temperatura del fluido in ingresso al core raggiunge i 533.15 K, valore di set-point per il segnale di bassa temperatura all'ingresso del core. Vengono azionate, quindi, le valvole delle linee delle EBT le quali si aprono in 15 secondi e tramite la linea DVI iniettano acqua fredda all'interno del vessel, Fig. 5.38 e Fig. 5.39.

L'iniezione di acqua dalle EBT si arresta completamente dopo circa 12900 secondi, quando il livello del fluido al loro interno non è più sufficiente per garantire una portata verso la linea DVI, Fig. 5.40.

5.3.5 Condizioni a lungo termine.

Il raffreddamento del core a lungo termine è assicurato dal calore rimosso tramite gli EHRS A e B, Fig. 5.21, ciò consentirà un lento raffreddamento del sistema e il raggiungimento di una condizione di quasi stazionarietà di lungo termine. Dopo circa 28 ore dall'inizio del transitorio la potenza mediamente prodotta dal core è di circa 46.5 kW e quella smaltita da questi sistemi di rimozione passiva del calore è di circa 40.3 kW; la differenza è dovuta alle perdite termiche del sistema verso l'ambiente esterno.

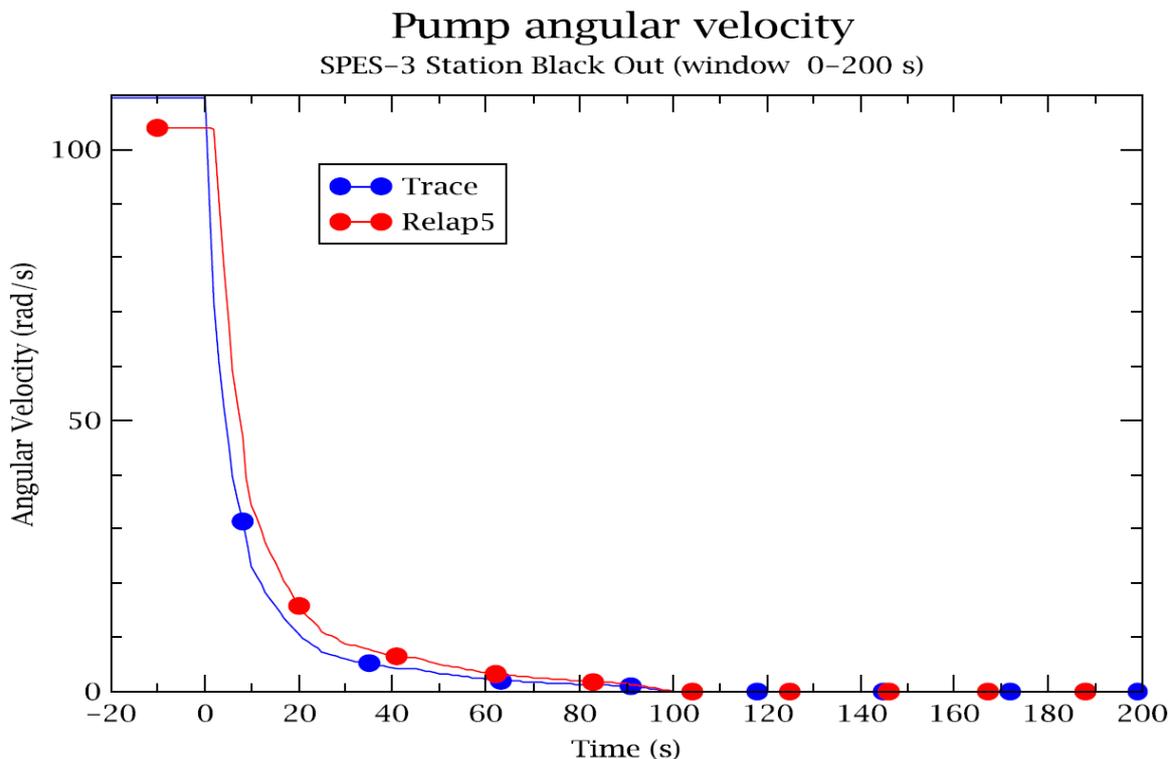


Fig. 5.3 – Coast-down della pompa del primario.

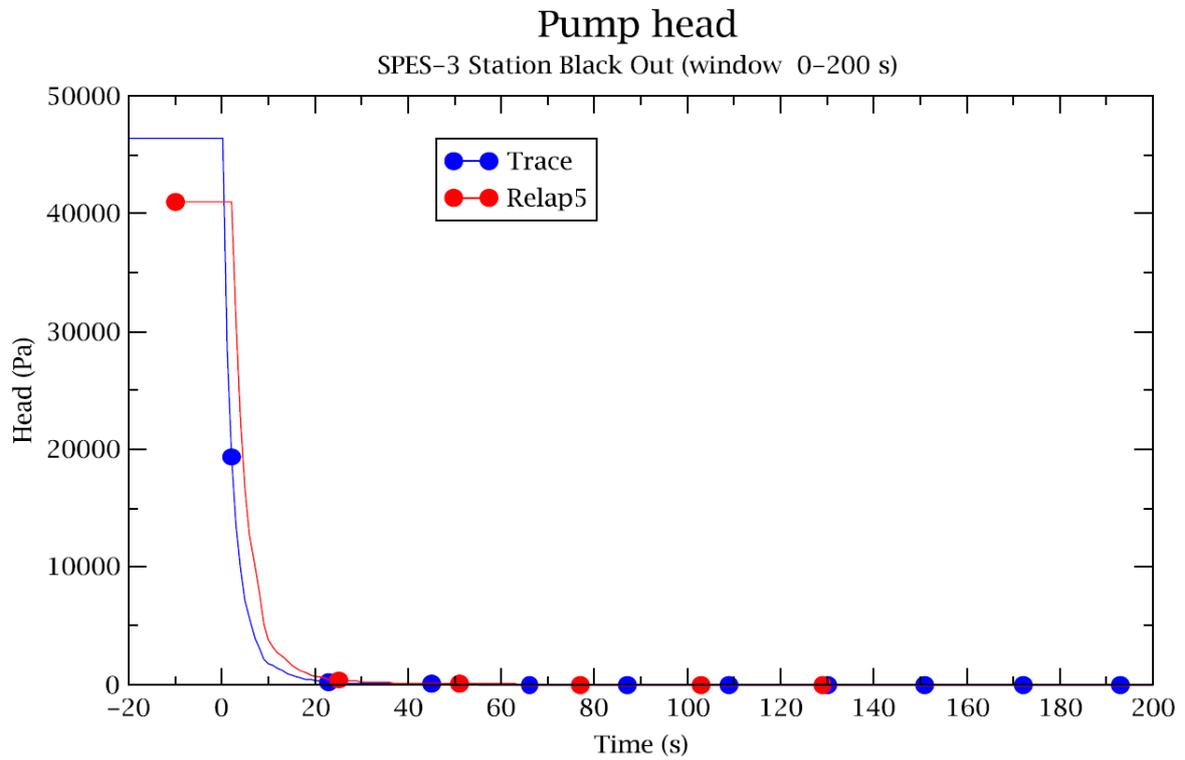


Fig. 5.4 – Prevalenza della pompa del primario

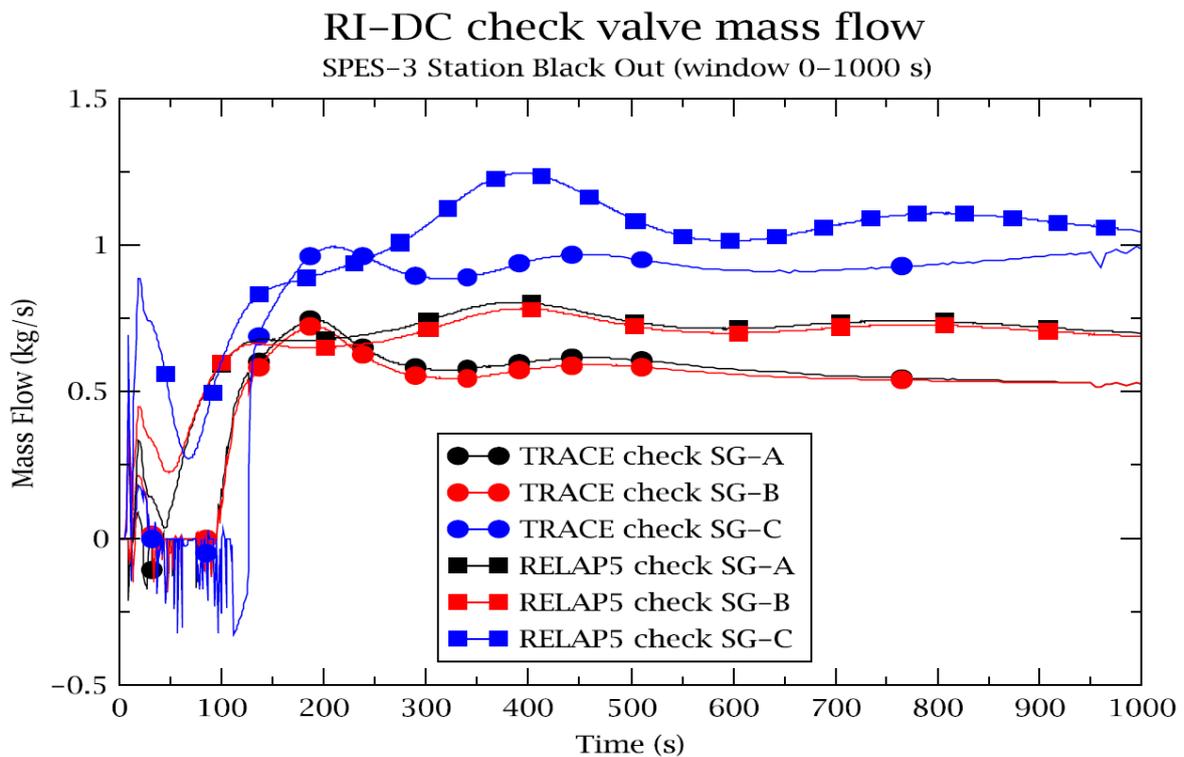


Fig. 5.5 – Portata check valve RI-DC (part.).

RI-DC check valve mass flow

SPES-3 Station Black Out (window 0-10 h)

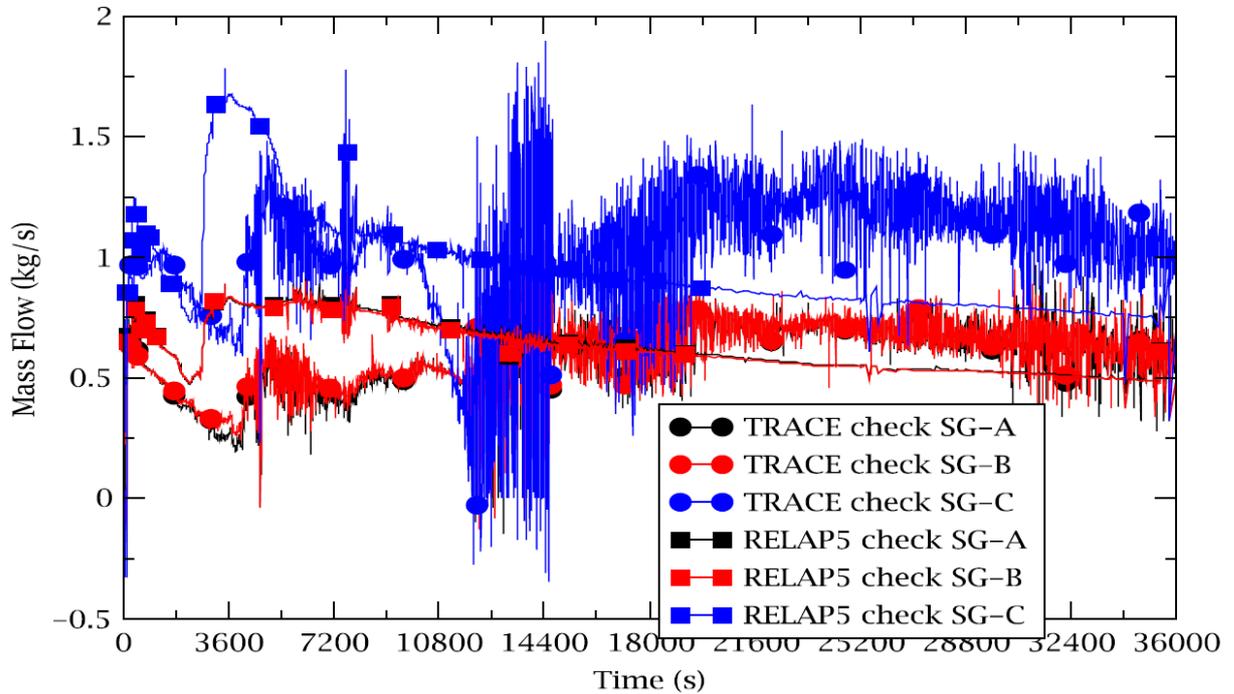


Fig. 5.6 – Portata check valve RI-DC.

Pump by-pass flow

SPES-3 Station Black Out (window 0-1000 s)

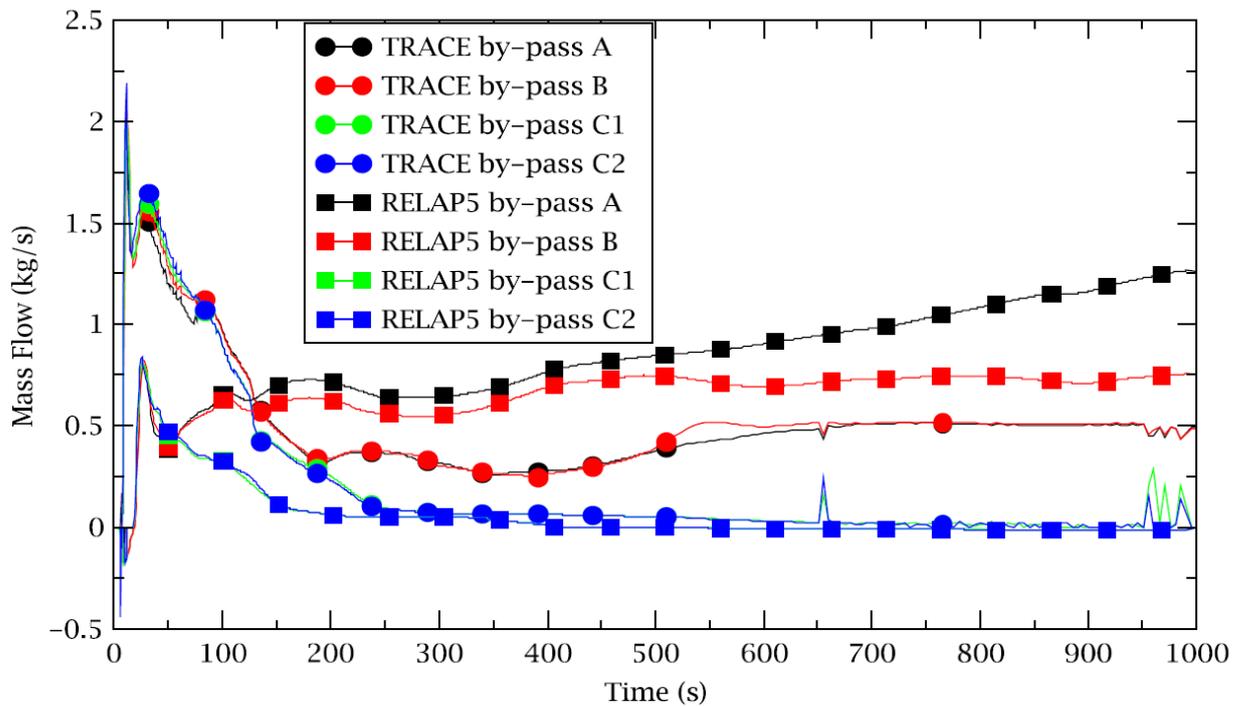


Fig. 5.7 – Portata bypass della pompa (part.).

Pump by-pass flow

SPES-3 Station Black Out (window 0-10000 s)

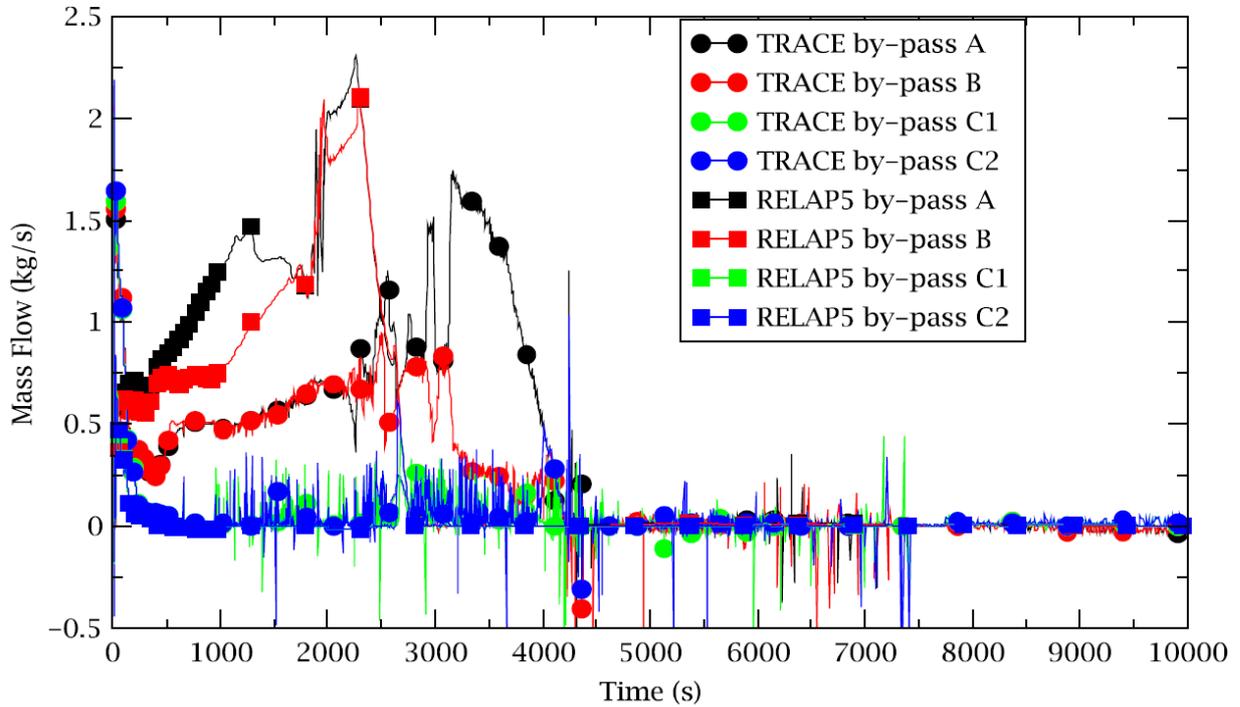


Fig. 5.8 – Portata bypass della pompa.

Pump mass flow

SPES-3 Station Black Out (particolare 0-6000 s)

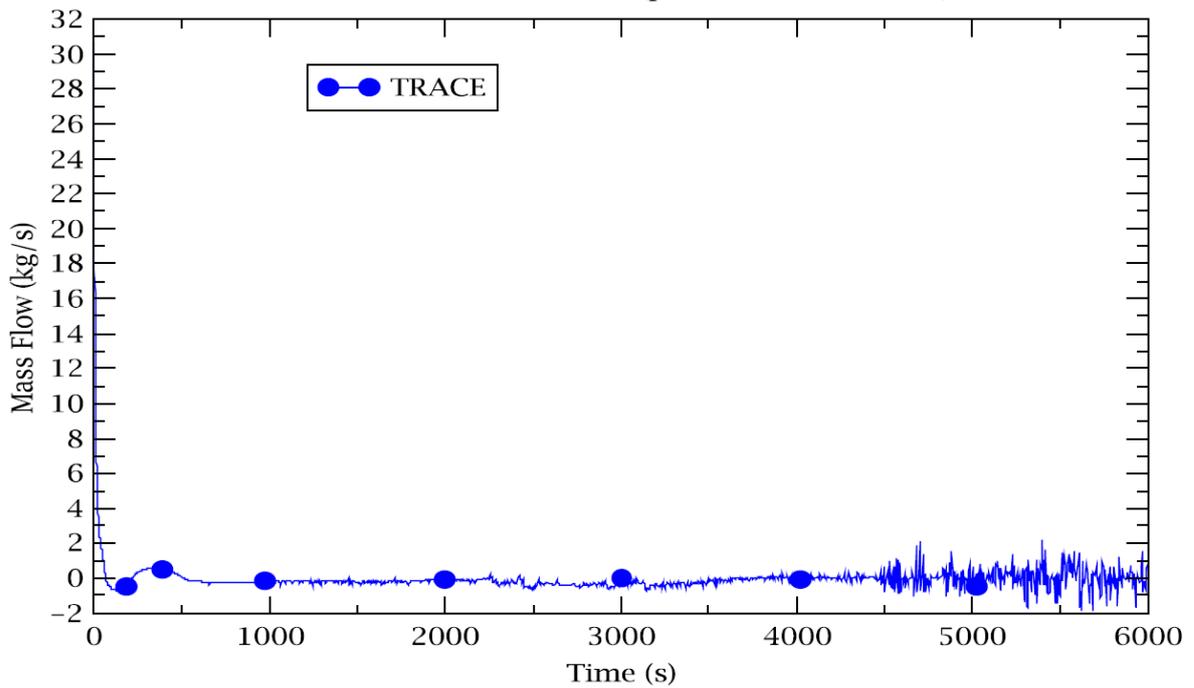


Fig. 5.9 – Portata elaborata dalla pompa.

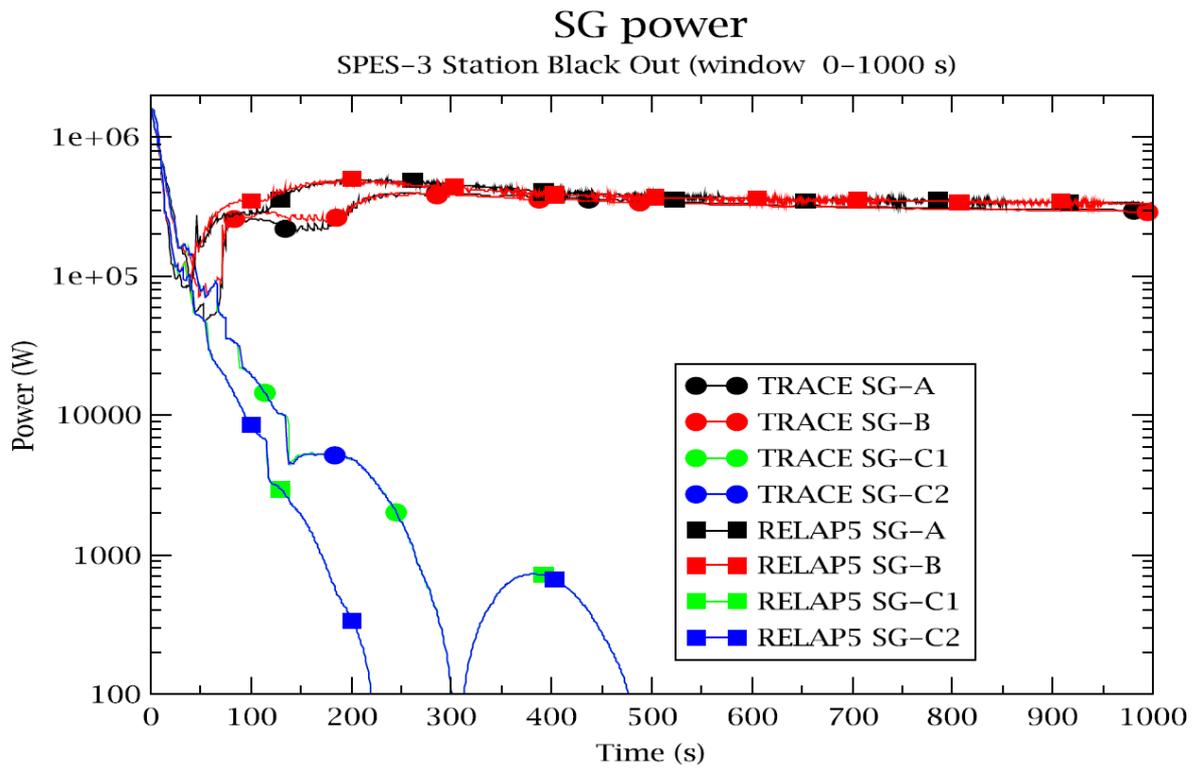


Fig. 5.10 – Potenza scambiata nei generatori di vapore (part.).

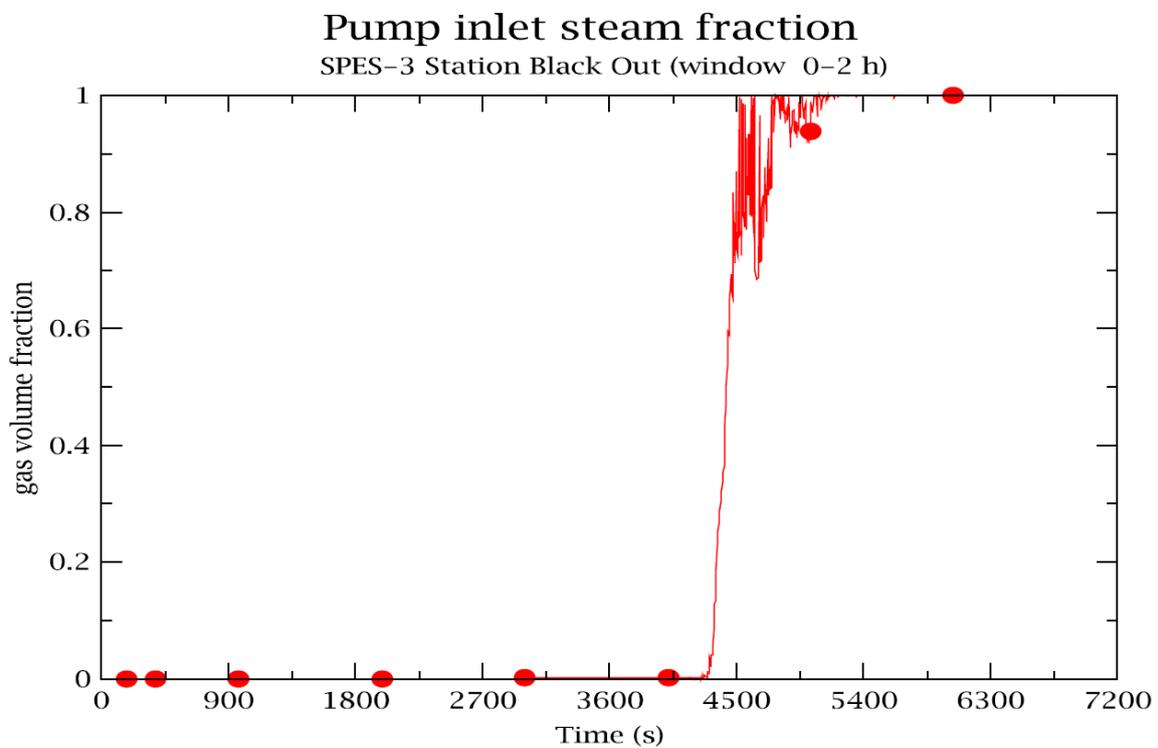


Fig. 5.11 – Frazione di vuoto del fluido in ingresso alla pompa.

SG secondary side inlet mass flow

SPES 3 Station Black Out (window 0-100 s)

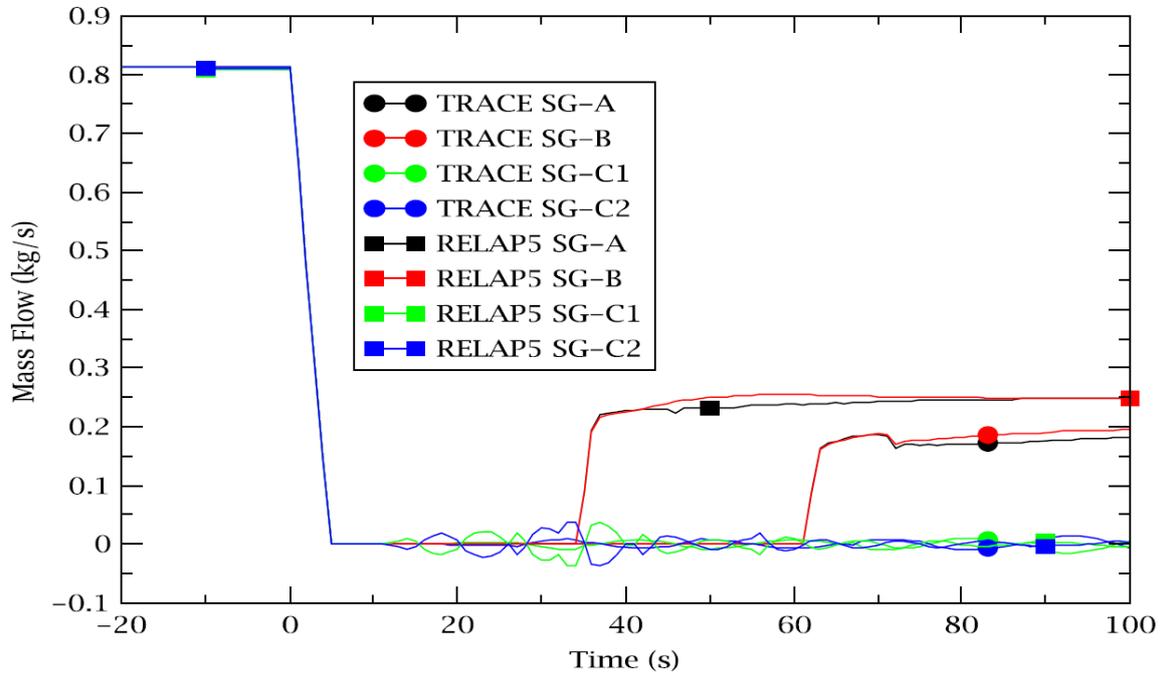


Fig. 5.12 – Portata nei secondari dei generatori di vapore (part.).

SG secondary side inlet mass flow

SPES 3 Station Black Out (window 0-16 h)

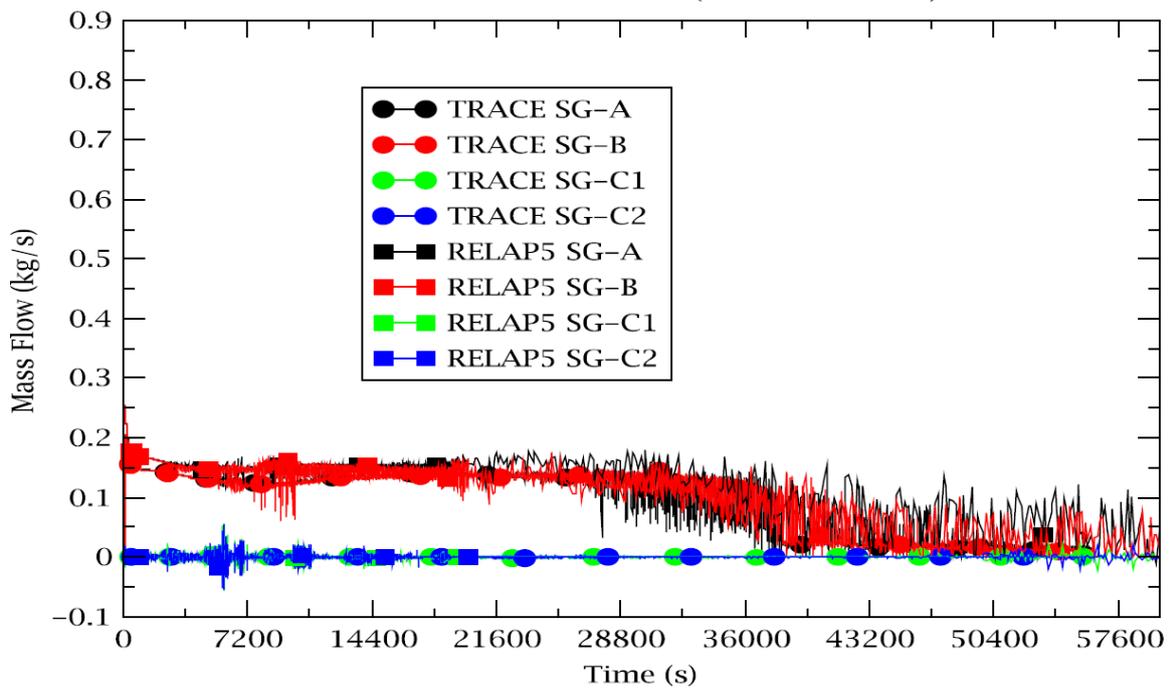


Fig. 5.13 – Portata nei secondari dei generatori di vapore.

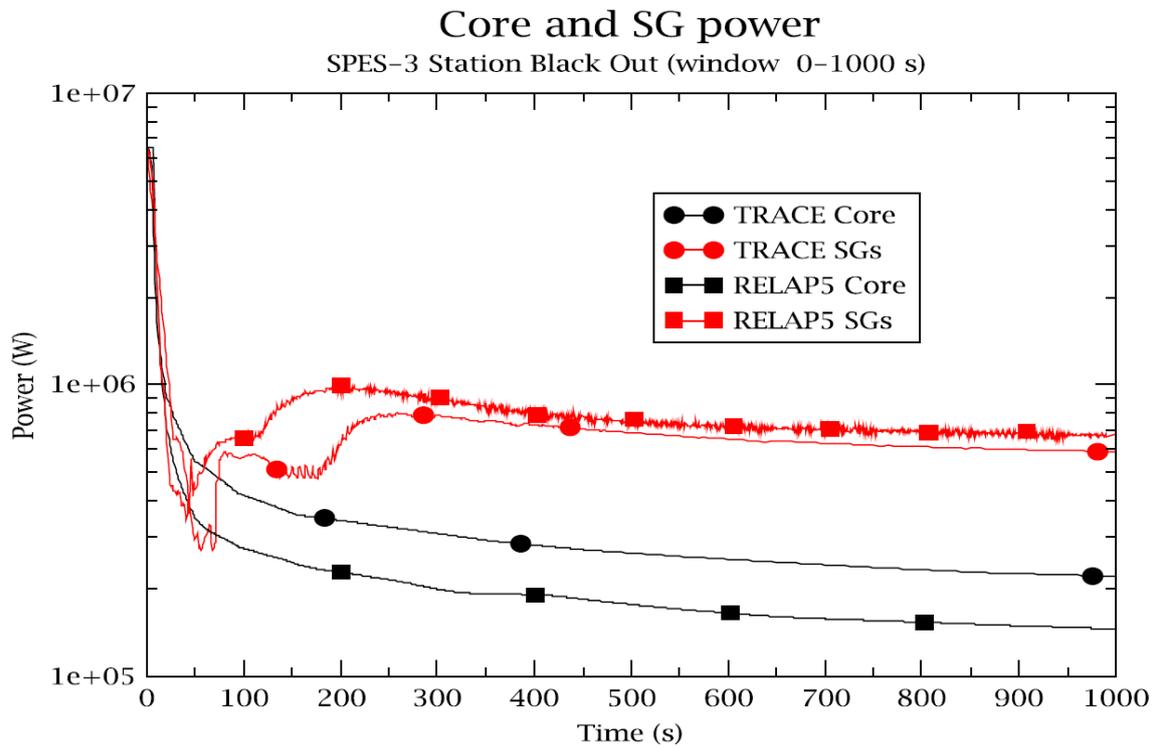


Fig. 5.14 – Potenza generata nel core e scambiata nei generatori di vapore (part.).

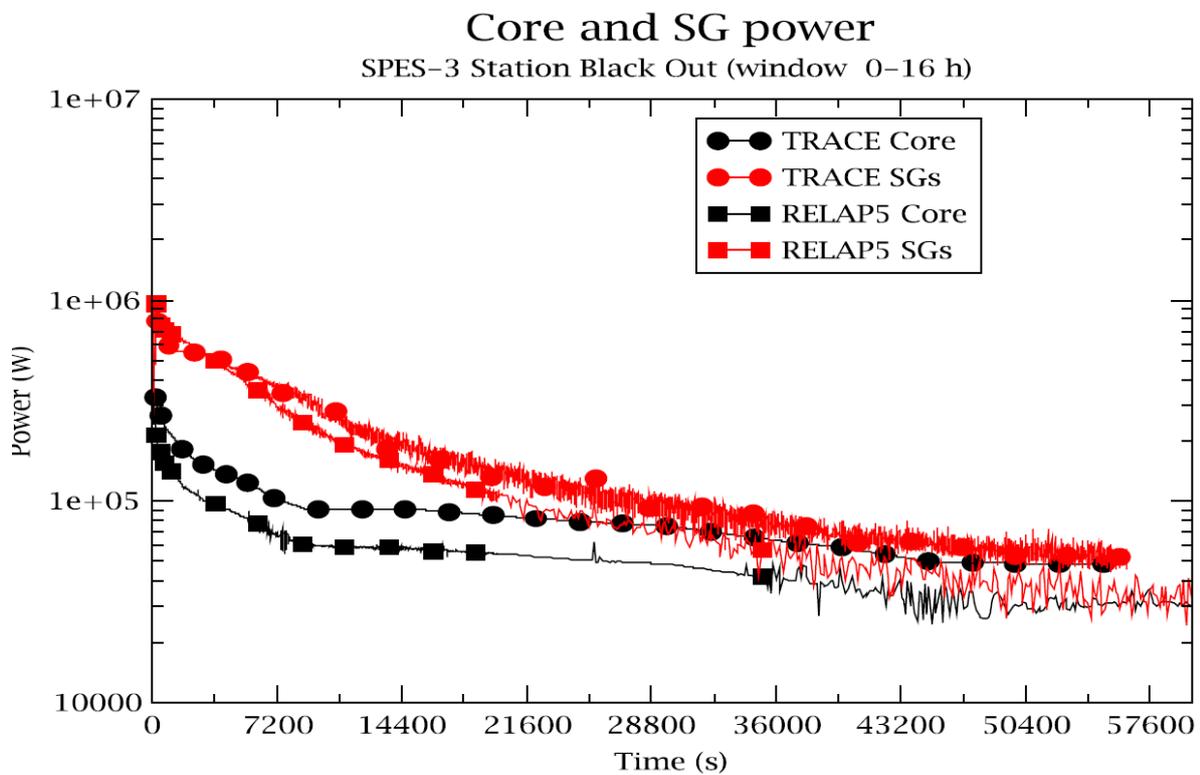


Fig. 5.15 – Potenza generata nel core e scambiata nei generatori di vapore.

SG secondary side collapsed level

SPES 3 Station Black Out (window 0-200 s)

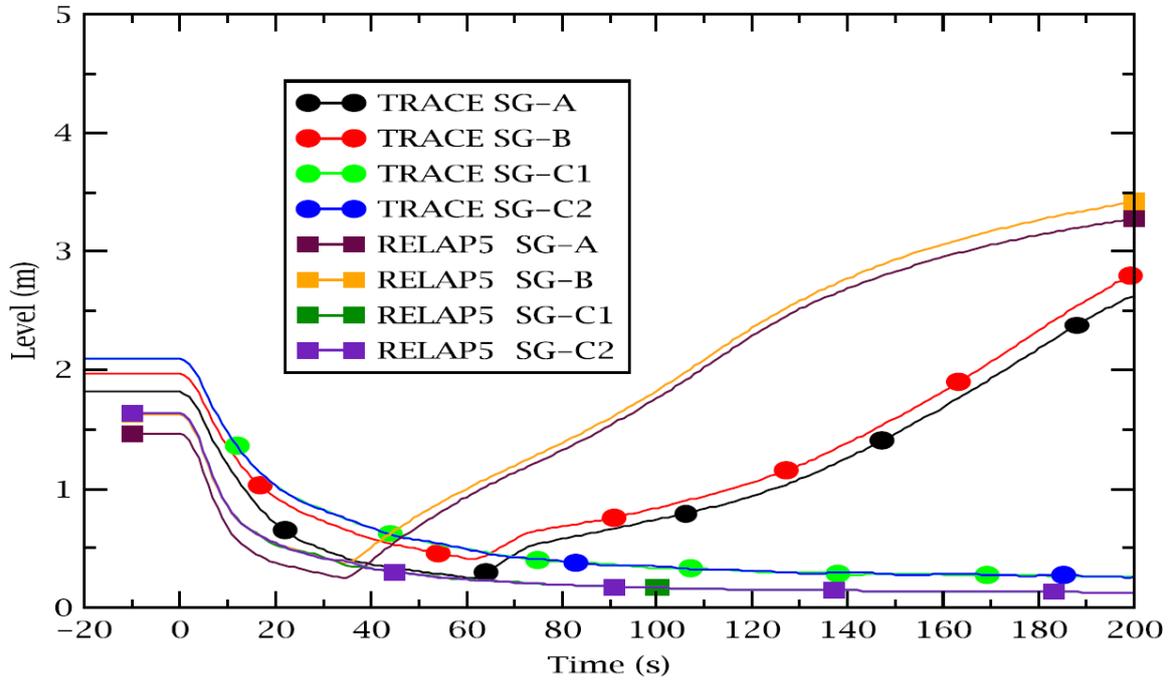


Fig. 5.16 – Livello di liquido nei generatori di vapore (part.).

SG secondary side collapsed level

SPES 3 Station Black Out (window 0-16 h)

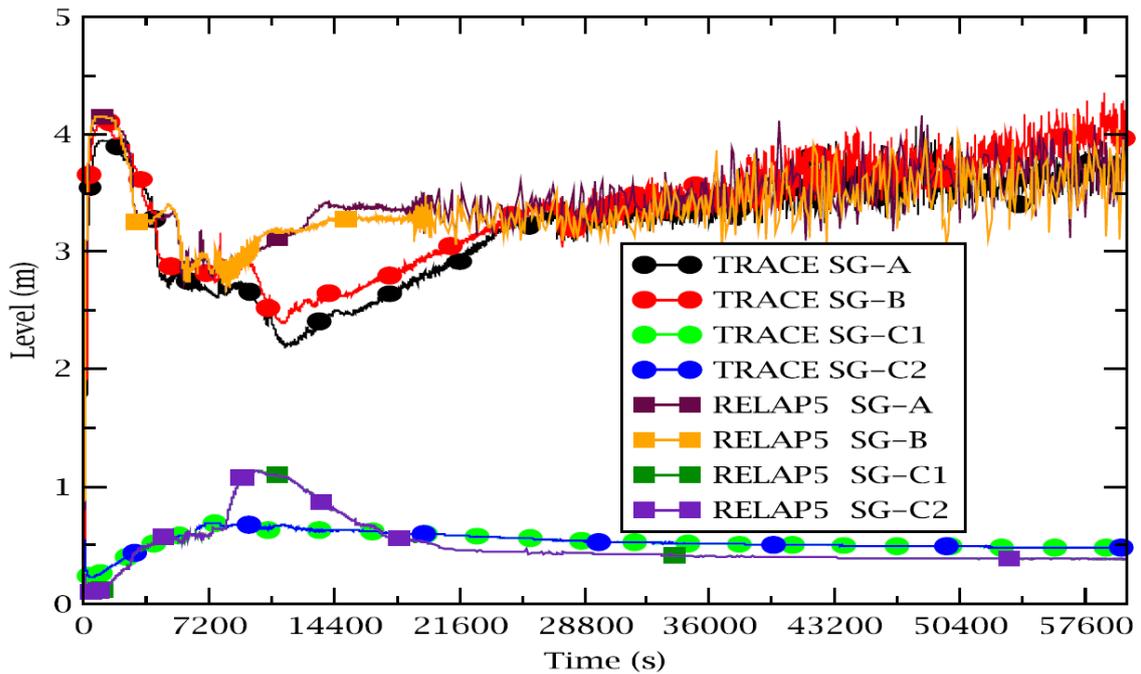


Fig. 5.17 – Livello di liquido nei generatori di vapore.

EHRS cold leg mass flow SPES 3 Station Black Out (window 0–1000 s)

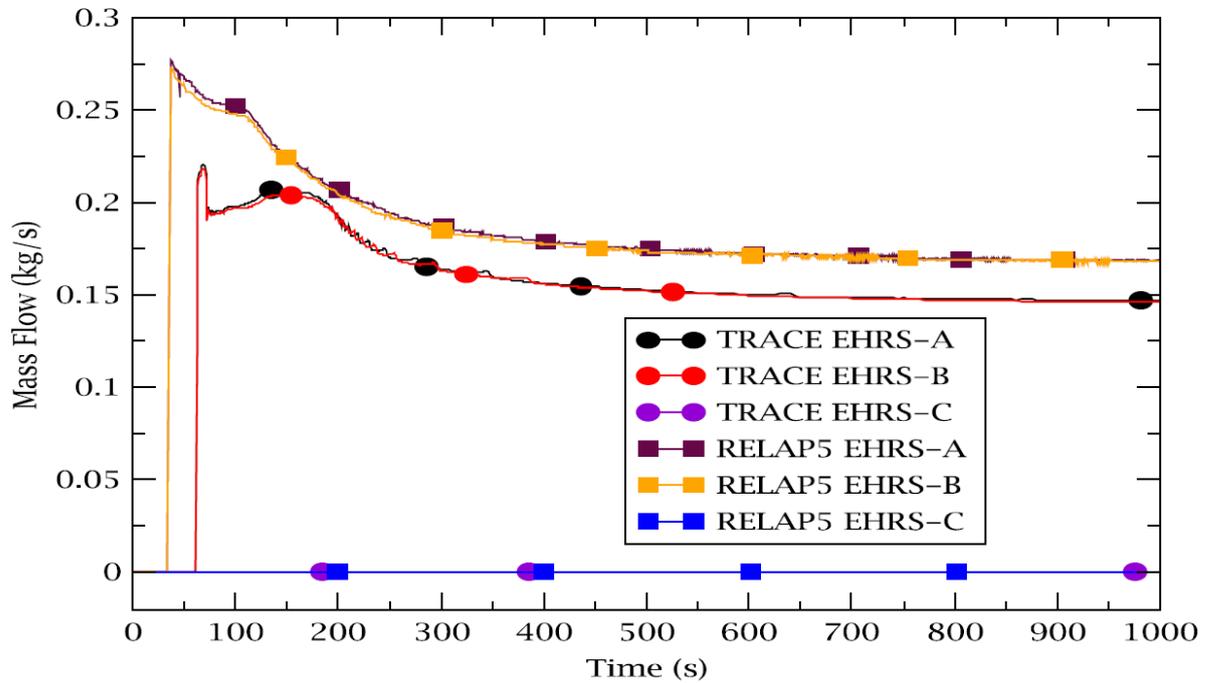


Fig. 5.18 – Portata di liquido iniettata dal sistema EHR-A, B e C (part.).

EHRS cold leg mass flow SPES 3 Station Black Out (window 0–16 h)

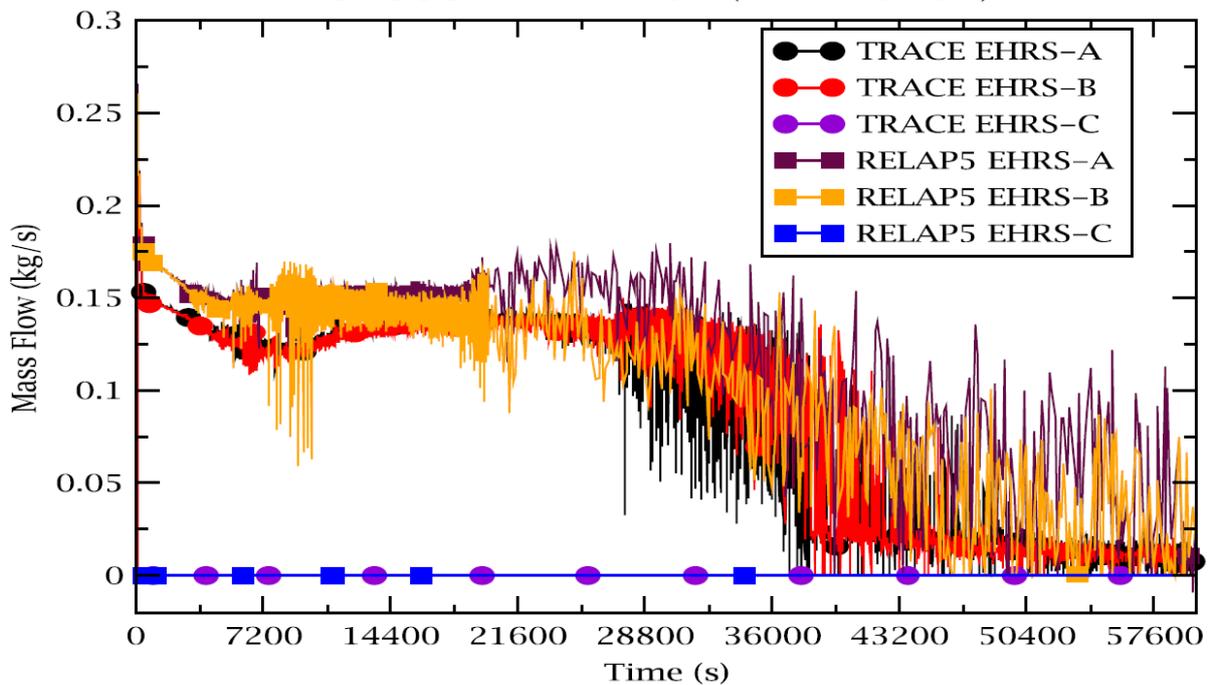


Fig. 5.19 – Portata di liquido iniettata dal sistema EHR-A, B e C.

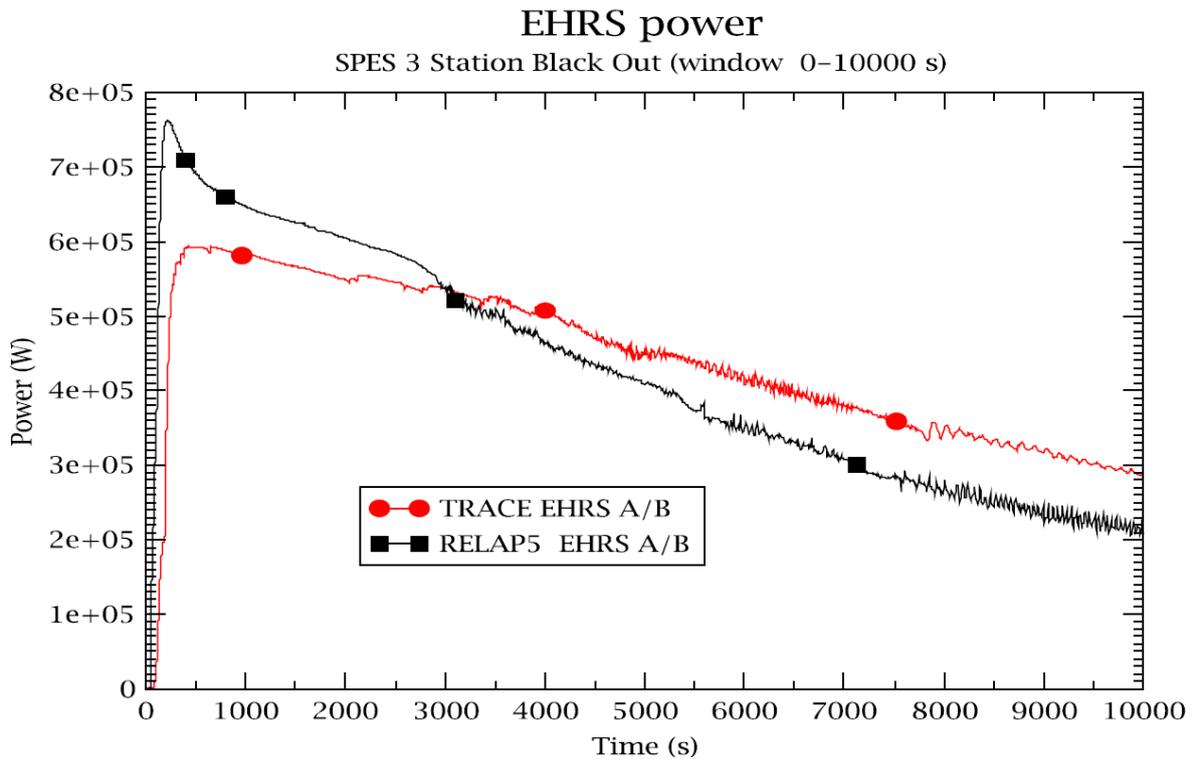


Fig. 5.20 – Potenza asportata dal sistema EHRS-A e B (part.).

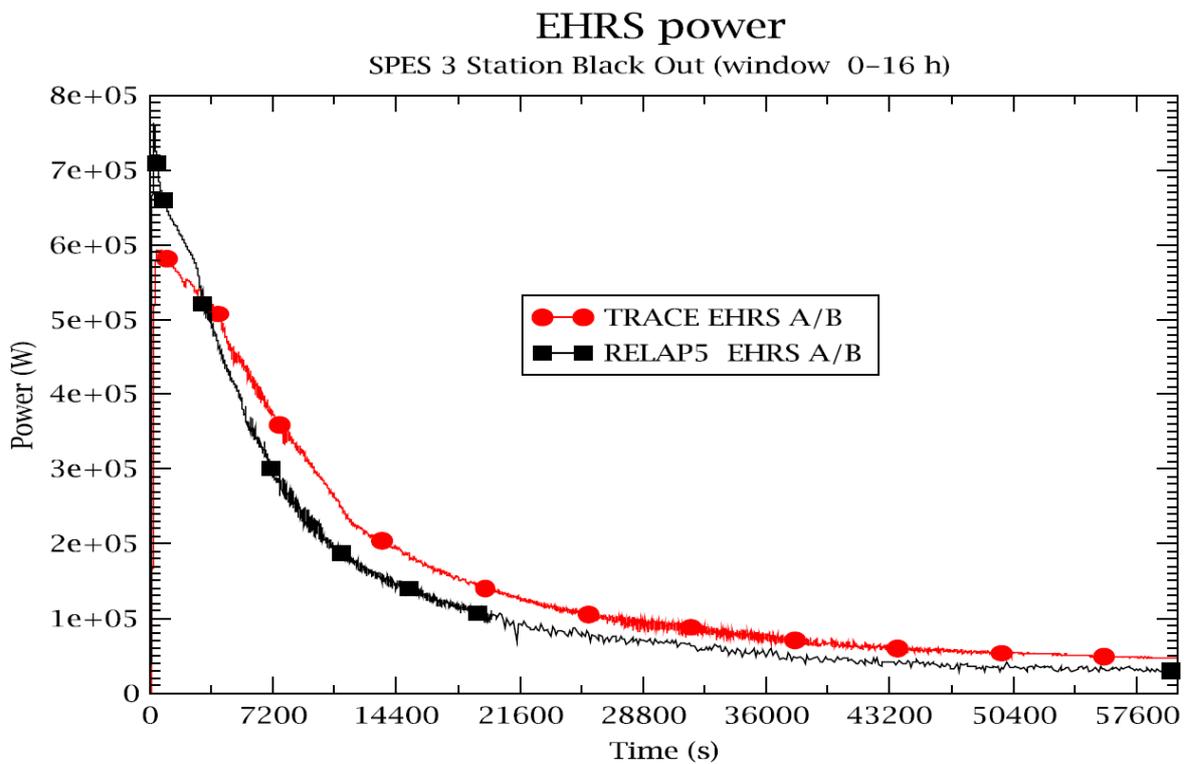


Fig. 5.21 – Potenza asportata dal sistema EHRS-A e B.

IRWST A/B temperature

SPES 3 Station Black Out (window 0-18 h)

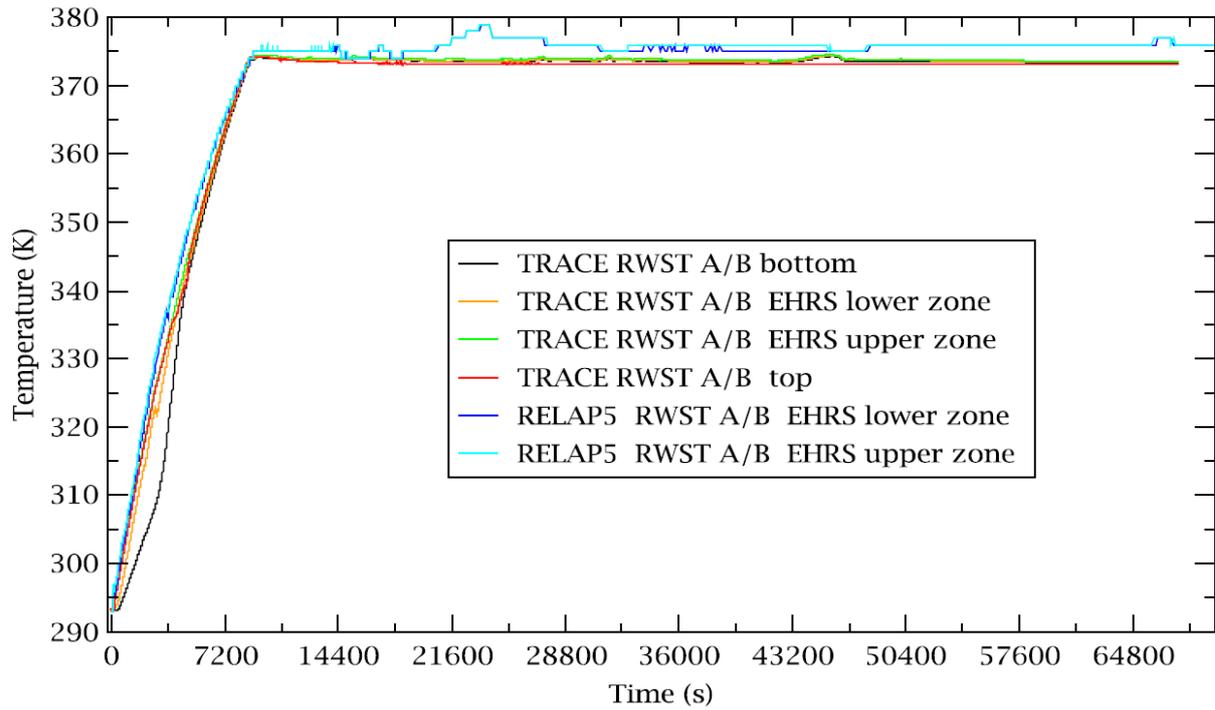


Fig. 5.22 – Temperatura del fluido nel sistema RWST-A e B.

IRWST A/B mass

SPES 3 Station Black Out (window 0-18 h)

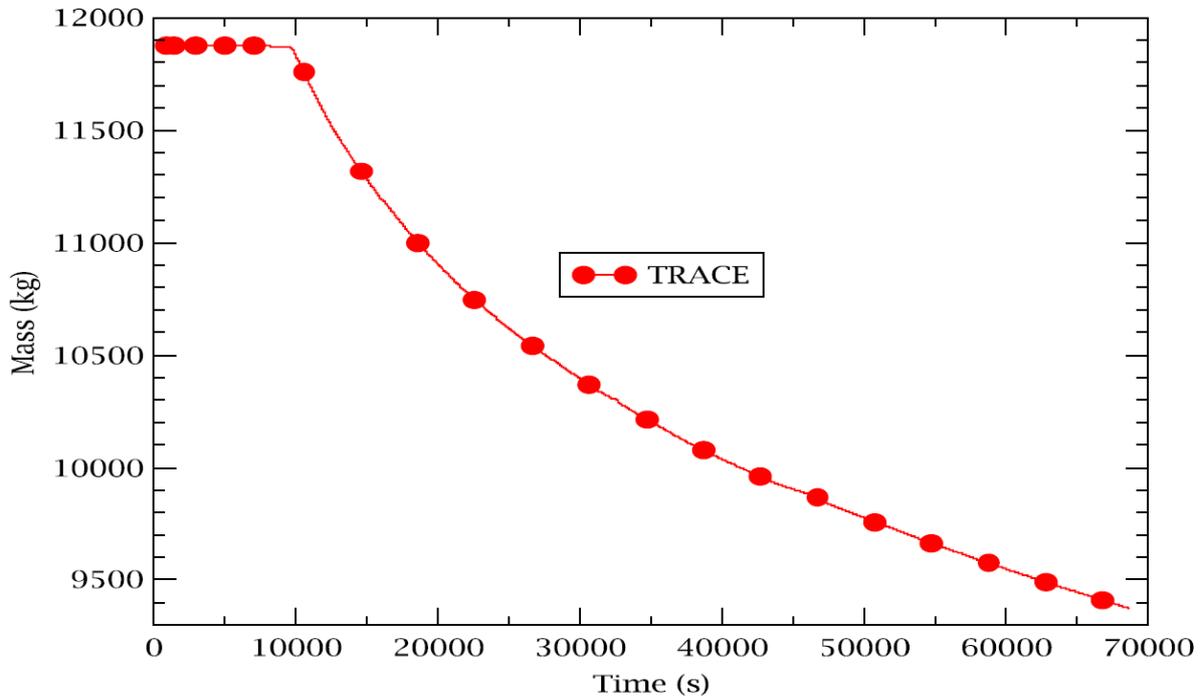


Fig. 5.23 – Massa del fluido nel sistema RWST-A e B.

IRWST A/B collapsed level SPES 3 Station Black Out (window 0-18 h)

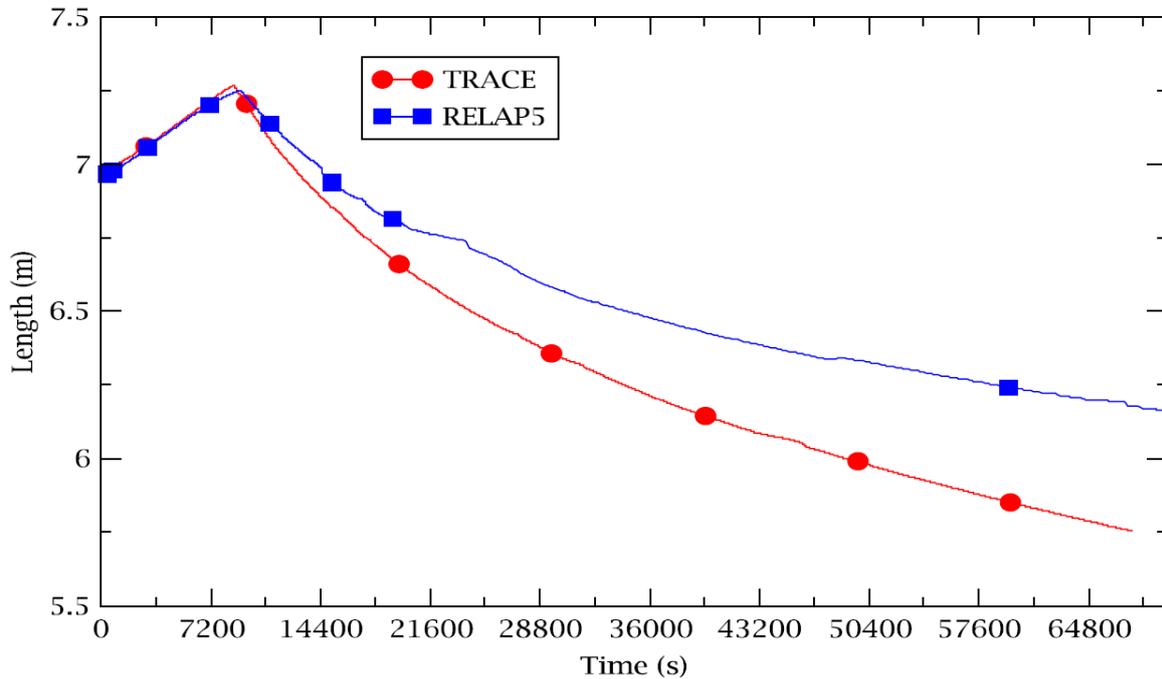


Fig. 5.24 – Livello di liquido nel sistema RWST-A e B.

Core inlet and by-pass core mass flow SPES 3 Station Black Out (window 0-1000 s)

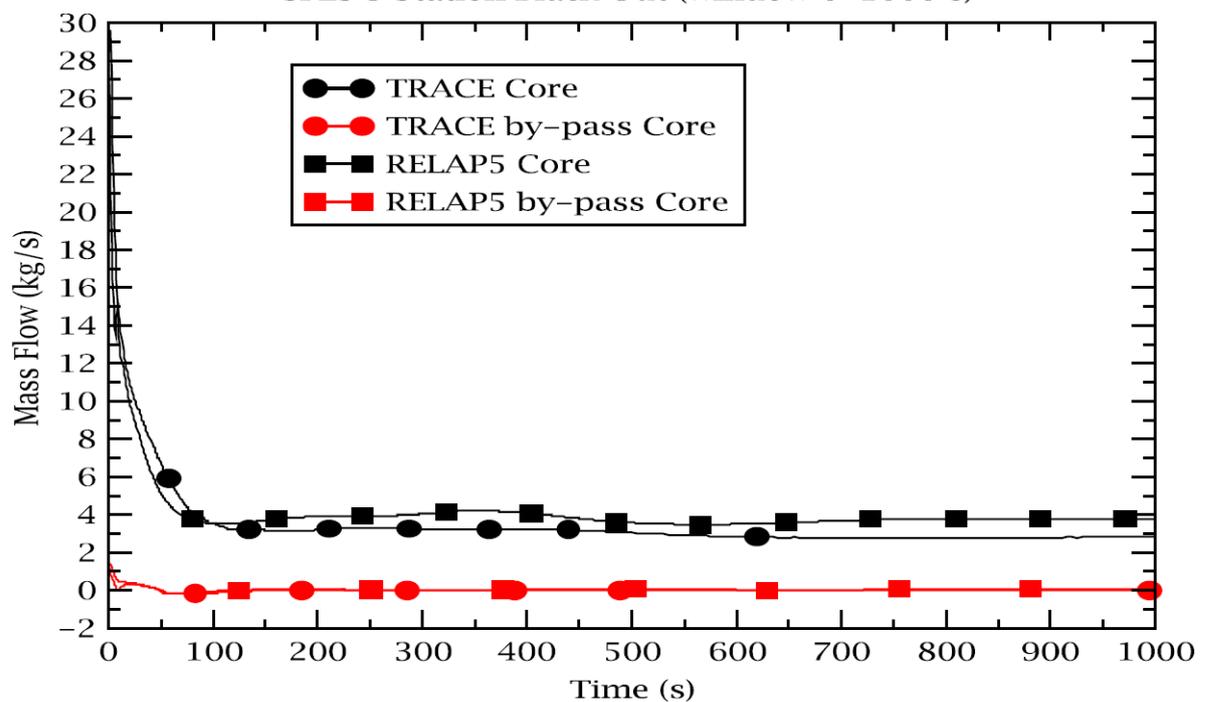


Fig. 5.25 – Portata attraverso il core e il by-pass del core (part.).

Core inlet and by-pass core mass flow

SPES 3 Station Black Out (window 0-16 h)

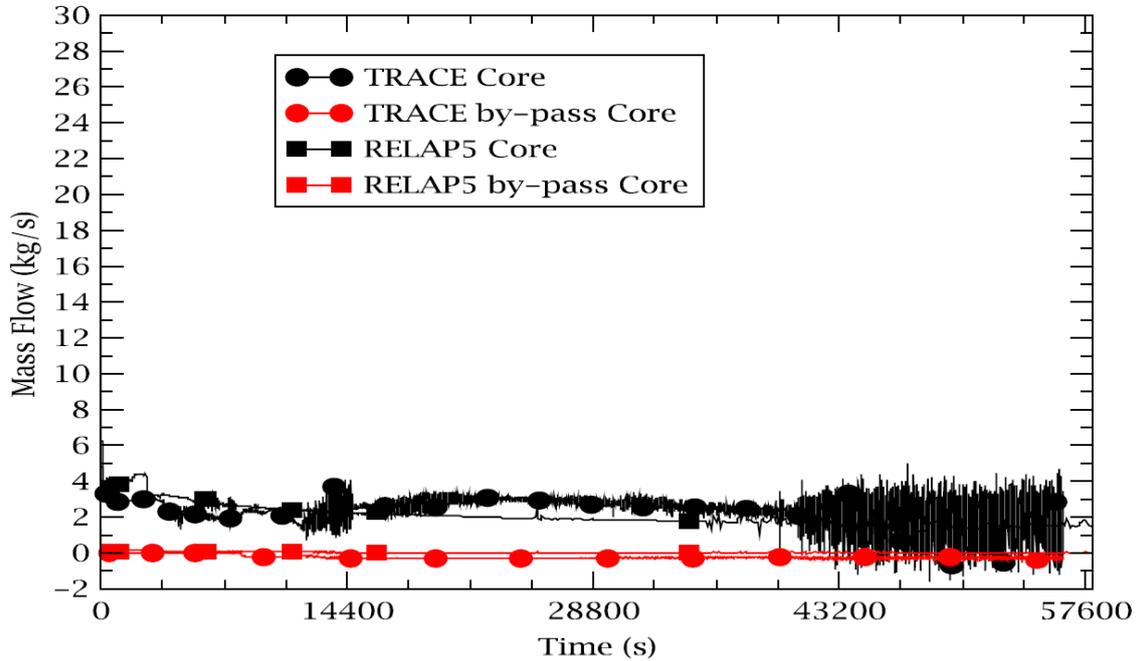


Fig. 5.26 – Portata attraverso il core e il by-pass del core.

SG secondary pressure

SPES-3 Station Black Out (window 0-4000 s)

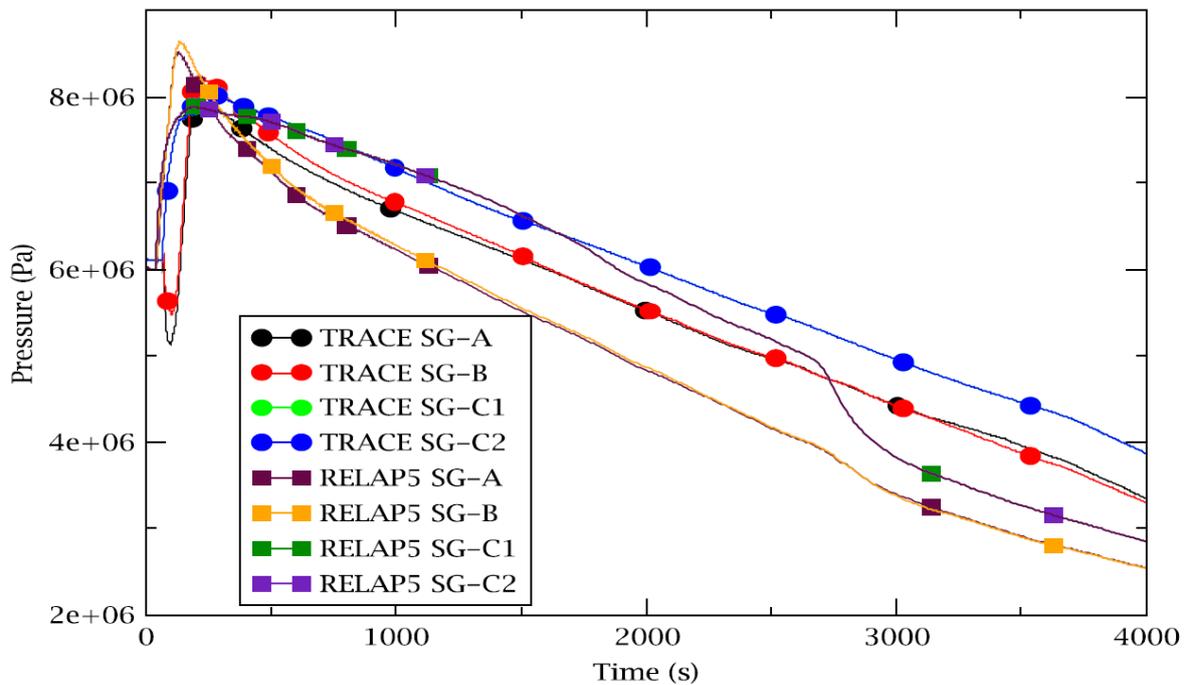


Fig. 5.27 – Pressione nei secondari del generatore di vapore (part.).

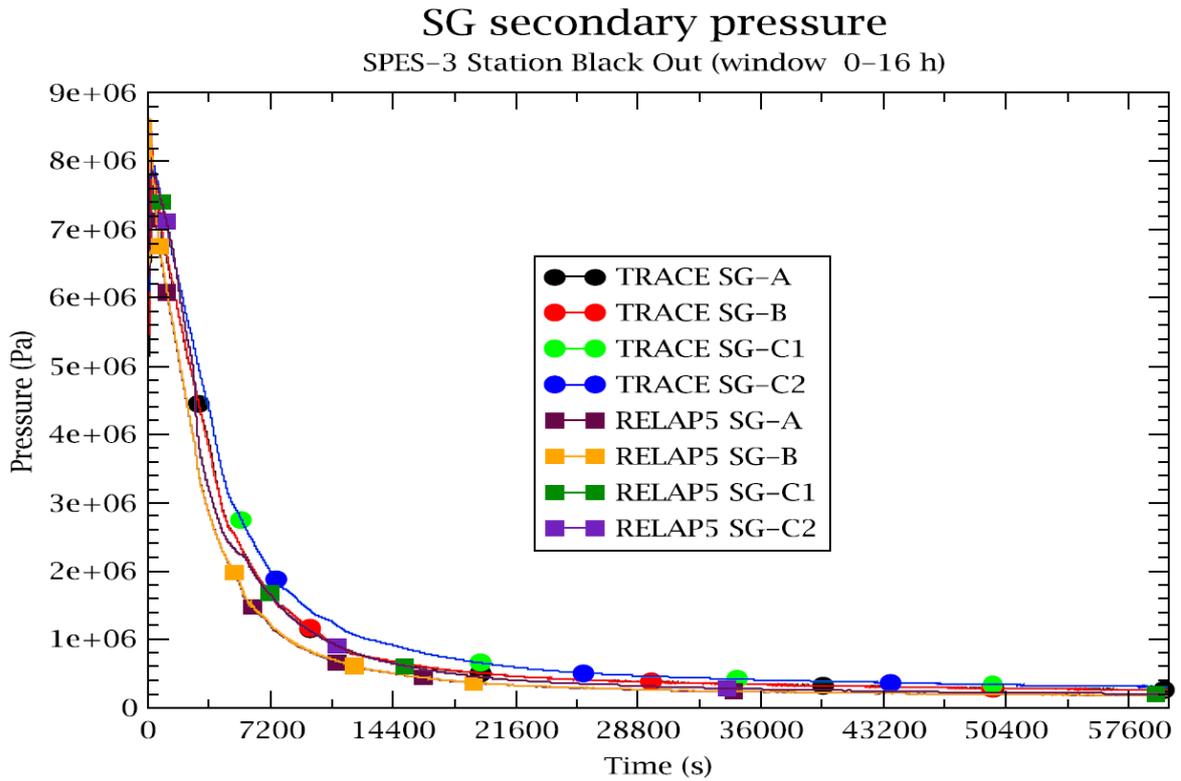


Fig. 5.28 – Pressione nei secondari del generatore di vapore.

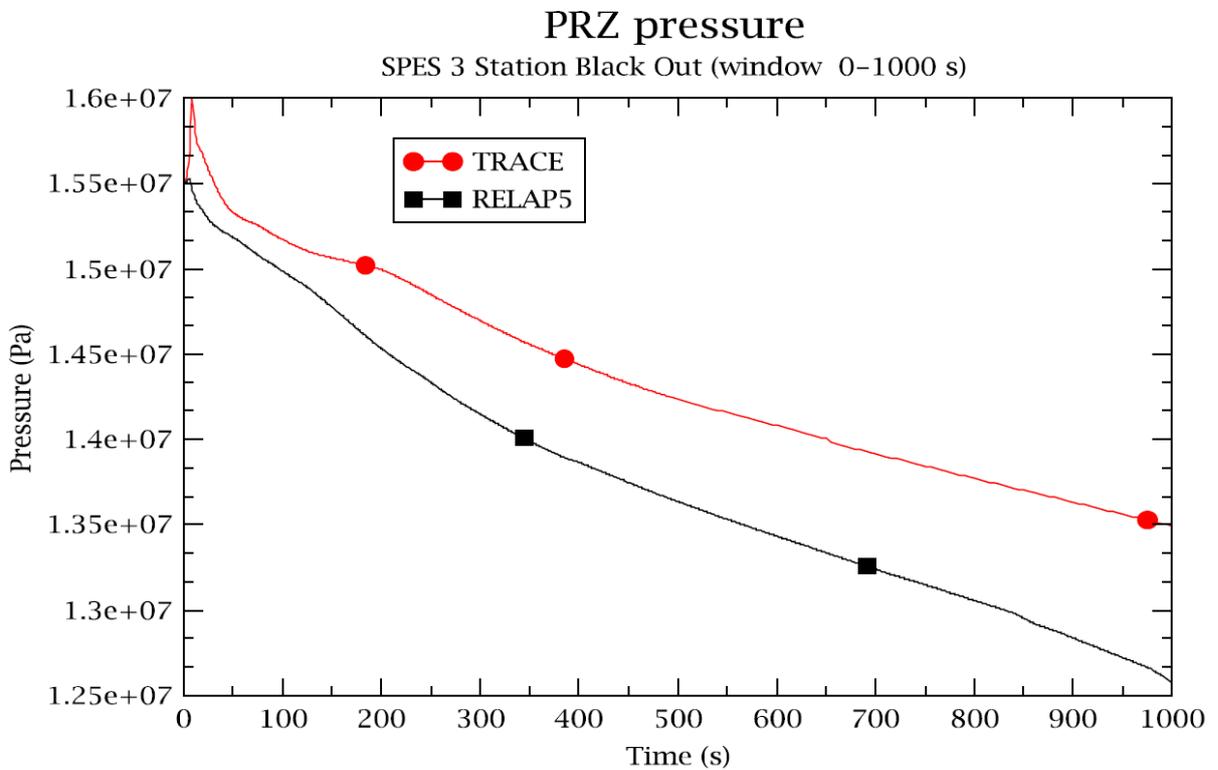


Fig. 5.29 – Pressione nel PRZ (part.).

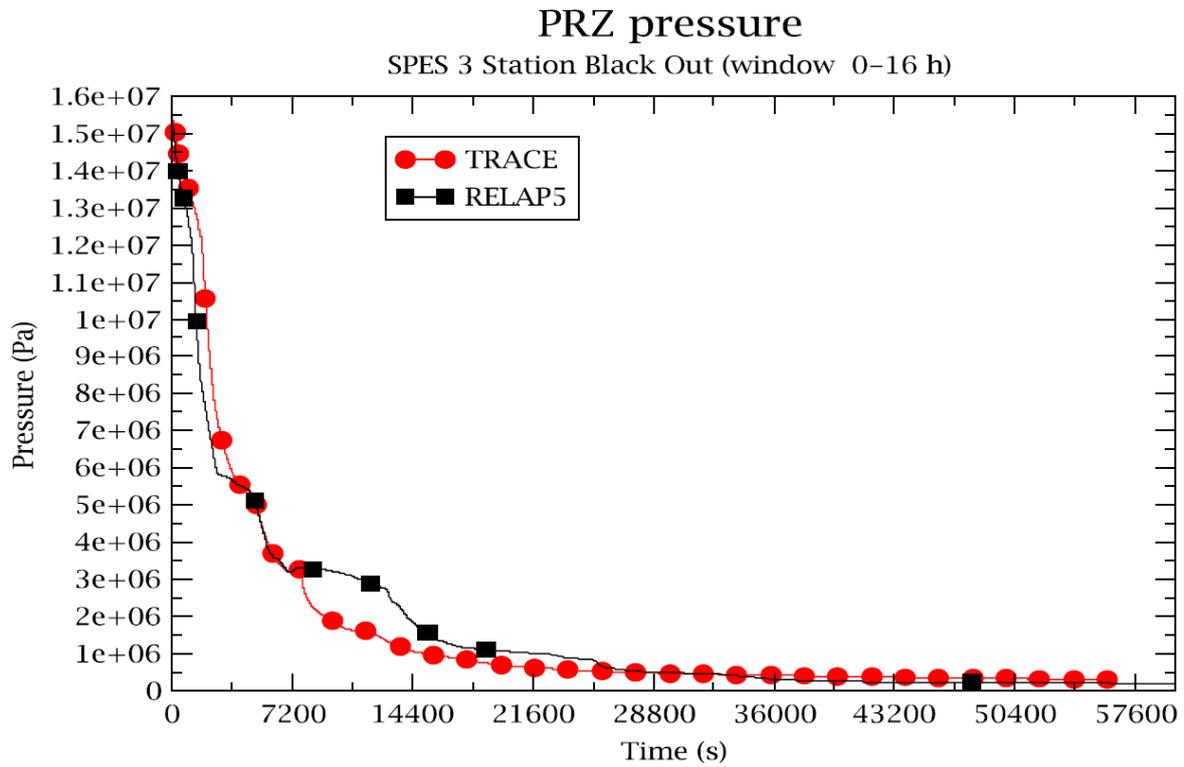


Fig. 5.30 – Pressione nel PRZ.

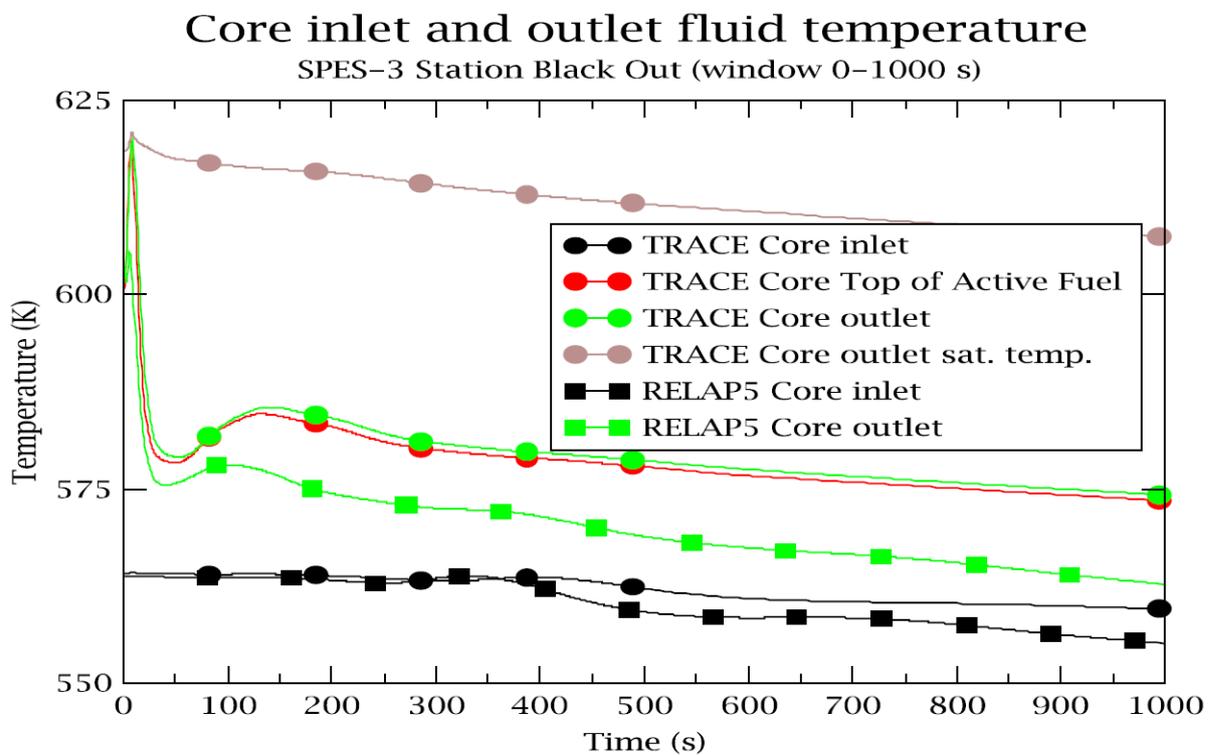


Fig. 5.31 – Temperatura del fluido in ingresso e in uscita dal core (part.).

Core inlet and outlet fluid temperature

SPES-3 Station Black Out (window 0-16 h)

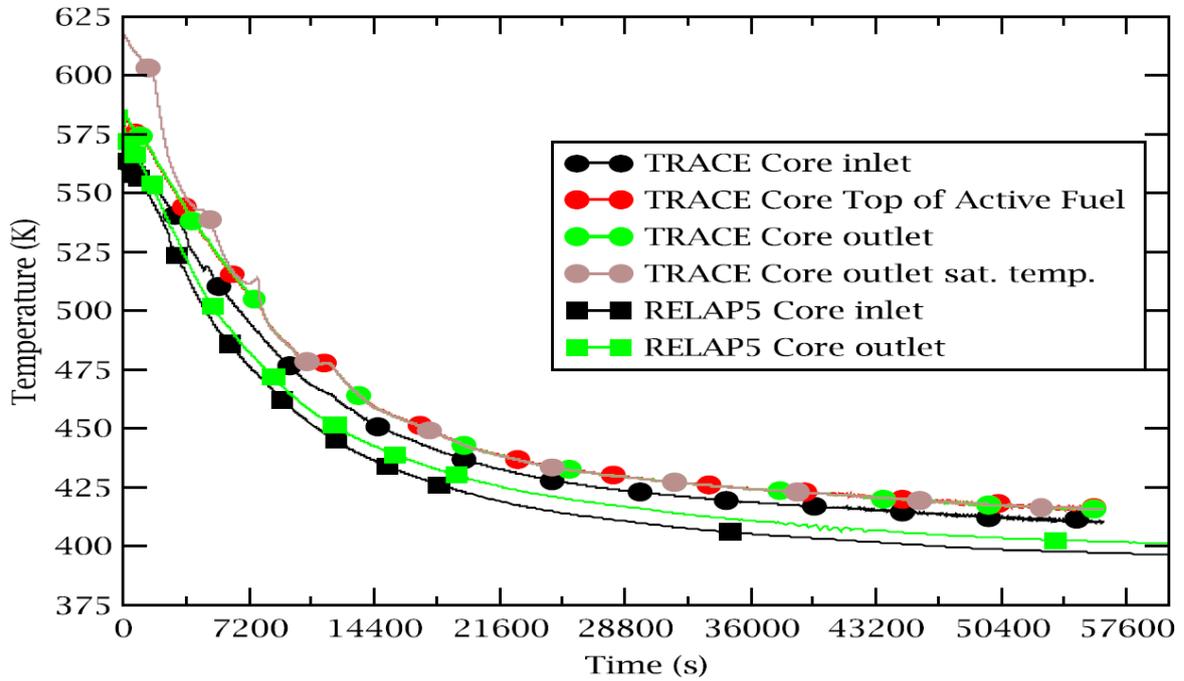


Fig. 5.32 – Temperatura del fluido in ingresso e in uscita dal core.

Core void fraction

SPES-3 Station Black Out (window 0-16 h)

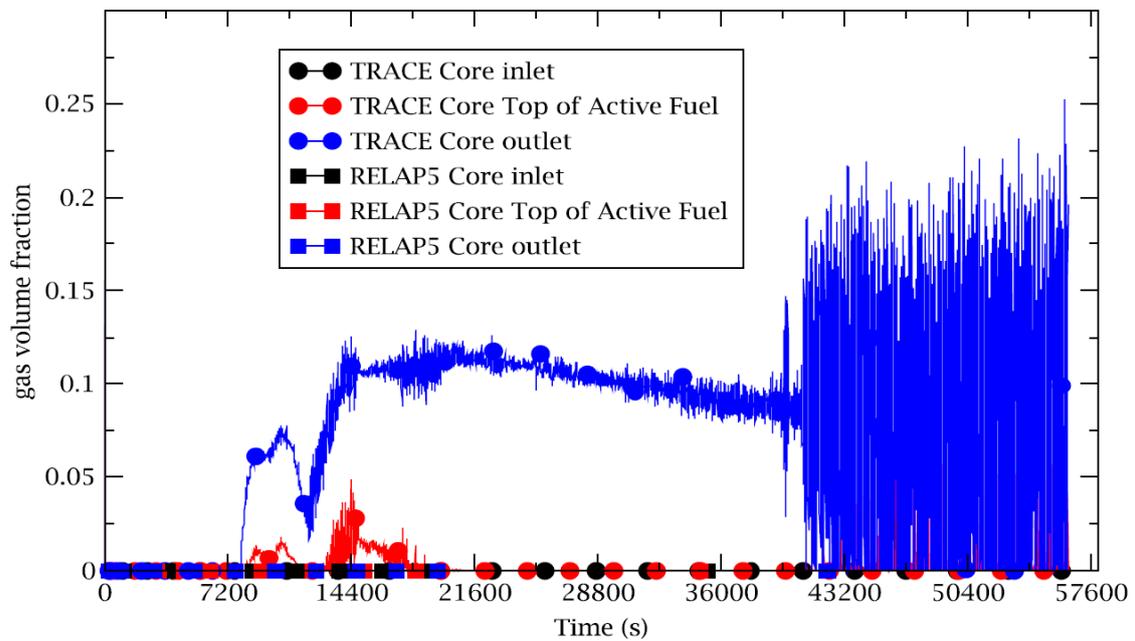


Fig. 5.33 – Grado di vuoto nel core.

Core heaters outer surface temperature

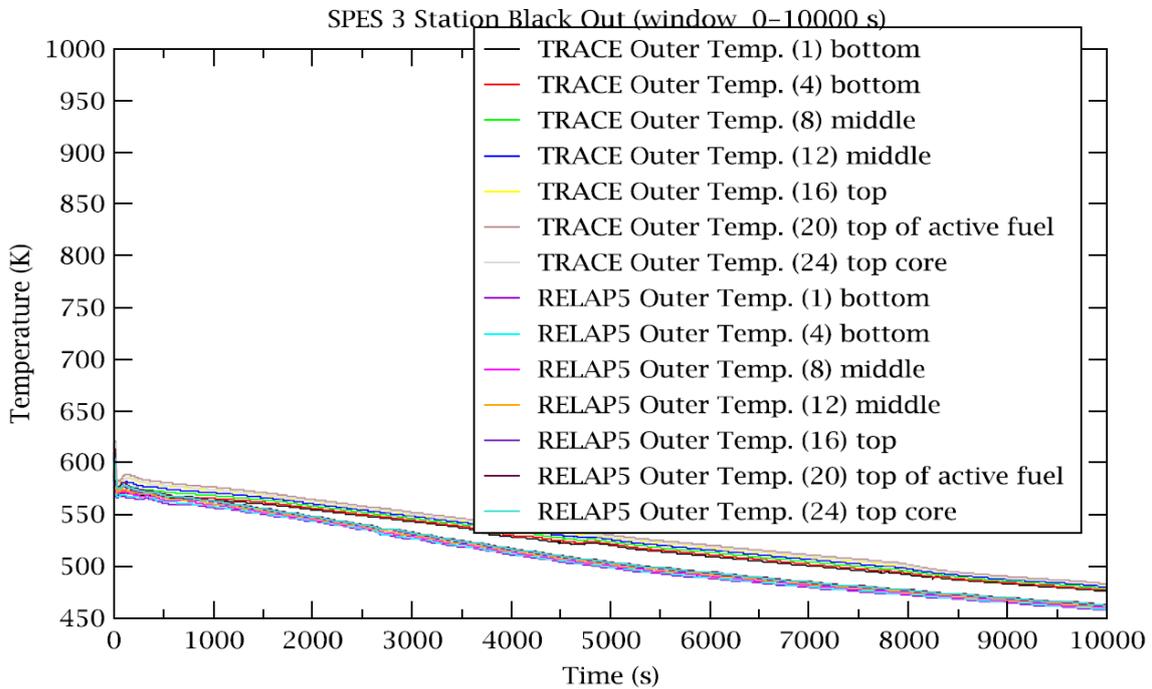


Fig. 5.34 – Temperatura di parete nel canale di potenza (part.).

Core heaters outer surface temperature

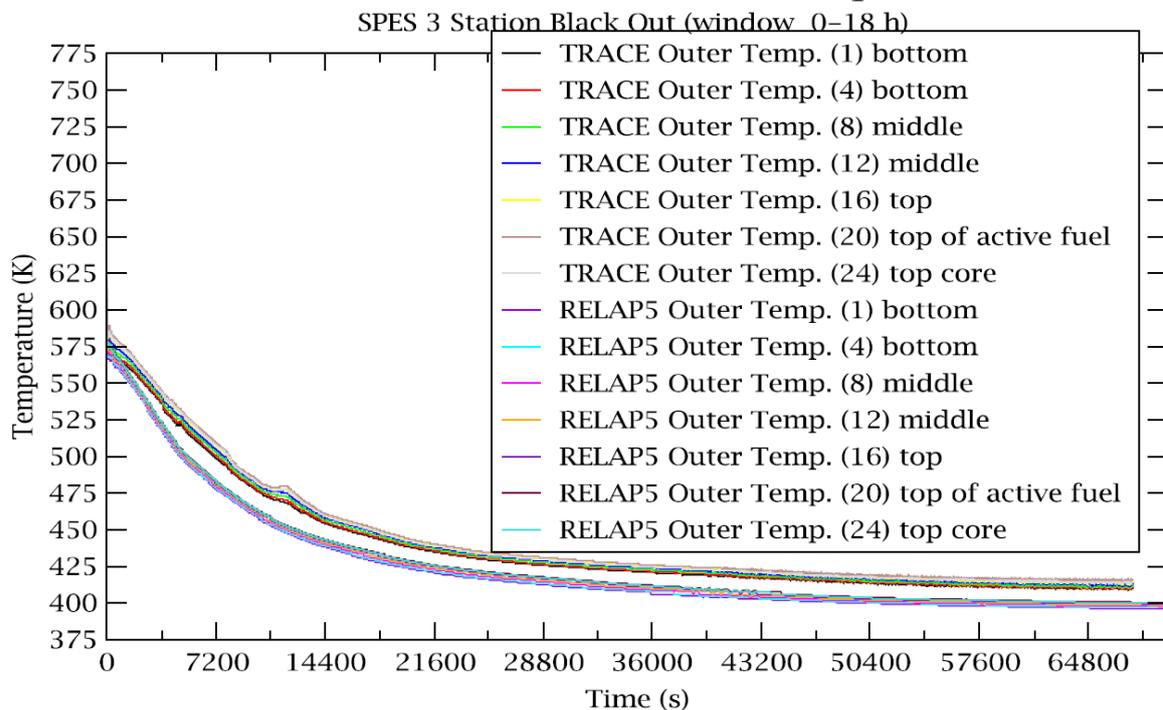


Fig. 5.35 – Temperatura di parete nel canale di potenza.

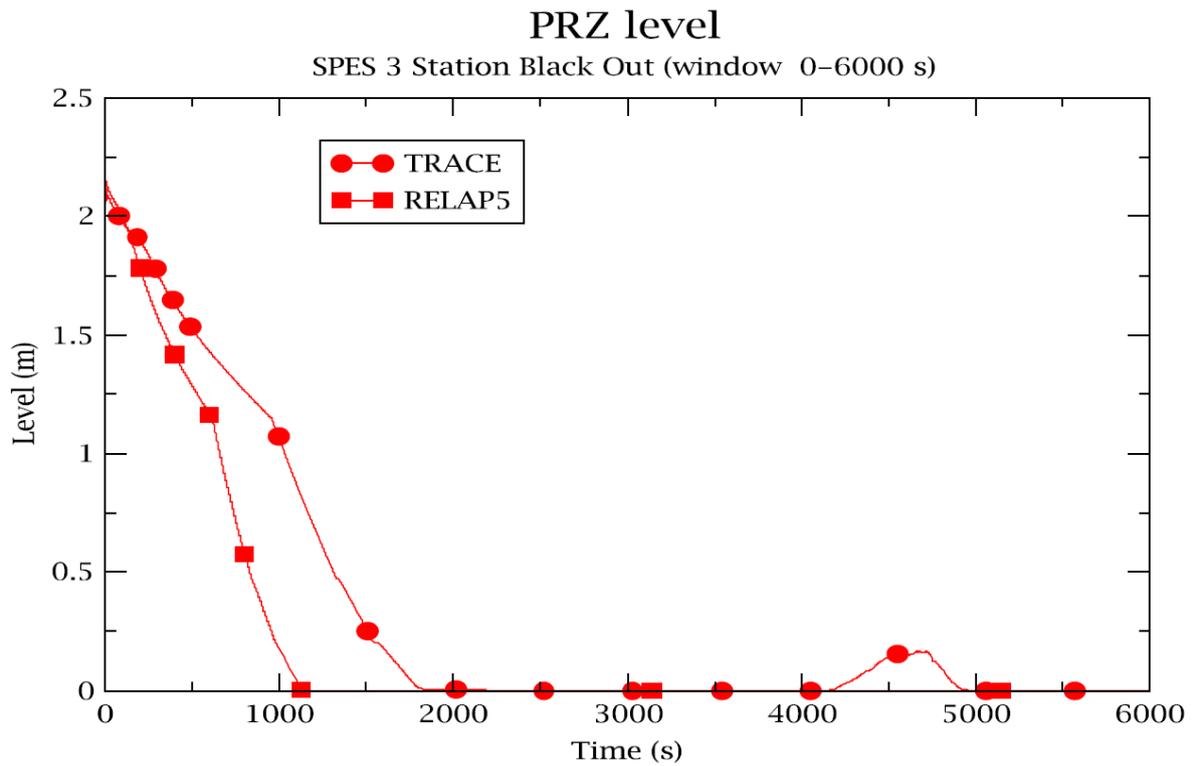


Fig. 5.36 – Livello di liquido nel PRZ.

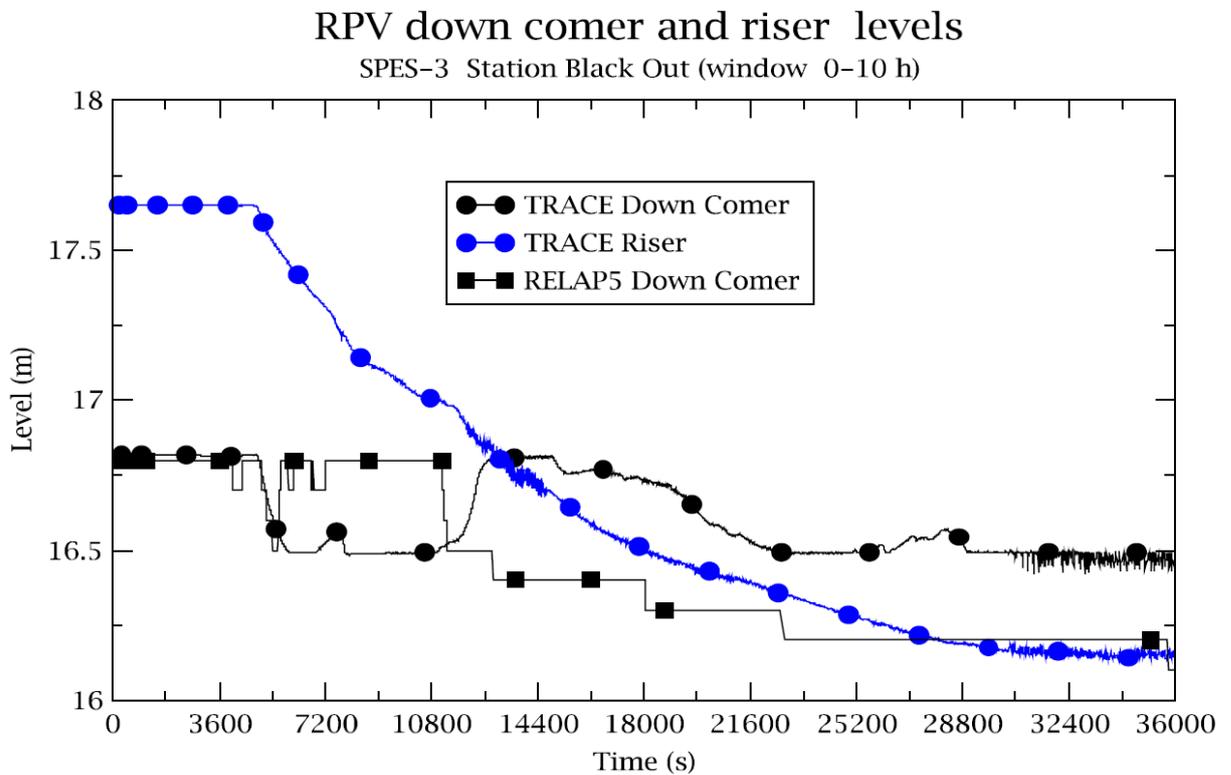


Fig. 5.37 – Livello di liquido nel down comer e nel riser del RPV.

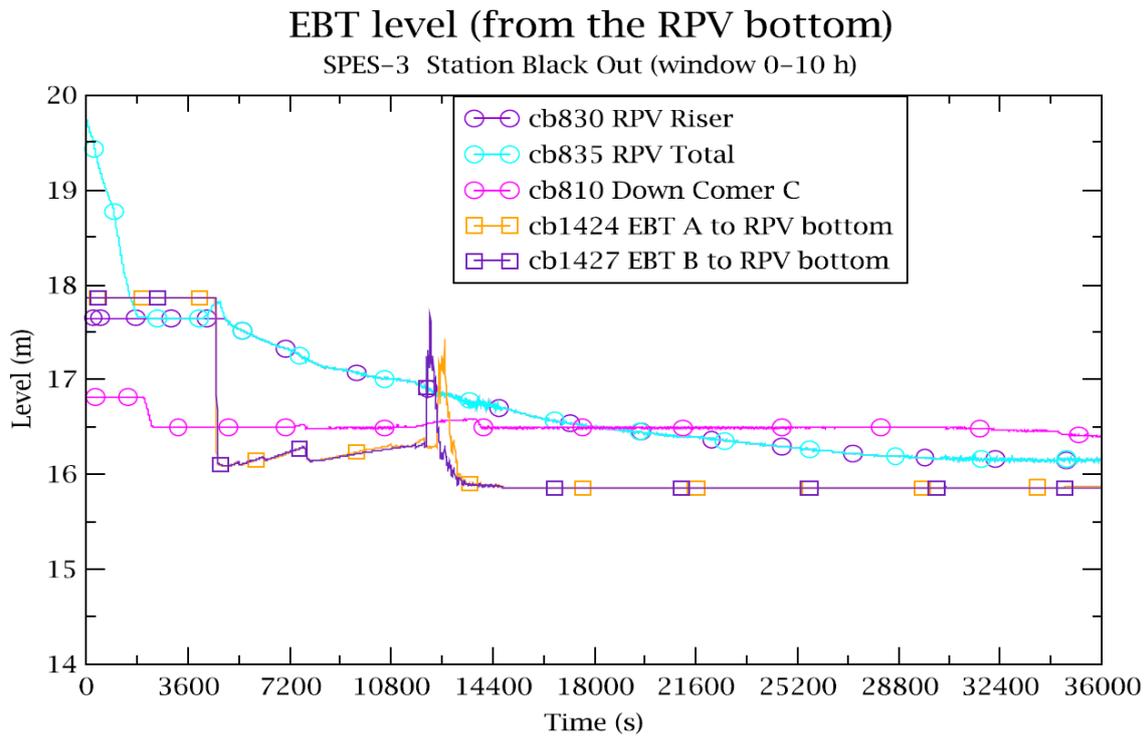


Fig. 5.38 – Livello di liquido nel sistema EBT.

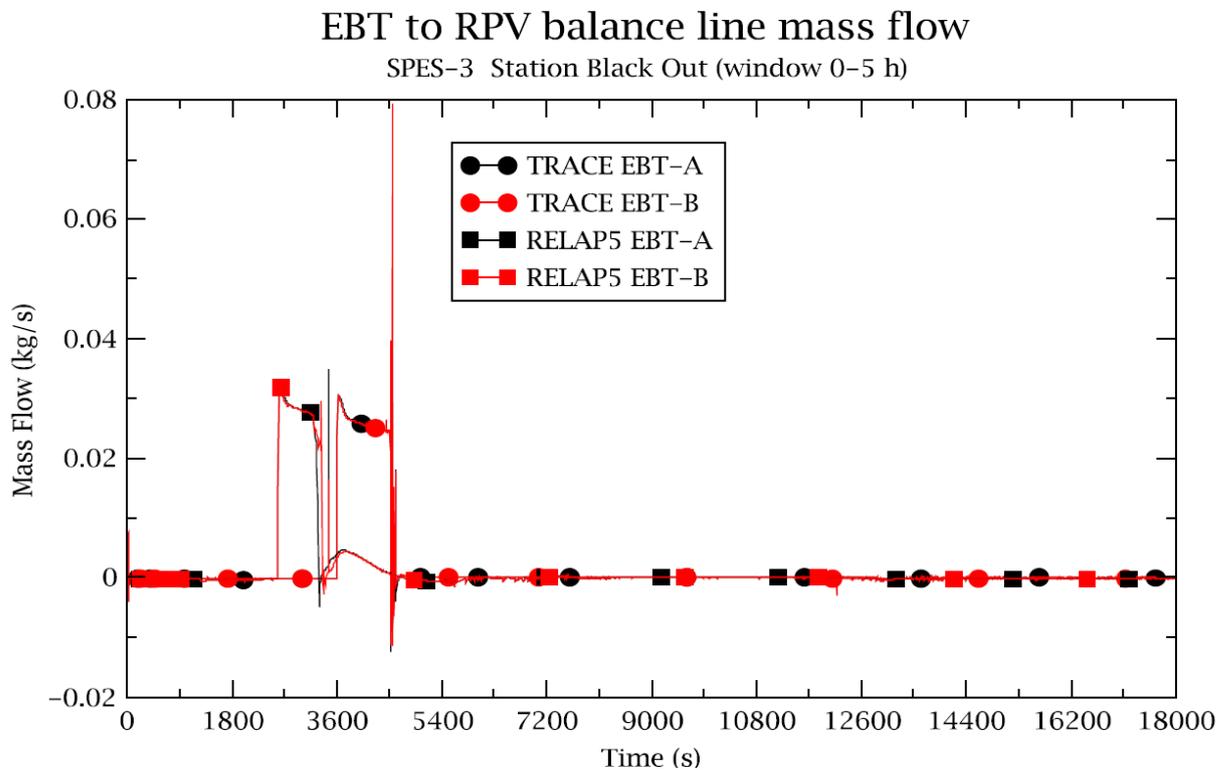


Fig. 5.39 – Portata di fluido iniettata dal sistema EBT nella balance line del RPV.

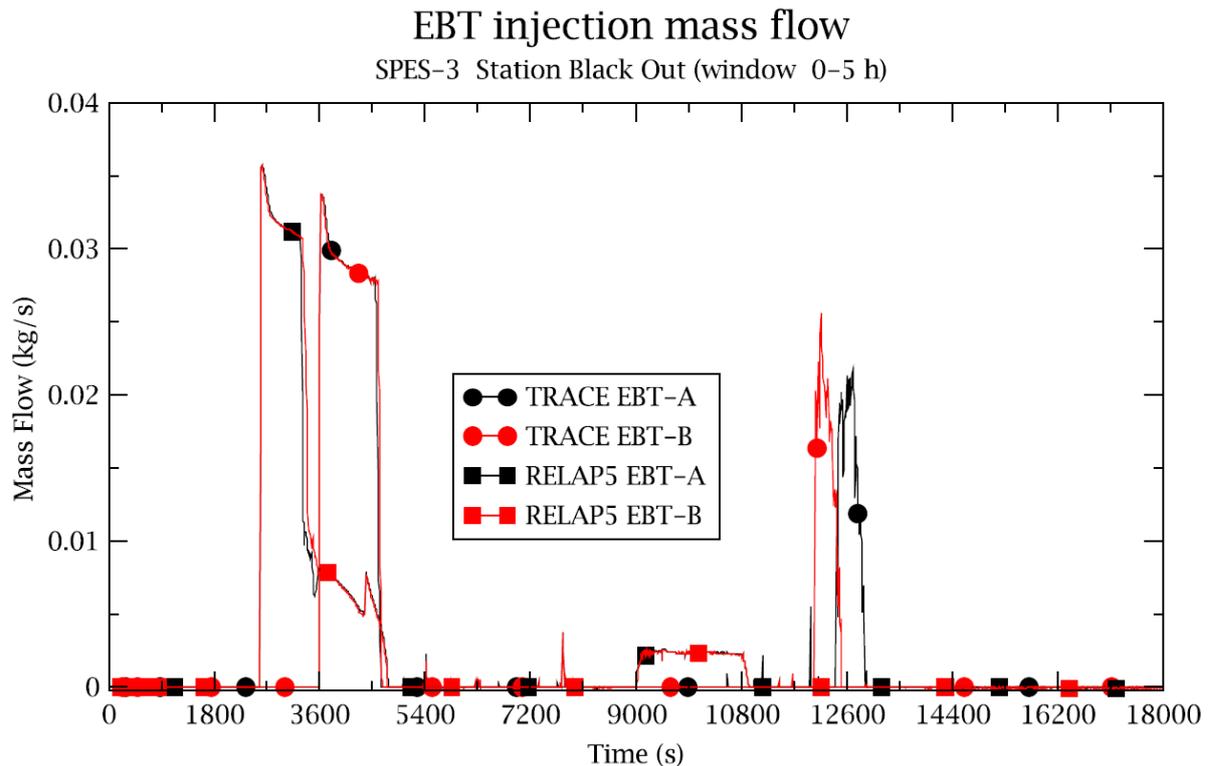


Fig. 5.40 – Portata di fluido iniettata dal sistema nel RPV.

5.4 CONCLUSIONI SULLA SIMULAZIONE DI SBO CON TRACE

Lo studio dello SBO ha permesso di comprendere a fondo il comportamento dell'impianto e la risposta che esso avrebbe di fronte ad un evento simile. Non sono stati riscontrati punti critici che potrebbero mettere in crisi la struttura dal punto di vista termoidraulico. Il modello TRACE per l'impianto SPES-3 è robusto ed affidabile ed ha fornito risposte realistiche e fisicamente fondate nella simulazione dello SBO. Sulla base di ciò, nel futuro si potrebbe pensare di effettuare delle analisi di sensibilità riguardo l'intervento e l'efficacia delle valvole di by-pass della pompa di circolazione primaria. Diversamente rispetto alle centrali di Fukushima, i cui sistemi di emergenza avevano bisogno dei motori diesel per essere azionati, l'impianto SPES-3 è dotato di sistemi di rimozione del calore di tipo passivo, i quali non hanno bisogno di potenza esterna o motori diesel per funzionare. E' doveroso ricordare però che molti sistemi del reattore SMR, la cui logica è simulata dall'impianto SPES-3, sono azionati da gruppi di batterie dunque il loro funzionamento è limitato dall'autonomia che garantiscono quest'ultime.

6. NUOVA CONFIGURAZIONE DI SPES-3 E SIMULAZIONE RELAP5 DEL TRANSITORIO DI SBO

Gli studi condotti nella presente attività da ENEA e Università di Palermo con i codici RELAP5 e TRACE hanno lo scopo di dimostrare la fattibilità di una configurazione alternativa di SPES-3 che utilizzi il canale di potenza e le pompe primarie della facility SPES-2 e accertare la rappresentatività della nuova configurazione nella valutazione di concetti fondamentali per la sicurezza intrinseca, come il forte accoppiamento tra circuito primario-contenimento e l'utilizzo di sistemi passivi.

L'utilizzo del canale di potenza e delle pompe già disponibili presso i laboratori SIET, potrebbero portare al risparmio di circa 3 M€ valutati per il loro acquisto.

Riassumendo, quindi, le linee guida che saranno seguite per l'introduzione di modifiche al progetto dell'impianto SPES-3 sono state pensate per ottimizzare due punti fondamentali:

- perseguire la massima economicità;
- preservare il comportamento termoidraulico dell'impianto.

6.1 COMPONENTISTICA DISPONIBILE DA SPES-2

Nel presente capitolo vengono descritti i componenti di SPES-2 [4] che potrebbero essere impiegati nella nuova configurazione SPES3_2013.

6.1.1 Canale di potenza

Il canale di potenza consiste in un fascio di 97 barrette riscaldate elettricamente ed ha una altezza attiva di 3.66 m.

Le caratteristiche principali del core dell'impianto SPES-2 sono riassunte Tab. 6.1.

Tab. 6.1 – Caratteristiche principali del canale di SPES-2.

NUMERO DI BARRE	Totale	97
	Standard	95
	Hot	2
PRESSIONE E TEMPERATURA DI PROGETTO [MPa/°C]	Standard	20 / 450
		16 / 650
	Hot	20 / 500
		16 / 700
DIAMETRO ESTERNO/INTERNO [mm]	Standard	9.5 / 7.9
	Hot	9.5 / 7.9
ALTEZZA [mm]	Totale	6467
	Dentro al vessel	6220
	Scaldata	3663
POTENZA [kW]	Nominale	4894
	Massima	9000
MATERIALE BARRA	0 - 130 mm	Rame
	130 - 2424 mm	Acciaio AISI 316
	2424 - 6087 mm	INCONEL 600
	6087 - 6467 mm	NICHEL 200
RETICOLO	QUADRATO	
PASSO	12 mm	
GAP BARRA GUAINA	2.8 mm	
CORRENTE MASSIMA	70 Ka	

6.1.2 Pompe

Le pompe di SPES2 sono di tipo centrifugo a singolo stadio orizzontale. Nella loro attuale disposizione, la linea di aspirazione è orizzontale mentre quella di mandata è diretta verso il basso. La portata elaborata dalle pompe è convogliata all'interno di un tubo da 3". La velocità di rotazione può essere controllata in un intervallo di +/- 190% del valore nominale (con fluido in condizioni bifase) e la variazione di velocità può essere programmata.

Le caratteristiche principali di ciascuna pompa dell'impianto SPES-2 sono riassunte nella Tab. 6.2.

Tab. 6.2 – Caratteristiche principali delle pompe di SPES-2.

PRESSIONE [MPa]	Progetto	20
TEMPERATURA [°C]	Progetto	365
CONDIZIONI NOMINALI	Pressione di aspirazione	15.3 MPa
	Temperatura	276 °C
	Portata elaborata	12.6 kg·s ⁻¹
	Potenza	20 kW
	Efficienza	52 %
	NPSHR	2.6 m
PESO [kg]	Totale	620
	Motore	280
	Corpo	1150
SISTEMI DI TENUTA	Fluido	Acqua
	Portata	0.083 kg·s ⁻¹
	Pressione di aspirazione	16.3 MPa
DP TENUTA [MPa]	Interna	0.5
	Intermedia	14.3
	esterna	1.5
INTERVALLO CONTROLLO VELOCITA' [rad/s]	-628 / 628	
POTENZA MASSIMA [kW]	50	
VOLUME FLUIDO [dm ³]	4.3	
INERZIA TOTALE [kgm ²]	3.5	

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 - 009	0	L	48	170

6.2 IL MODELLO RELAP5 DI SPES-3

La nodalizzazione originale per il codice RELAP5 è stata costruita sulla base della progettazione preliminare di SPES-3 effettuata da SIET, ed è il risultato della stretta collaborazione tra ENEA e SIET stessa. Di seguito la nodalizzazione verrà descritta brevemente in quanto oggetto delle simulazioni di transitorio che seguiranno. Per un maggiore dettaglio si rimanda al riferimento [5].

In Fig. 6.1 è riportata la nodalizzazione del circuito primario, che nella vista generale di SPES-3 in Fig. 2.1 è rappresentativa di tutti i volumi all'interno del RV, del core bypass esterno e del sistema di tubazioni per la pompa esterna.

In Fig. 6.2, Fig. 6.3 e Fig. 6.4 sono riportati i circuiti secondari rispettivamente dei loop A, B e C e i corrispondenti sistemi di emergenza EHRS per la rimozione del calore in circolazione naturale. I loop secondari A e B sono rappresentativi di un circuito singolo mentre il loop C rappresenta un circuito doppio. La descrizione dei circuiti secondari è limitata da boundary condition comuni ai tre circuiti. Gli EHRS-A e EHRS-B sono provvisti di scambiatore di calore separati e immersi nella piscina RWST-A, invece EHRS-C ha un singolo scambiatore immerso nella piscina RWST-B.

Infine in Fig. 6.5 è riportata la nodalizzazione del sistema di contenimento in cui è possibile riconoscere tutti i principali componenti e le tubazioni di collegamento della vista generale in Fig. 2.1.

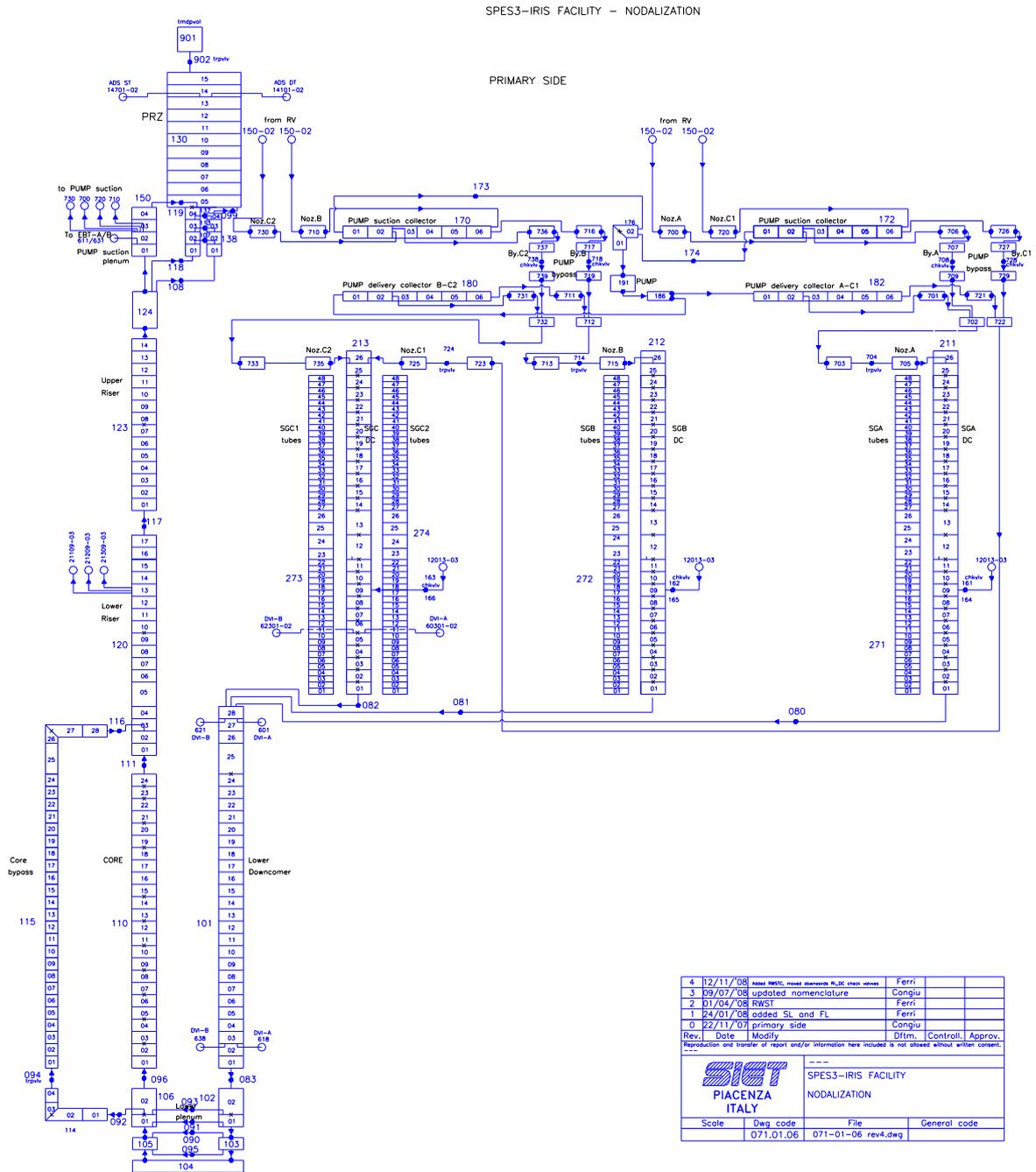


Fig. 6.1 – Nodalizzazione circuito primario SPES-3.

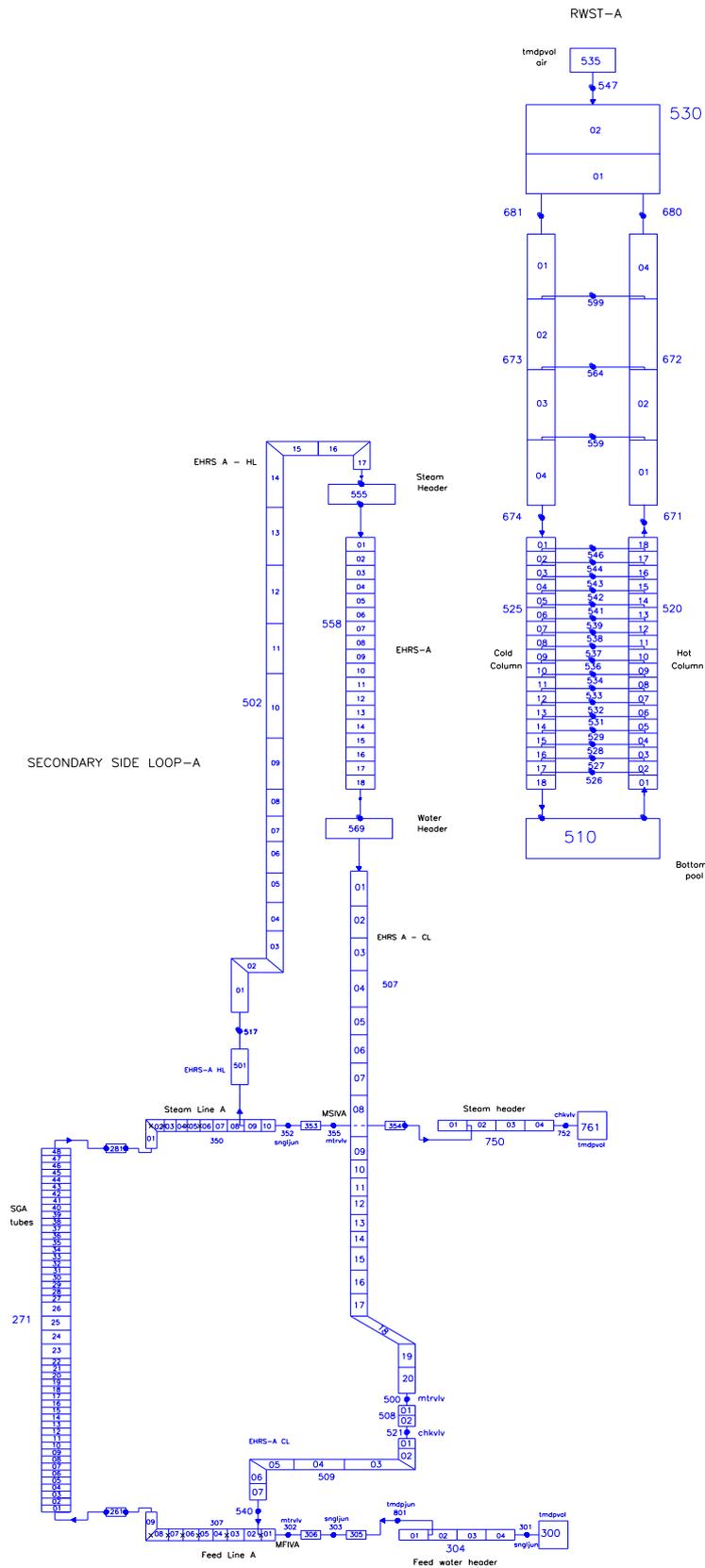


Fig. 6.2 – Nodalizzazione circuito secondario A e EHRIS-A SPES-3.

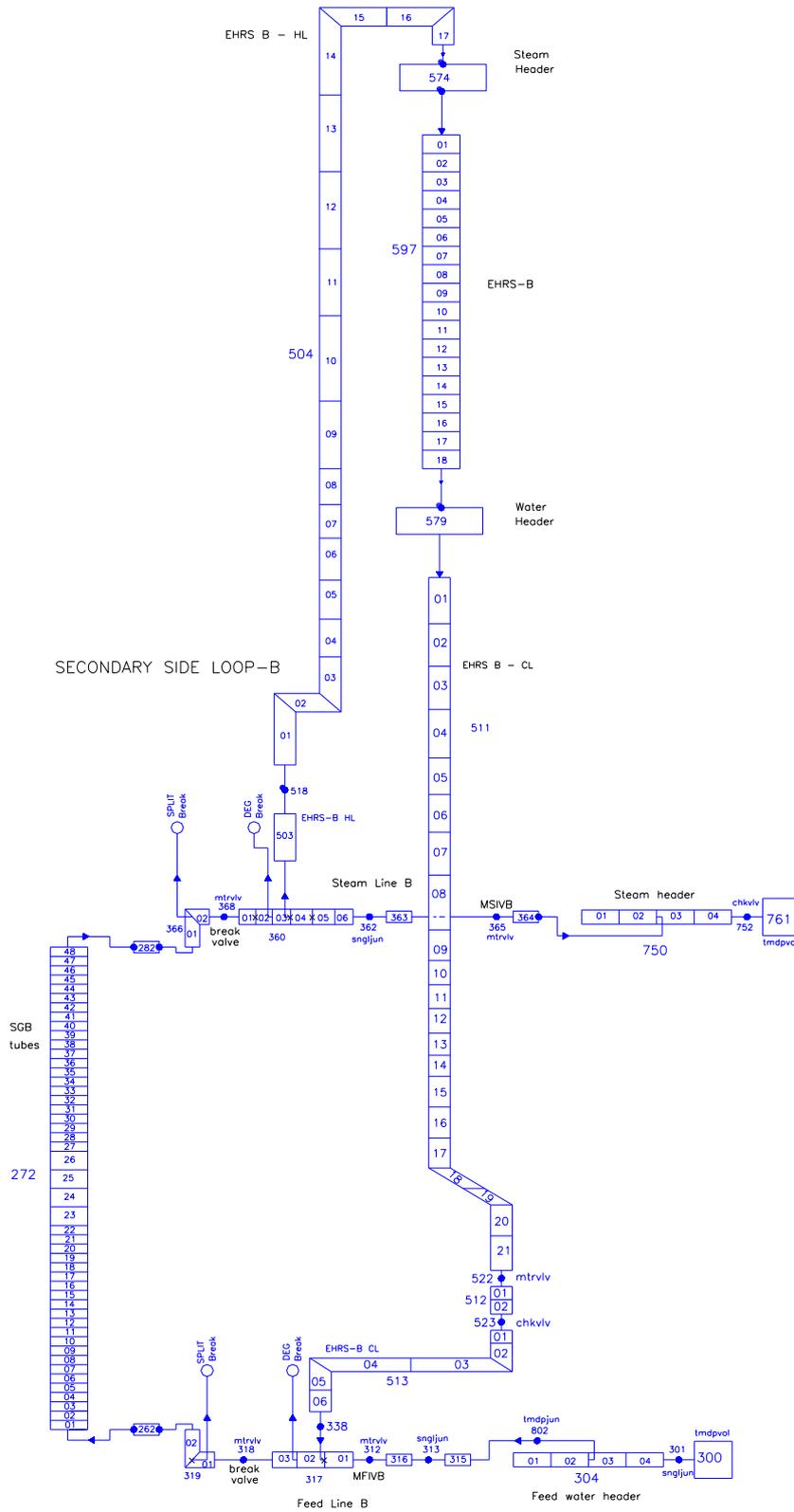


Fig. 6.3 – Nodalizzazione circuito secondario B e EHRB-B SPES-3.

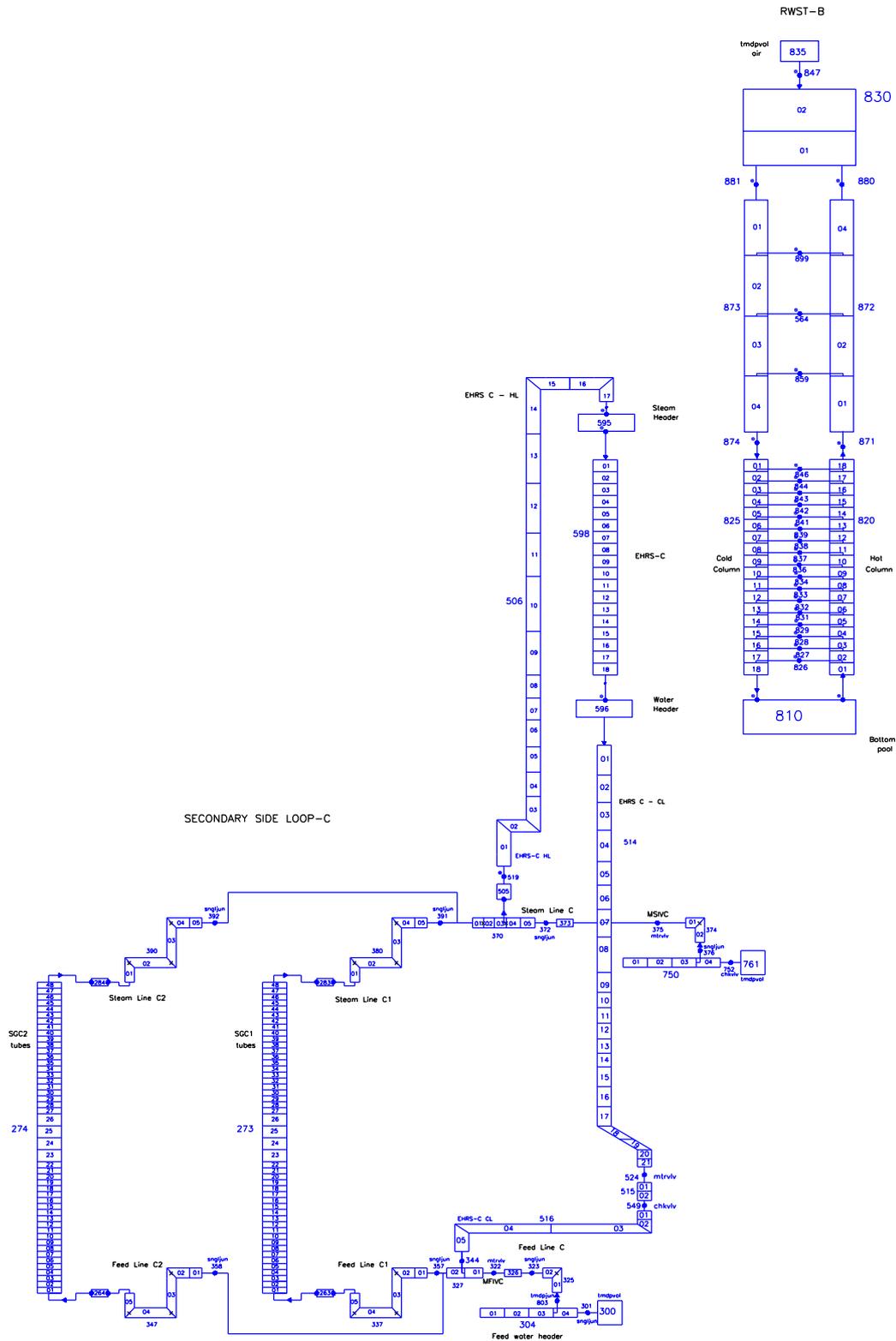


Fig. 6.4 – Nodalizzazione circuito secondario C e EHRIS-C SPES-3.

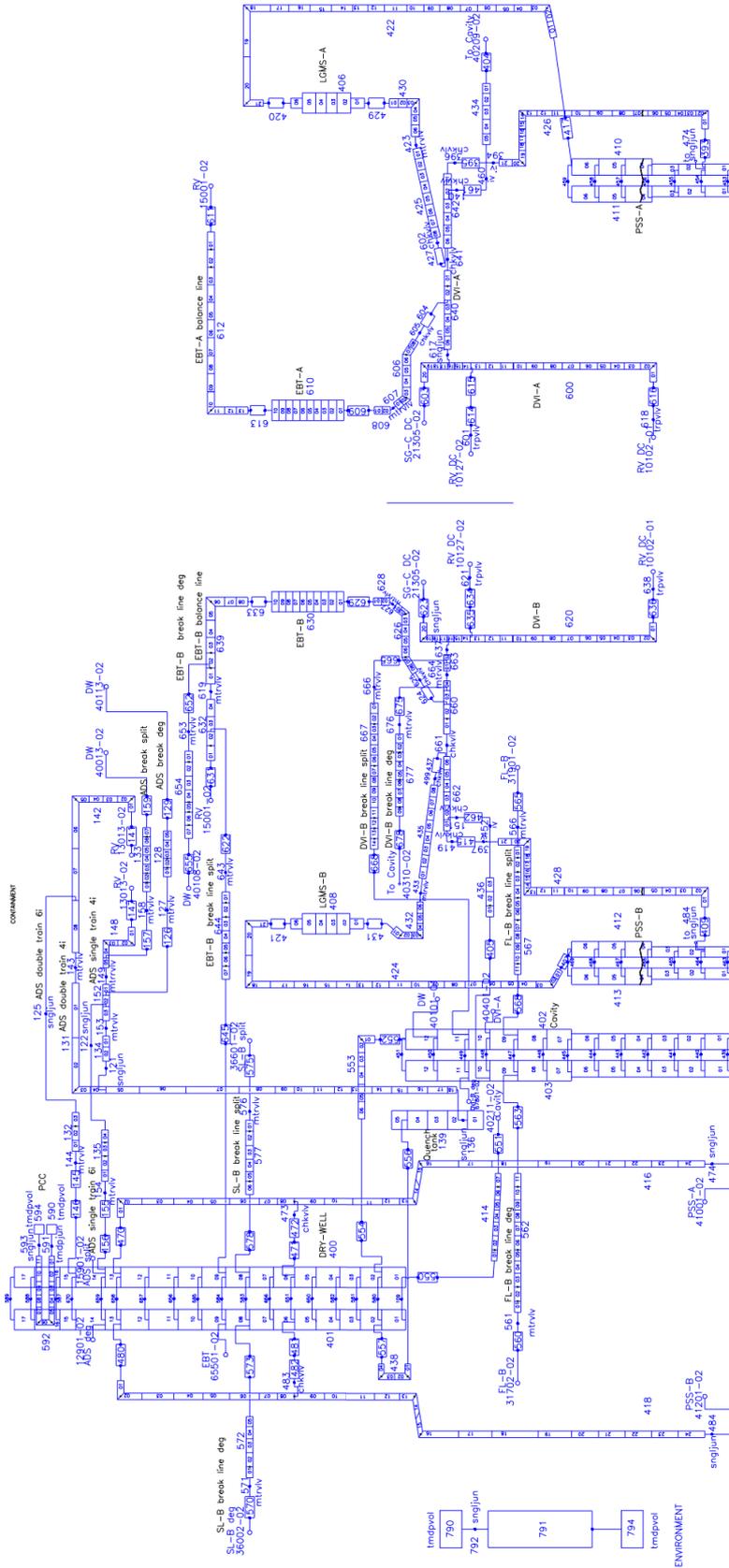


Fig. 6.5 – Nodalizzazione sistema di contenimento SPES-3.

6.3 LE MODIFICHE APPORTATE AL MODELLO RELAP5

Prima di esporre le modifiche che saranno proposte è necessario mettere in evidenza alcuni presupposti che hanno guidato le nostre decisioni.

In primo luogo, la presente attività ha un intento esplorativo nei riguardi della fattibilità, ma soprattutto lo scopo di verificare che la sostituzione di componenti SPES-3 con componenti recuperati da SPES2 non alterino la rappresentatività di impianti SMR del nuovo sistema.

Il punto di partenza sono state le nodalizzazioni per RELAP5 dei due impianti, e da qui, sono state valutate le modifiche da apportare all'impianto per accomodare i componenti provenienti da SPES2, principalmente la sezione scaldante e le pompe del circuito primario. Dato che i modelli sia di SPES2 sia di SPES-3 sono stati ampiamente testati con un gran numero di simulazioni incidentali, e nel caso di SPES2 anche confrontati con gli stessi dati sperimentali, è stato deciso di conservare per quanto possibile le nodalizzazioni originarie e limitare le modifiche alle zone di connessione tra le parti dei due modelli. Anche se la connessione fisica tra i componenti è stata tenuta in considerazione, l'ingegnerizzazione e l'ottimizzazione delle modifiche proposte non sono in oggetto e saranno demandate a future attività.

In un primo momento, al fine di abbassare i costi di approvvigionamento, è stata presa in considerazione l'opportunità di modificare anche la regione degli scambiatori di calore primari presenti all'interno del RV, ad esempio montando dei componenti esterni al RV che avrebbero alloggiato scambiatori in controcorrente a tubi dritti. Da prime sommarie valutazioni, la strada non si è dimostrata percorribile poiché si sarebbe compromessa la termoidraulica dell'intero sistema, dato che i tubi dritti non avrebbero potuto garantire il giusto grado di surriscaldamento del vapore secondario.

Si è quindi venuta a delineare la necessità di conservare gran parte del RV così come progettato da SIET, ad eccezione della regione delle barre scaldanti. In Fig. 6.6 è possibile notare la regione bassa del RV che sarà modificata nella zona sottostante la linea tratteggiata in rosso. La zona immediatamente sotto la flangia (colorata in verde) costituirà il volume inferiore del nuovo downcomer anulare. In questa regione sarà connesso il downcomer tubolare così come da impianto SPES2. Il bypass sarà eliminato, ma in caso di necessità potrebbe essere ripristinato anche nella nuova configurazione. La regione superiore del RV, a partire dalla flangia, non sarà oggetto di modifiche.

La Fig. 6.7 sintetizza le modifiche da apportare alla regione scaldante proveniente da SPES2 per essere implementata nell'impianto SPES-3.

L'idea alla base della presente attività è di non modificare, per quanto possibile, il comportamento termoidraulico del nuovo sistema, per cui si è deciso in prima istanza che il piano mediano della nuova sezione scaldante (componente di SPES2) mantenga la stessa elevazione del piano mediano originale di SPES-3. Conservando la differenza di quote medie tra la regione scaldante e gli scambiatori di calore, l'intento è quindi quello di mantenere la medesima driving-force nel caso in cui l'impianto si trovi a operare in regime di circolazione naturale.

Lo svantaggio di mantenere le stesse quote medie della sezione scaldante risiede nel fatto che l'introduzione del componente SPES2 introduce maggiori perdite di carico al circuito primario con il risultato di ridurre la portata d'acqua disponibile in circolazione naturale. Anche questo aspetto, cioè un possibile abbassamento di quota della regione scaldante, potrebbe essere oggetto di ottimizzazione in future attività.

Tutta la parte superiore del vessel di SPES2 compreso il downcomer anulare sarà rimosso e sostituito con parti progettate per SPES-3. Infine il downcomer tubolare sarà modificato in modo tale da accomodare il nuovo layout. Le perdite di carico del canale di potenza di SPES2 sono conservate.

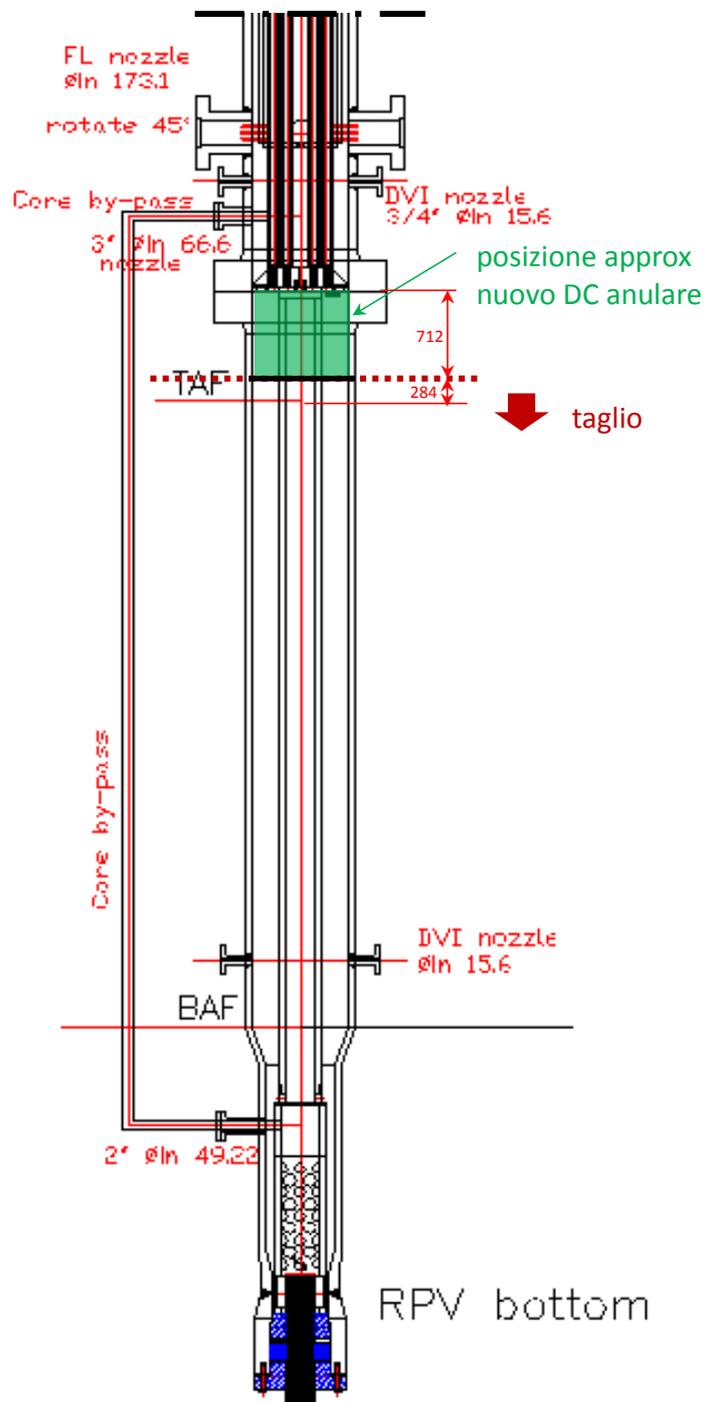


Fig. 6.6 – Modifiche apportate all'RV di SPES-3.

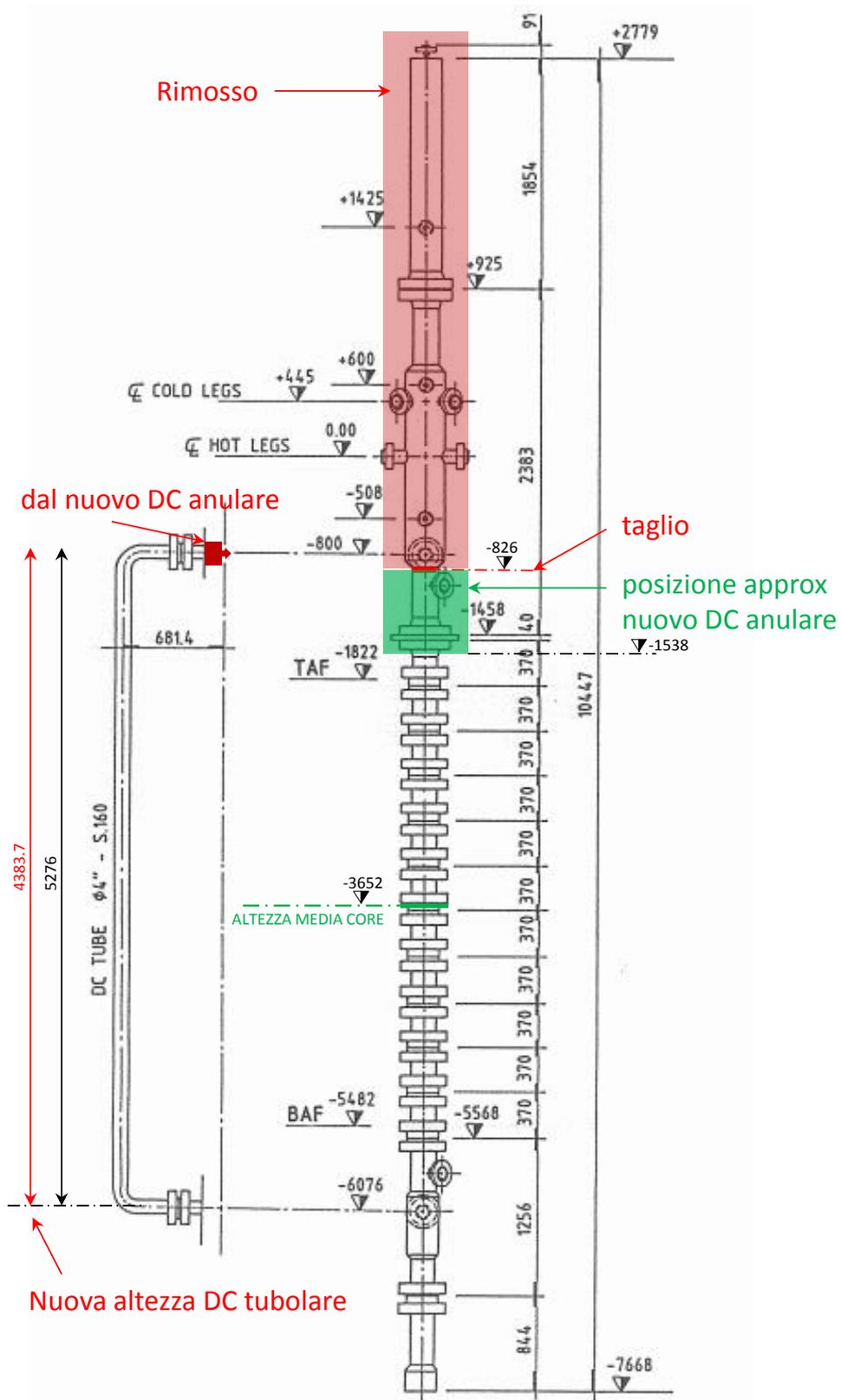


Fig. 6.7 – Modifiche apportate alla regione core di SPES2.

Il seguente schema di Fig. 6.8 rappresenta la nuova nodalizzazione RELAP5 della regione core. In blu è riportata la parte originale e non modificata del modello SPES-3, in rosso la parte oggetto di modifiche di provenienza SPES2. In particolare, i sottovolumi da 03 a 07 corrispondono ai sottovolumi da 24 a 28 del downcomer anulare (100). I sottovolumi 01 e 02 sono di derivazione SPES-3 per quanto riguarda le dimensioni radiali. Qui sarà posta una flangia di collegamento per il downcomer tubolare (101) che non è stato modificato, ma la cui altezza è stata adattata (accorciata) per adattarsi al nuovo layout. Il lower plenum (106) e il canale di potenza (110) fino al sottovolume 09 non sono modificati. I sottovolumi da 10 a 12, con dimensioni pari al tubo del canale di potenza, sono stati introdotti al fine di conservare la quota del piano mediano della sezione attiva. La regione attiva del core va dai sottovolumi 02 a 09.

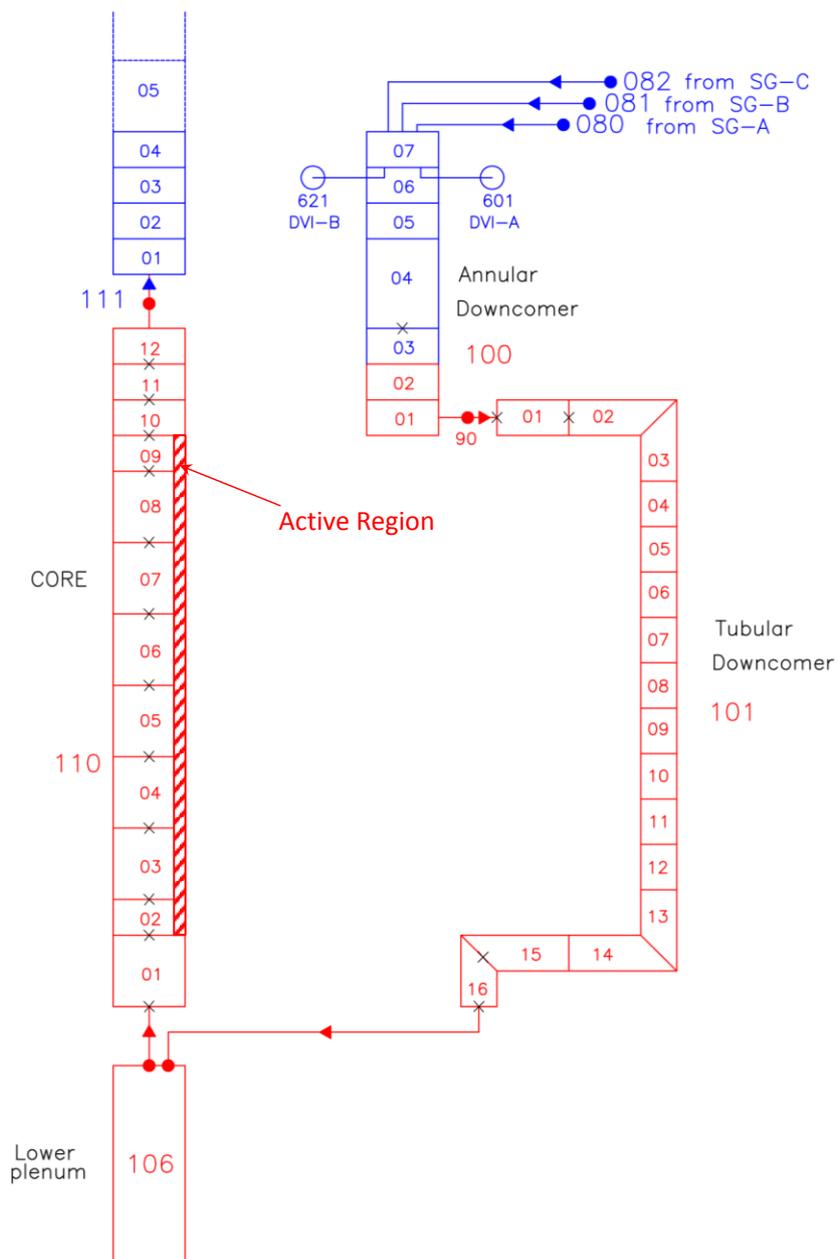


Fig. 6.8 – Particolare della nodalizzazione della nuova regione core.

Per quanto riguarda la regione pompe del circuito primario, il complesso sistema di distribuzione in Fig. 6.9 progettato per SPES-3 è stato conservato anche perché oggetto di intensa ottimizzazione per ciò che riguarda la distribuzione delle portate tra i quattro rami di suzione e di mandata, attraverso la regolazione delle perdite di carico. Sempre in Fig. 6.9 è riportato uno schema della nuova configurazione con le due pompe di SPES2 poste in parallelo che saranno collegate ai collettori attraverso le medesime sezioni previste nella configurazione a una pompa di SPES-3. In Fig. 6.10 è schematizzata la nodalizzazione della nuova regione pompe.

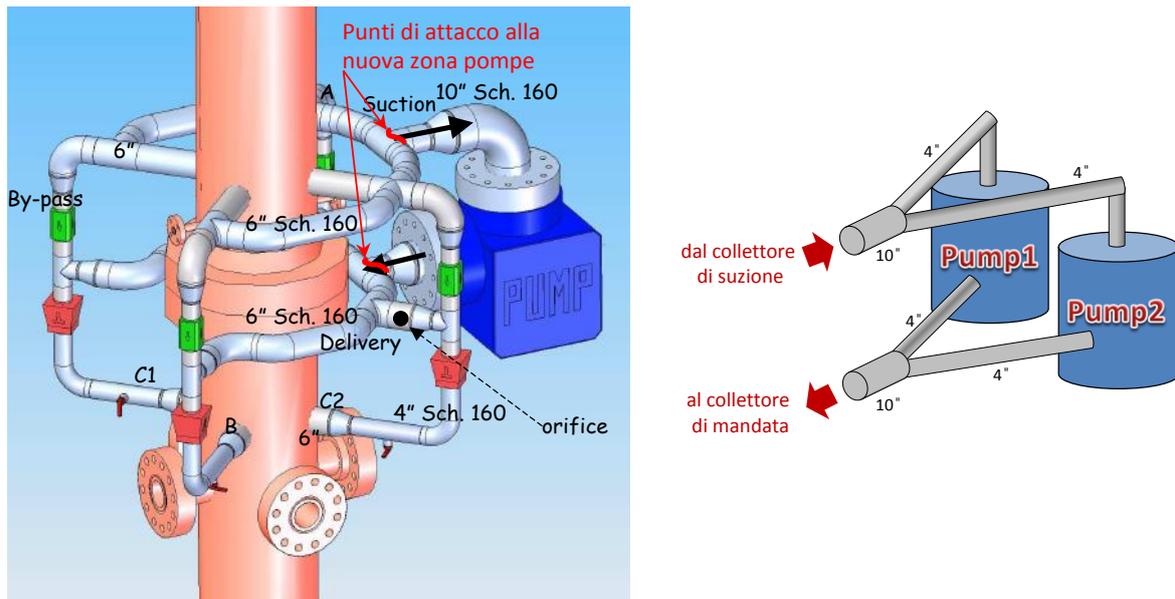


Fig. 6.9 – Schema delle modifiche apportate alla regione pompe.

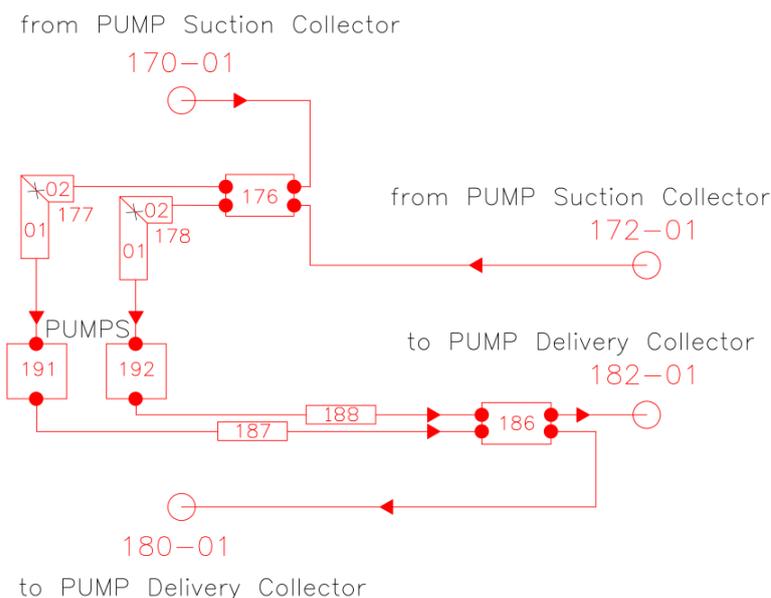


Fig. 6.10 – Particolare della nodalizzazione della nuova regione pompe.

Nella configurazione parallela, le due pompe di SPES2 dovrebbero essere in grado di fornire una portata in funzionamento nominale comparabile a quella di progetto, cioè 24.3 kg/s. La società SIET ha comunque confermato che il regime di rotazione nominale delle pompe potrebbe essere aumentato di circa il 10% fornendo così una maggiore elasticità nel loro eventuale impiego.

Le curve omologhe necessarie alla rappresentazione dei regimi di funzionamento delle pompe sono state implementate senza alcuna modifica, ciononostante va considerato il fatto che le caratteristiche di pompe poste in parallelo sono diverse dalle caratteristiche delle singole pompe che lo compongono. Nel presente studio, i transitori in cui le pompe debbano eseguire una transizione del regime di funzionamento non saranno oggetto di simulazione, ma saranno semplicemente spente. Perciò, in prima approssimazione, si è deciso di procedere con le caratteristiche originarie. Un affinamento del modello delle pompe potrebbe essere oggetto di future attività.

Per finire, dato che le perdite di carico complessive del circuito primario si sono dimostrate inferiori a quelle di SPES2, si è reso necessario introdurre una forte perdita in carico nella sezione di mandata al fine di ricreare, sebbene in modo fittizio, il punto originario di funzionamento delle pompe ed evitare importanti problematiche riconducibili alle caratteristiche delle pompe.

In Fig. 6.11 è riportato lo schema generale del nuovo circuito primario con, in rosso, le parti oggetto di modifica relativamente al modello originale di SPES-3, in blu.

A questo punto è importante sottolineare che l'introduzione delle suddette modifiche fa ridurre l'inventario di acqua presente nel circuito primario da circa 3000 kg a circa 2000 kg, con una importante riduzione di oltre il 30%. La conseguenza attesa da questa riduzione è una maggiore prontezza del sistema a variare le temperature nei transitori incidentali.

Il nuovo modello sarà impiegato per la simulazione di un transitorio di SBO (transitorio-177) e la rottura da 4" equivalenti della linea superiore EBT (transitorio-180). Nell'ambito della precedente annualità del PAR, i suddetti transitori sono già stati simulati da SIET con riferimento alla configurazione originale di SPES-3 [3]. I risultati delle simulazioni originali e di quelli ottenuti nella nuova configurazione saranno di seguito messi a confronto.

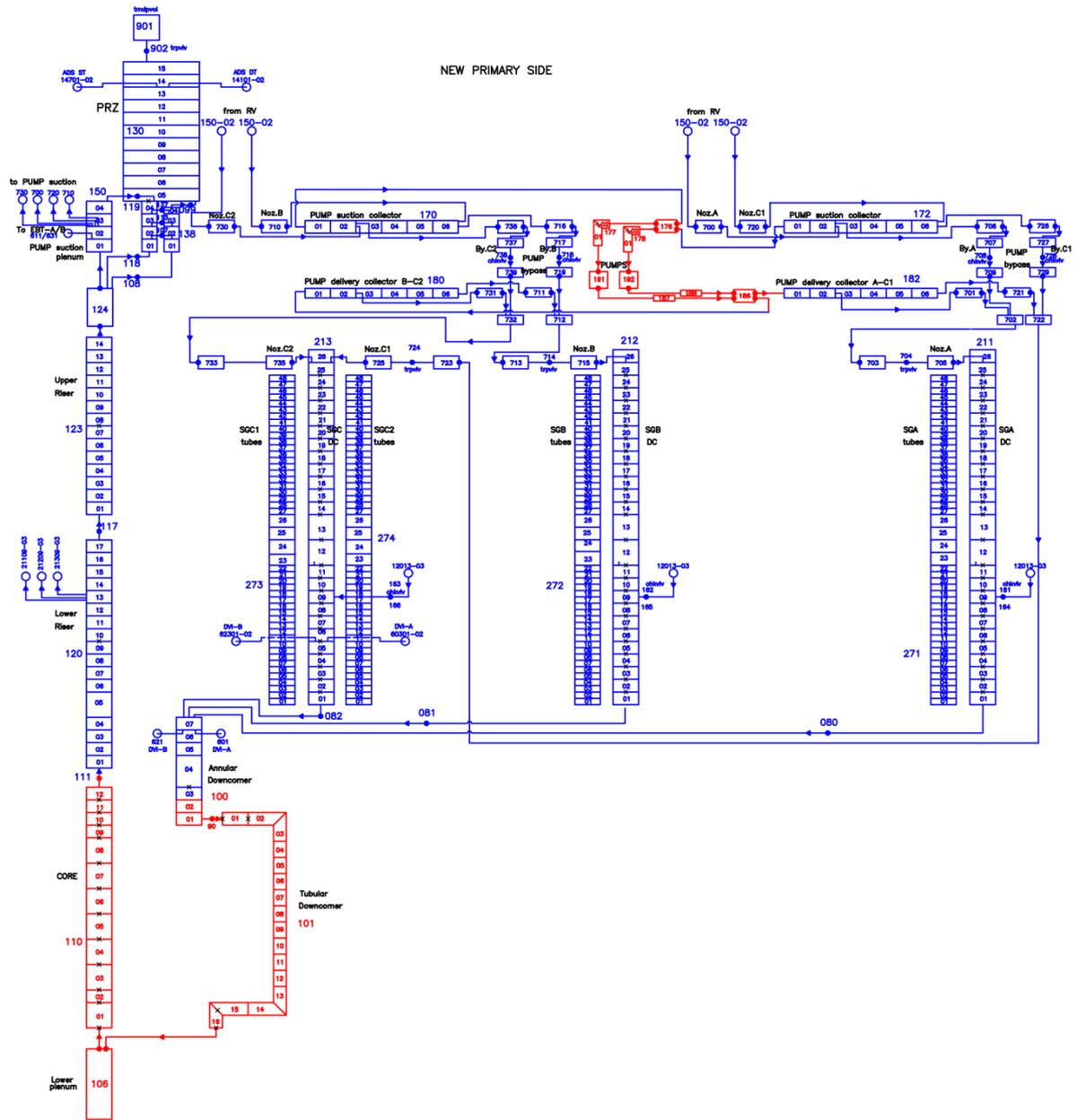


Fig. 6.11 – Nodalizzazione del nuovo circuito primario.

6.4 TRANSITORIO DI STATION BLACK-OUT (177)

A seguire riportiamo succintamente gli eventi principali della sequenza incidentale di Fukushima, verificatosi in Giappone l'11 marzo del 2011 come conseguenza di un terremoto di magnitudo 9.0 seguito da uno tsunami di 14 m [6].

A causa del terremoto si sono verificati i seguenti eventi:

- SCRAM tempestivo di tutti gli impianti presenti nei siti interessati dal terremoto;
- assenza di alimentazione elettrica off-site.
- avvio dei sistemi attivi di raffreddamento di emergenza alimentati da motori diesel.

Questi ultimi sono rimasti in funzione sino al verificarsi dello tsunami, a seguito del quale sono andati fuori servizio.

In conseguenza di ciò si è verificato il tipico incidente di SBO caratterizzato dall'indisponibilità di tutti i sistemi di alimentazione elettrica in- e off-site, quindi di tutte le pompe incluse quelle di alimentazione degli ECCS.

In seguito al verificarsi dell'incidente sopra descritto si è deciso di simularlo sia sulla nuova configurazione della facility SPES-3 che su quella originaria e di confrontarne i risultati. La definizione della sequenza incidentale è stata preparata sulla base della stessa sequenza presentata in [7]. Essa è derivata a partire da una tipica sequenza di perdita di alimentazione del secondario dei generatori di vapore e perdita di alimentazione elettrica esterna all'impianto.

Si è assunto che le valvole d'intercettazione del sistema EHRS, normalmente chiuse, si siano regolarmente aperte e tale sono rimaste per tutto il transitorio.

L'evento iniziatore della sequenza incidentale è il terremoto. La perdita di alimentazione elettrica dell'impianto, supposta contemporanea al terremoto, consente il blocco sia delle pompe di circolazione del fluido primario che di quelle del secondario. Si instaura quindi la circolazione naturale tra il bypass delle pompe e le check-valve inserite tra il riser e il downcomer.

Sulla base del segnale di basso valore della portata di alimentazione del secondario (circa il 75% del valore nominale) viene effettuato lo scram del reattore. Quando il livello di liquido al secondario del generatore di vapore risulta inferiore a 0.25 m vengono isolate i secondari di tutti e tre i generatori. Il segnale di basso livello (inferiore a 0.25 m) o di elevata pressione (superiore a 9 MPa) sul secondario del generatore di vapore fa aprire le valvole dei sistemi EHRS-A e B (il sistema EHRS-C interviene solo sulla base di un segnale emesso da un transitorio del tipo LOCA). Un segnale di basso valore della temperatura di ingresso al core consente l'intervento del sistema EBT, questi ultimi continuano ad iniettare liquido dentro al RPV fino a quando i livelli nei sistemi EBT e nel RPV si eguagliano. Nel lungo termine l'impianto risulta raffreddato dai soli sistemi EHRS i quali trasferiscono il calore residuo in circolazione naturale dal circuito primario al sistema RWST.

Nel paragrafo successivo vengono descritti e commentati i risultati del transitorio appena descritto.

6.4.1 Descrizione del transitorio

Terremoto e perdita di alimentazione elettrica esterna all'impianto: blocco delle pompe di alimentazione del primario e del secondario

All'istante $t = 0$ s si verifica il terremoto e la contemporanea perdita di alimentazione elettrica esterna. Le pompe di circolazione del primario e del secondario iniziano la fase di coast-down. La Fig. 6.12 e la Fig. 6.13 riportano la velocità di rotazione delle pompe nei primi 200 s di transitorio, rispettivamente per l'impianto SPES-3 e SPES3_2013. Mentre nella

configurazione originaria dell'impianto le pompe si bloccavano completamente in 100 s, nella nuova configurazione il loro blocco completo avviene in 30 s derivante dalle caratteristiche delle pompe di SPES-2. Nella Fig. 6.14 e nella Fig. 6.15 vengono riportate le prevalenze delle pompe per l'impianto SPES-3 e SPES3_2013: è necessario sottolineare che le perdite di carico del circuito primario di SPES-3 sono sensibilmente inferiori rispetto a quelle di SPES3_2013, ciò in conseguenza dell'inserimento del nuovo canale di potenza.

La diminuzione della prevalenza della pompa consente alle valvole di check, inserite tra il riser e il downcomer, di aprirsi e di consentire l'innesco della circolazione naturale tra il riser stesso e le regioni anulari dei generatori di vapore nella parte bassa del RPV. Il fenomeno della circolazione naturale si presenta, nella configurazione SPES-3, ad 11 s nel generatore di vapore C e a 14 s nei generatori di vapore A e B (vedi Fig. 6.16 e Fig. 6.18). Lo stesso fenomeno invece nella configurazione SPES3_2013 si presenta a 110 s nei generatori di vapore A e B e a 151 s nel generatore di vapore C (vedi Fig. 6.17 e Fig. 6.19).

Al diminuire della prevalenza della pompa, anche le check-valve inserite nei tre rami di bypass delle pompe si aprono consentendo l'instaurarsi della circolazione naturale anche nella parte alta del RPV. Tale fenomeno, sia in SPES-3 che in SPES3_2013, si instaura negli istanti di tempo $t = 18$ s nel generatore di vapore C e $t = 19$ s nei generatori di vapore A e B (vedi Fig. 6.20 e Fig. 6.21).

All'istante di tempo $t = 400$ s, nella configurazione SPES-3, la circolazione naturale si blocca nel generatore di vapore C e di conseguenza esso, a partire dall'istante $t = 150$ s, non asporta calore (vedi Fig. 6.22). Lo stesso tipo di comportamento lo ritroviamo nella configurazione SPES3_2013 anche se con tempistica non esattamente coincidente (vedi Fig. 6.23).

A causa della diminuzione del livello di liquido refrigerante dentro al RPV, in SPES-3 la pompa di circolazione del primario si scopre (Fig. 6.24), quindi a partire da 2620 s la circolazione naturale attraverso il bypass delle pompe si blocca, vedi Fig. 6.20.

La stessa catena di eventi si presenta nella nuova configurazione dell'impianto, il livello di acqua alle pompe di circolazione del primario comincia a ridursi a partire da circa 930 s ma impiegano più tempo a scoprirsi completamente (Fig. 6.25), mentre il blocco della circolazione naturale avviene a circa 2000 s (Fig. 6.21).

Il blocco delle pompe d'alimentazione del secondario dei generatori di vapore viene fissato a 4.9 s dopo il terremoto, mentre la circolazione naturale nel lato secondario dei generatori di vapore si innesca solo dopo l'intervento dei sistemi EHRS. Come può vedersi dal confronto tra la Fig. 6.26 e la Fig. 6.27, nella nuova configurazione dell'impianto l'intervento dei sistemi EHRS è ritardato di circa 40 s, imputabili al ritardato raggiungimento del basso livello di liquido (inferiore a 0.25 m) nei secondari dei generatori di vapore.

Segnale di bassa portata nel secondario dei generatori di vapore: scram del reattore, mancata alimentazione di emergenza del secondario.

Il segnale di spegnimento del reattore è inviato a 1.24 s dopo il terremoto, sulla base di basso valore di portata di alimentazione del secondario dei generatori di vapore.

La potenza del core insieme a quella asportata dai generatori di vapore vengono mostrate in Fig. 6.30 per quanto riguarda SPES-3 e in Fig. 6.31 per la configurazione SPES3_2013: infatti, la potenza del canale di SPES-2 (5 MW) è inferiore a quella dell'originale SPES-3 (6.5 MW).

Durante il transitorio viene supposto che l'alimentazione ausiliaria del secondario dei generatori di vapore non risulti disponibile e in tal modo possono considerarsi isolati.

Segnale di basso livello dei secondari dei generatori di vapore: isolamento dei secondari e intervento dei sistemi EHRS-A e B.

La mancata alimentazione dei secondari dei generatori causa una diminuzione dell'inventario di massa lato secondario.

Il conseguente segnale di basso livello di liquido viene inviato quando quest'ultimo scende al di sotto di 0.25 m: per SPES-3 (vedi Fig. 6.34 e Fig. 6.36) tale livello viene raggiunto al tempo $t = 31.5$ s nel generatore A e al tempo $t = 55.35$ s nel generatore C. Per la nuova configurazione invece (Fig. 6.35 e Fig. 6.37) tale livello viene raggiunto al tempo $t = 76.4$ s nel generatore A e al tempo $t = 97$ s nel generatore C. Il segnale di basso livello permette l'isolamento dei secondari e l'apertura delle valvole dei sistemi EHRS A e B. La MFIV e MSIV sono contemporaneamente chiuse in 5 s. Le valvole che consentono l'intervento dei sistemi EHRS sono aperte in 2 s e ciò consente l'innesco della circolazione naturale nei secondari dei generatori A e B (vedi Fig. 6.26 e Fig. 6.28 per SPES-3 e Fig. 6.27 e Fig. 6.29 per SPES3_2013) che permette l'asportazione del calore residuo (vedi Fig. 6.30 e Fig. 6.32 per SPES-3, Fig. 6.31 e Fig. 6.33 per SPES3_2013).

Il valore massimo di portata dei sistemi EHRS A e B è pari rispettivamente a 0.277 e 0.273 kg/s e tali valori vengono raggiunti al tempo $t = 37$ s nella configurazione SPES-3 (vedi Fig. 6.38 e Fig. 6.40). In SPES3_2013 tali valori sono uguali rispettivamente a 0.278 e 0.274 kg/s raggiunti al tempo $t = 79$ s (vedi Fig. 6.39 e Fig. 6.41). La potenza asportata dai sistemi EHRS viene mostrata nelle Fig. 6.42 e Fig. 6.43 per la configurazione SPES-3 e nelle Fig. 6.44 e Fig. 6.45 per SPES3_2013. Da esse si può evidenziare che il massimo della potenza asportata da SPES-3 è pari a 380 kW e 381 kW rispettivamente per EHRS A e B (all'istante $t = 212$ s). Per la configurazione SPES3_2013 il massimo della potenza asportata è pari a 380 kW e 381 kW rispettivamente per EHRS A e B (all'istante $t = 252$ s). Tale potenza viene poi trasferita al RWST A. L'acqua contenuta all'interno comincia a scaldarsi dopo 51 s e vengono raggiunte le condizioni di saturazione dopo circa 9200 s in SPES-3 (Fig. 6.46), mentre nell'impianto SPES3_2013 il riscaldamento inizia dopo circa 93 s e le condizioni di saturazione vengono raggiunte dopo circa 15000 s (Fig. 6.47). In conseguenza del raggiungimento delle condizioni di saturazione in RWST A il suo inventario di massa diminuisce. Dal confronto tra la Fig. 6.48 e la Fig. 6.49 può notarsi una minore evaporazione nella configurazione SPES3_2013 compatibilmente con il ritardato raggiungimento delle condizioni di saturazione.

La portata di fluido primario viene riportata nella Fig. 6.50 per SPES-3 e nella Fig. 6.51 per SPES3_2013. La portata nominale in SPES-3 è leggermente superiore a quella di SPES3_2013, il loro rapporto risulta uguale al rapporto tra le potenze. Dopo il blocco delle pompe del primario la portata si riduce fino a circa 2 kg/s nel lungo termine in SPES-3, mentre in SPES3_2013 il valore nel lungo termine risulta circa uguale a 1.23 kg/s.

Inoltre l'isolamento dei secondari dei generatori di vapore causa un aumento della pressione fino ad un valore massimo di circa 8.59 MPa in A a circa 129 s, di 8.63 MPa in B a 136 s, e di 7.87 MPa in C a 176 s, Fig. 6.52 e Fig. 6.54 per SPES-3.

Per quanto riguarda SPES3_2013 il valore massimo della pressione nel generatore A è di circa 8.55 MPa a circa 165 s, di 8.59 MPa in B a 173 s, e di 7.17 MPa in C a 165 s, Fig. 6.53 e Fig. 6.55.

Segnale di bassa temperatura del fluido primario in ingresso al core: intervento dei sistemi EBT.

La pressione del circuito primario continua a diminuire e nel lungo termine si attesta intorno a 0.16 MPa, la Fig. 6.56 e la Fig. 6.57 mostrano i confronti di tali grandezze per SPES-3 e SPES3_2013. I confronti tra le temperature d'ingresso e di uscita del fluido primario dal core, per le configurazioni SPES-3 e SPES3_2013, sono riportate nella Fig. 6.58 e nella Fig. 6.59. La Fig. 6.60 e la Fig. 6.61 mostrano invece il confronto tra le temperature di ingresso e uscita core e la temperatura di saturazione all'uscita del core. Dagli ultimi due grafici può evidenziarsi come in nessuna delle due configurazioni raggiungiamo condizioni di saturazione all'uscita dal core, cioè il core rimane sotto battente d'acqua.

Il continuo raffreddarsi del primario causa l'aumento della densità del liquido primario e un conseguente abbassamento del livello di liquido nel RPV. I livelli di liquido nel PRZ per ambedue le configurazioni vengono mostrati nella Fig. 6.64. Notiamo che nella configurazione SPES3_2013 il PRZ si svuota completamente a partire da circa 850 s mentre nella configurazione SPES-3 il completo svuotamento avviene a circa 1150 s. I risultati appaiono coerenti con il fatto che nella nuova configurazione abbiamo un inventario di liquido nel circuito primario inferiore rispetto a quello di SPES-3. Il confronto tra i livelli di liquido nel downcomer è riportato nella Fig. 6.65, da essa si mette in luce come le condizioni di stazionarietà siano raggiunte in ambedue le configurazioni dopo circa 60000 s.

Il fluido primario in ingresso al core raggiunge il valore di temperatura di 553.15 K, che rappresenta il set-point di intervento per i sistemi EBT a 2583 s per SPES-3 e a 1740 s per SPES3_2013. Con 15 s di ritardo rispetto al segnale di attuazione le valvole di intercettazione vengono aperte e i sistemi EBT cominciano ad iniettare acqua fredda dentro l'RPV attraverso le DVI, mentre una miscela di acqua calda e vapore fluisce dal RPV ai sistemi EBT attraverso delle tubazioni superiori (vedi Fig. 6.66, Fig. 6.67 e Fig. 6.68).

L'iniezione di liquido nel primario da parte dei sistemi EBT viene bloccata quando i livelli tra i due diventano uguali (vedi Fig. 6.69). L'inventario di massa presente nel circuito primario cresce lentamente grazie all'iniezione di liquido da parte dei sistemi EBT fino al raggiungimento di un valore stabile, Fig. 6.70.

Le temperature del primario non subiscono variazioni significative. La circolazione al suo interno rimane stabile, e in ogni sua parte, il refrigerante si presenta in fase liquida. Vedi Fig. 6.71, Fig. 6.72, Fig. 6.50, Fig. 6.51, Fig. 6.62 e Fig. 6.63.

Condizioni di lungo termine.

Nel lungo termine, i sistemi EHRS A e B riescono a rimuovere il calore residuo dal core e a raffreddare lentamente il sistema, Fig. 6.44 e Fig. 6.45. La potenza media prodotta nel core, negli ultimi 50000 s di transitorio, in SPES-3 è pari a 29.78 kW, mentre quella rimossa dai sistemi EHRS è pari a 26.05 kW. In SPES3_2013 la potenza media prodotta dal core è pari a 37.2 kW mentre quella asportata dai sistemi EHRS è pari a 32.6 kW.

In ambedue i casi, la potenza non asportata dai sistemi EHRS rappresenta la perdite di calore verso l'ambiente.

6.4.2 Risultati del transitorio SBO (177)

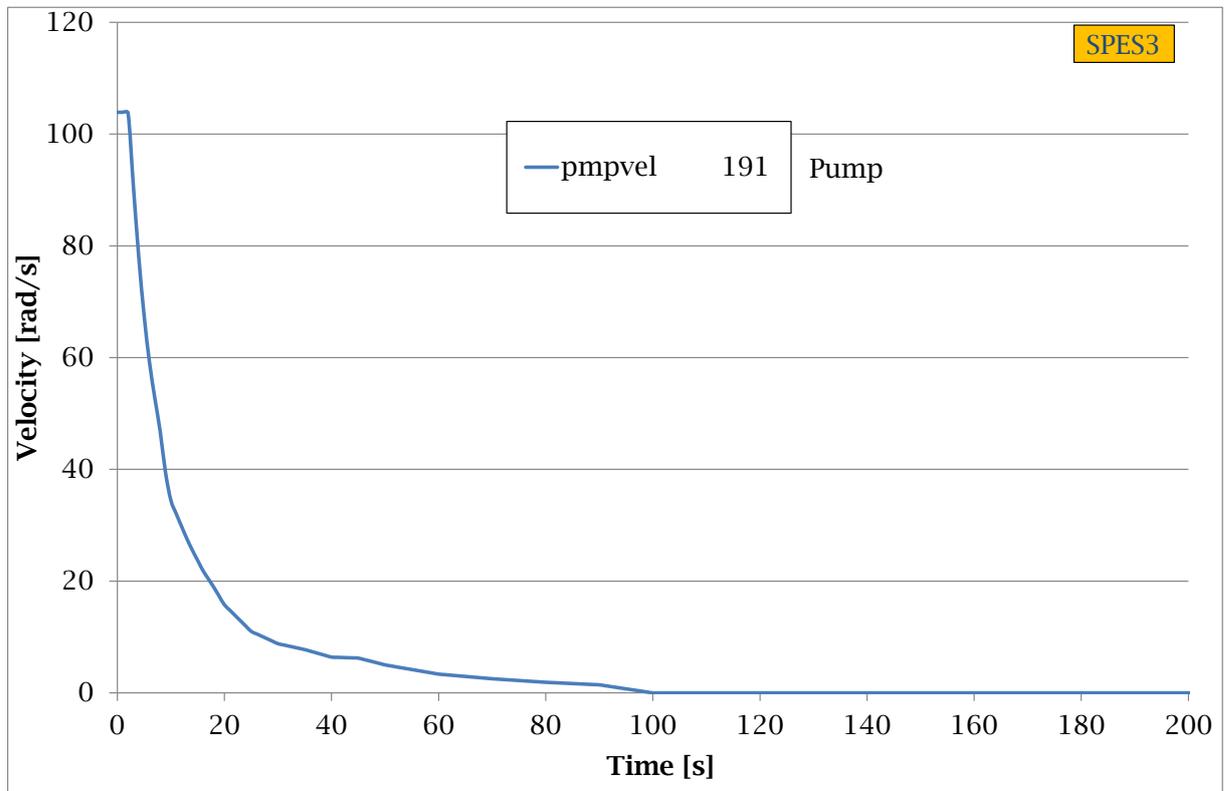


Fig. 6.12 – Velocità della pompa SPES3.

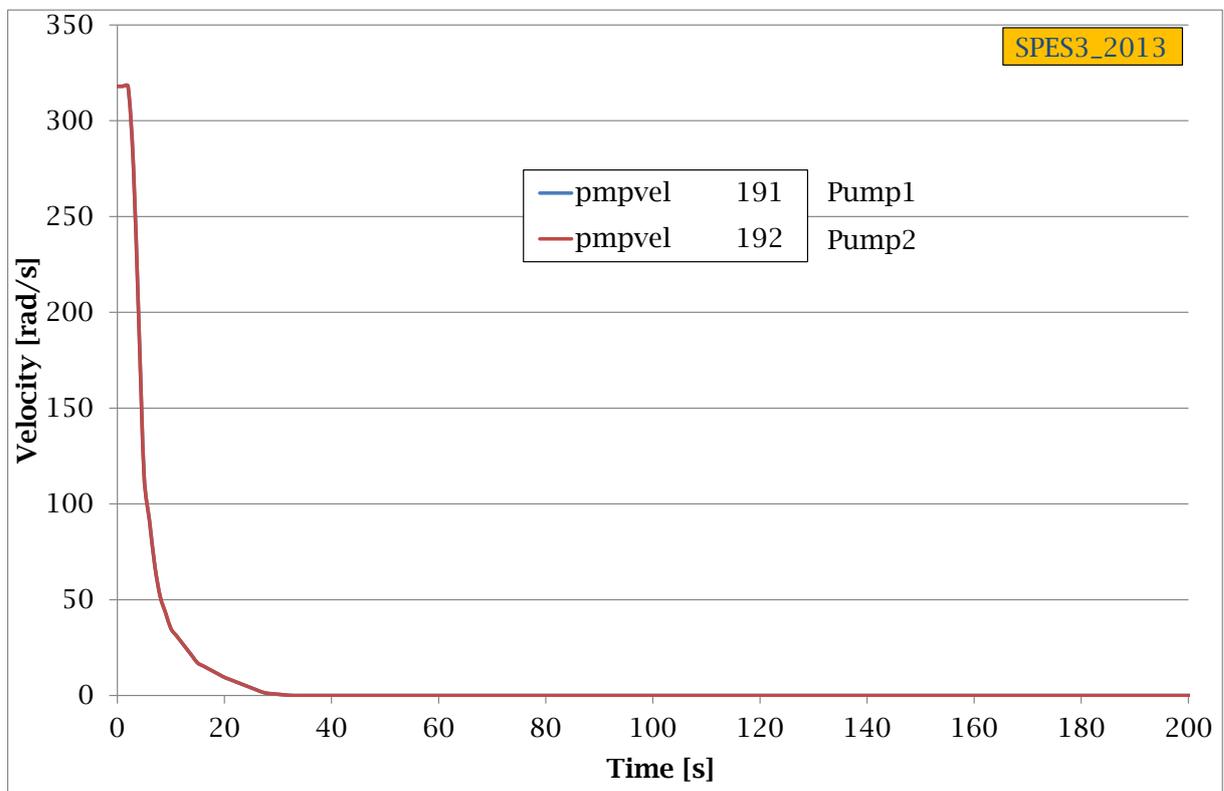


Fig. 6.13 – Velocità delle pompe SPES3_2013.

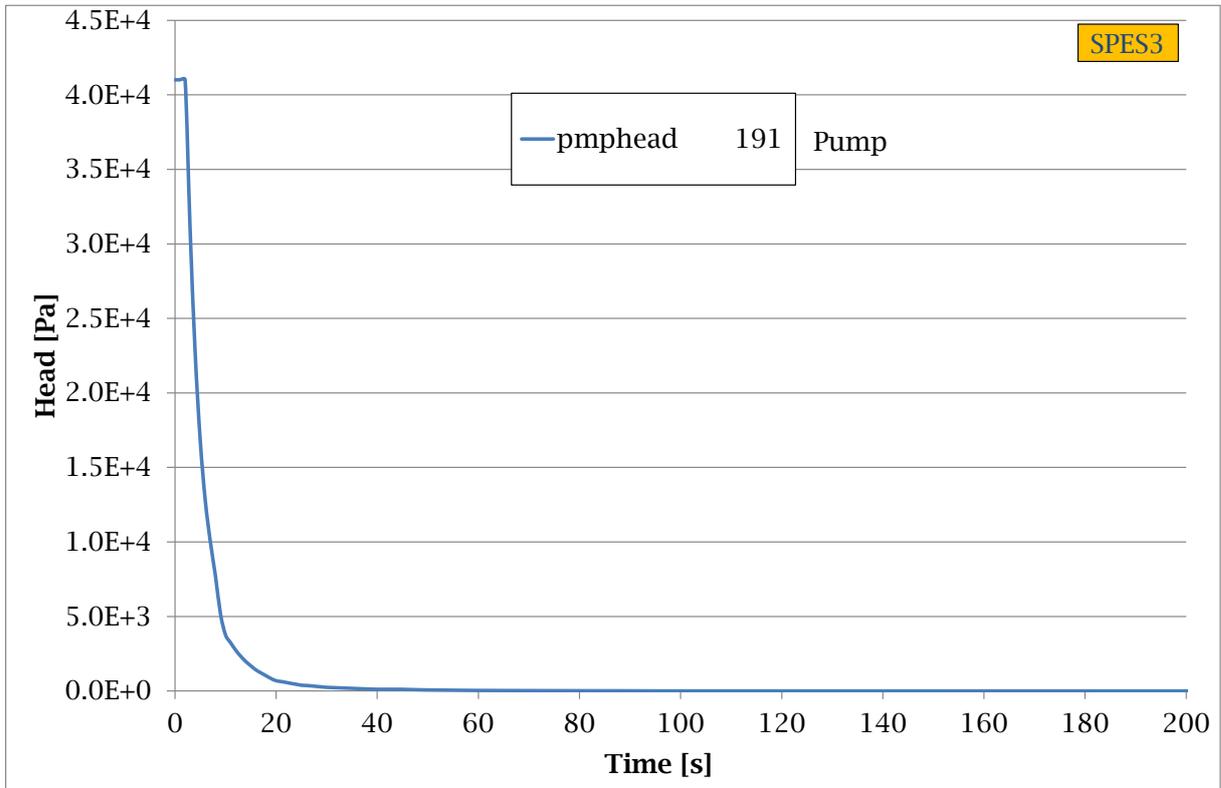


Fig. 6.14 – Head della pompa SPES3.

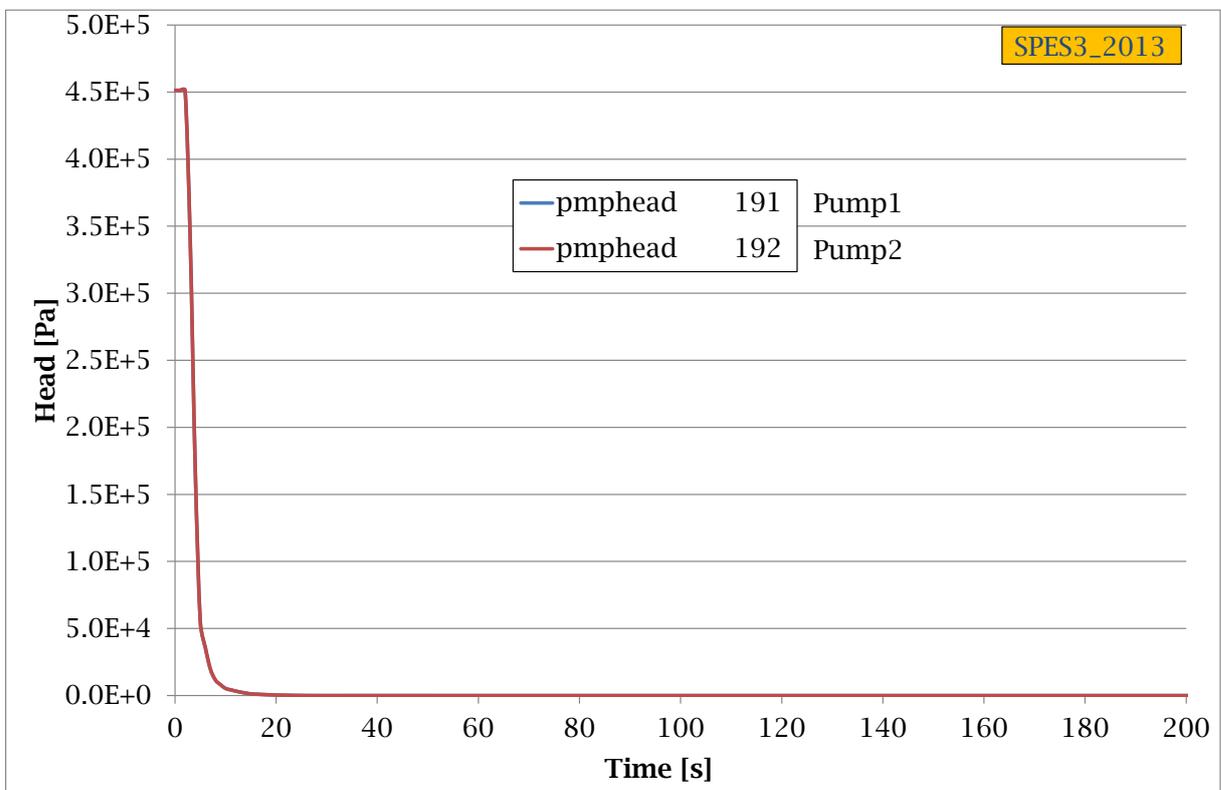


Fig. 6.15 – Head delle pompe SPES3_2013.

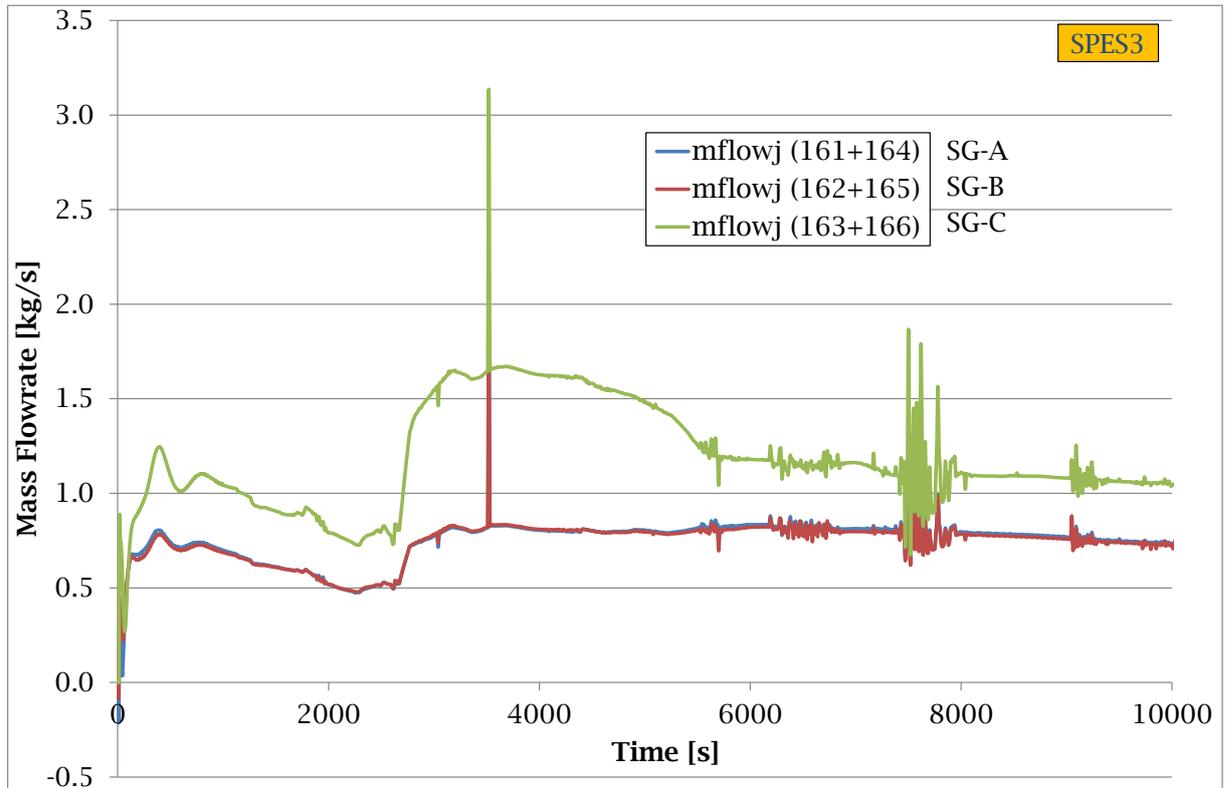


Fig. 6.16 – Portata check valve RI-DC in SPES3 (part.).

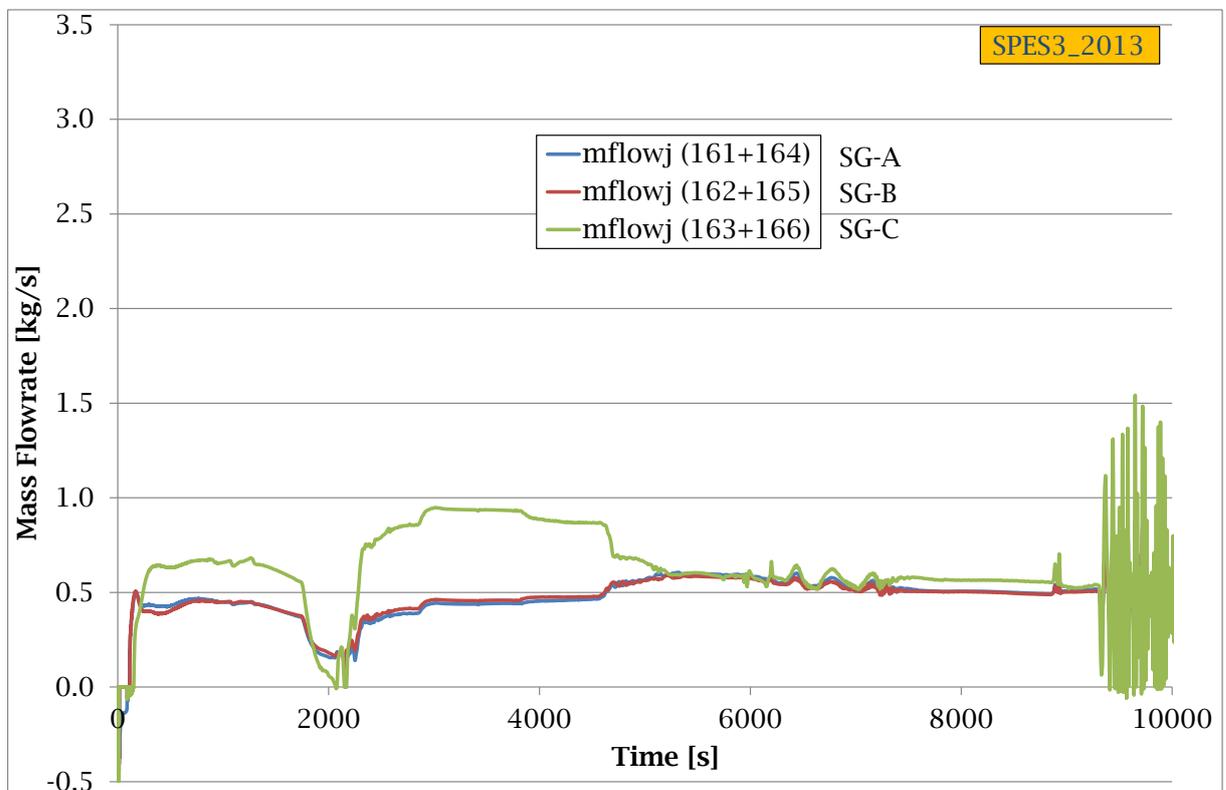


Fig. 6.17 – Portata check valve RI-DC in SPES3_2013 (part.).

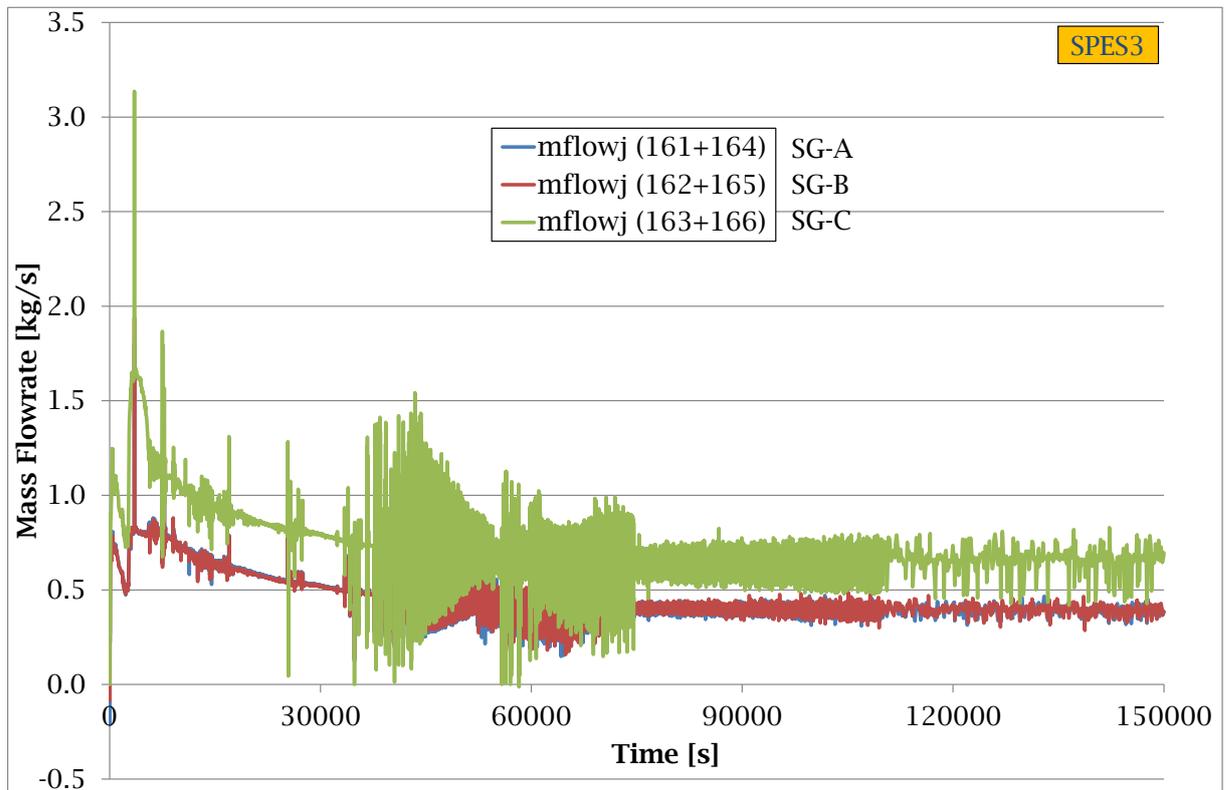


Fig. 6.18 – Portata check valve RI-DC in SPES3.

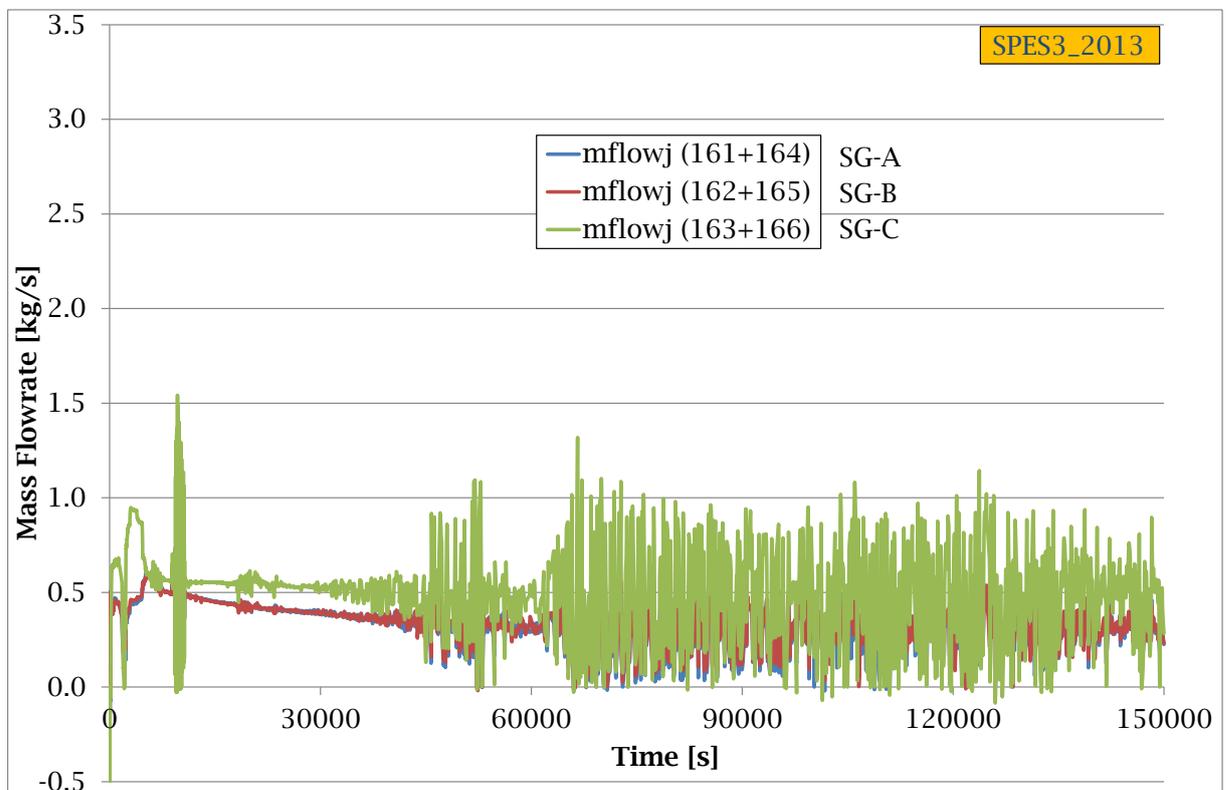


Fig. 6.19 – Portata check valve RI-DC in SPES3_2013.

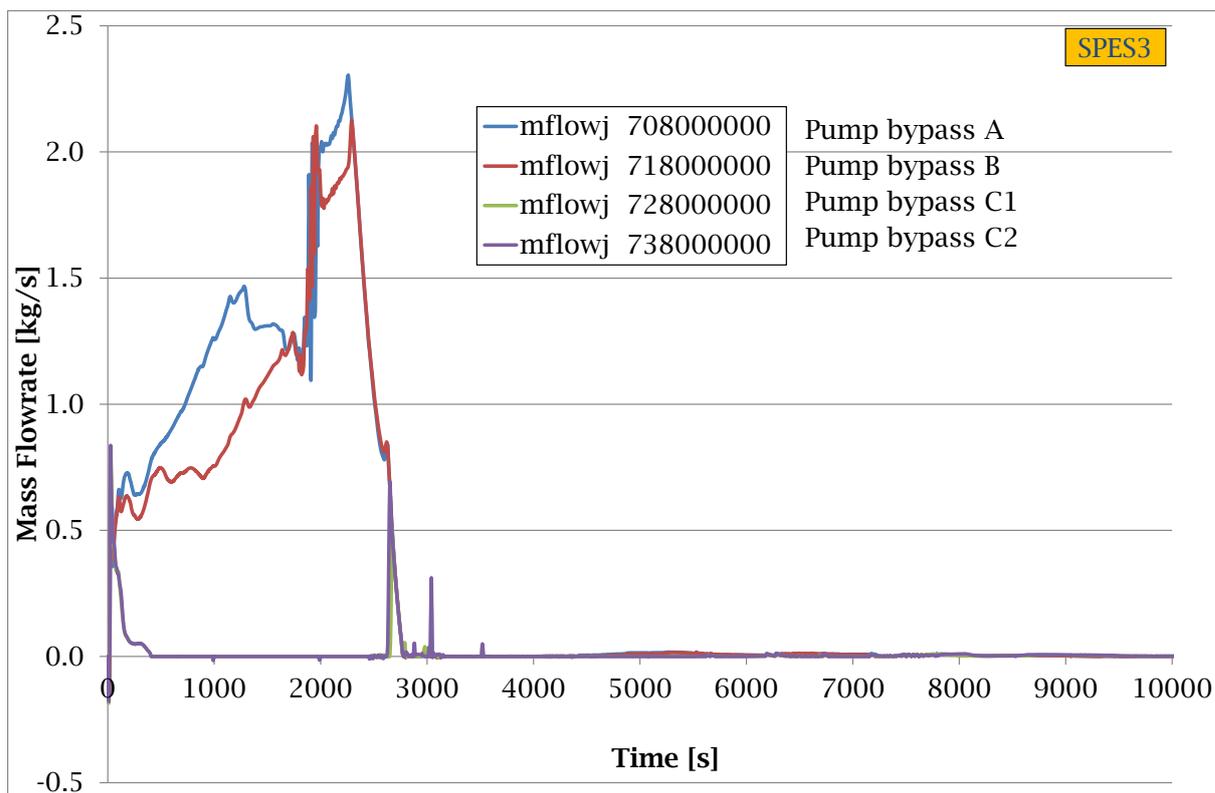


Fig. 6.20 – Portata bypass della pompa in SPES3 (part.).

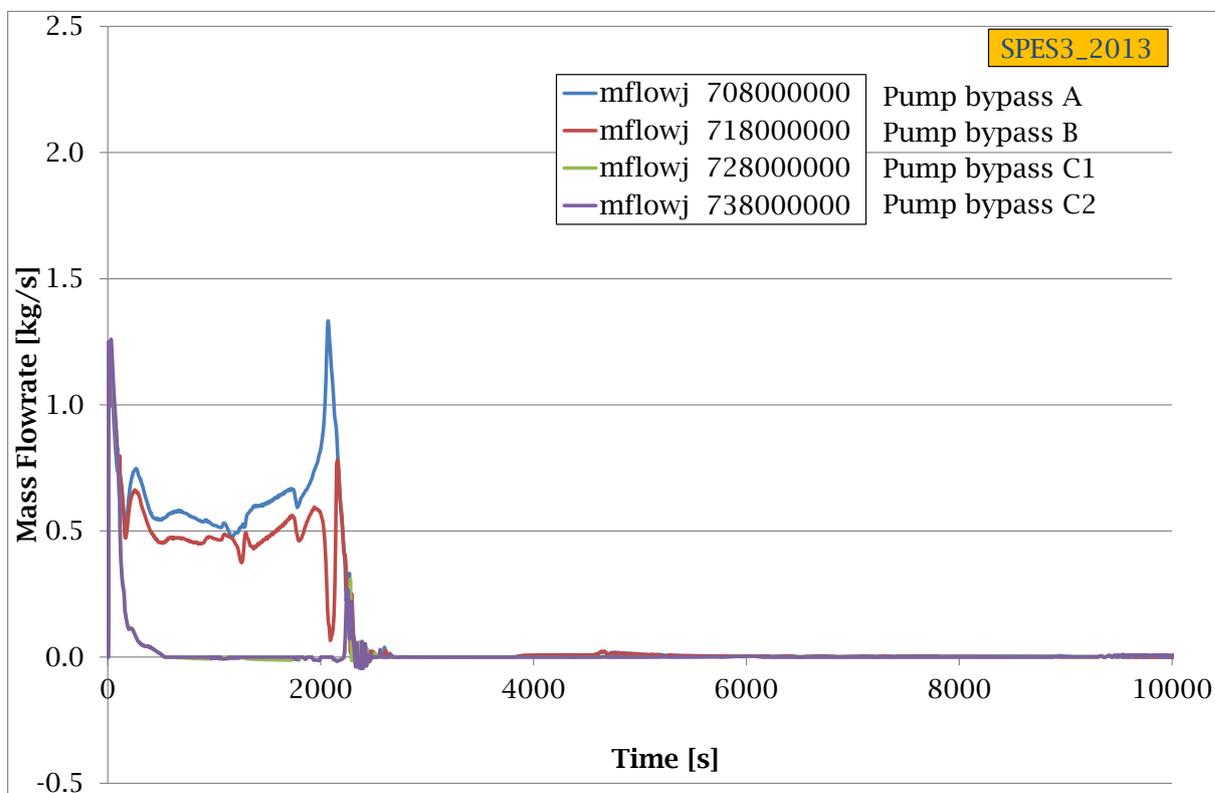


Fig. 6.21 – Portata bypass delle pompe in SPES3_2013 (part.).

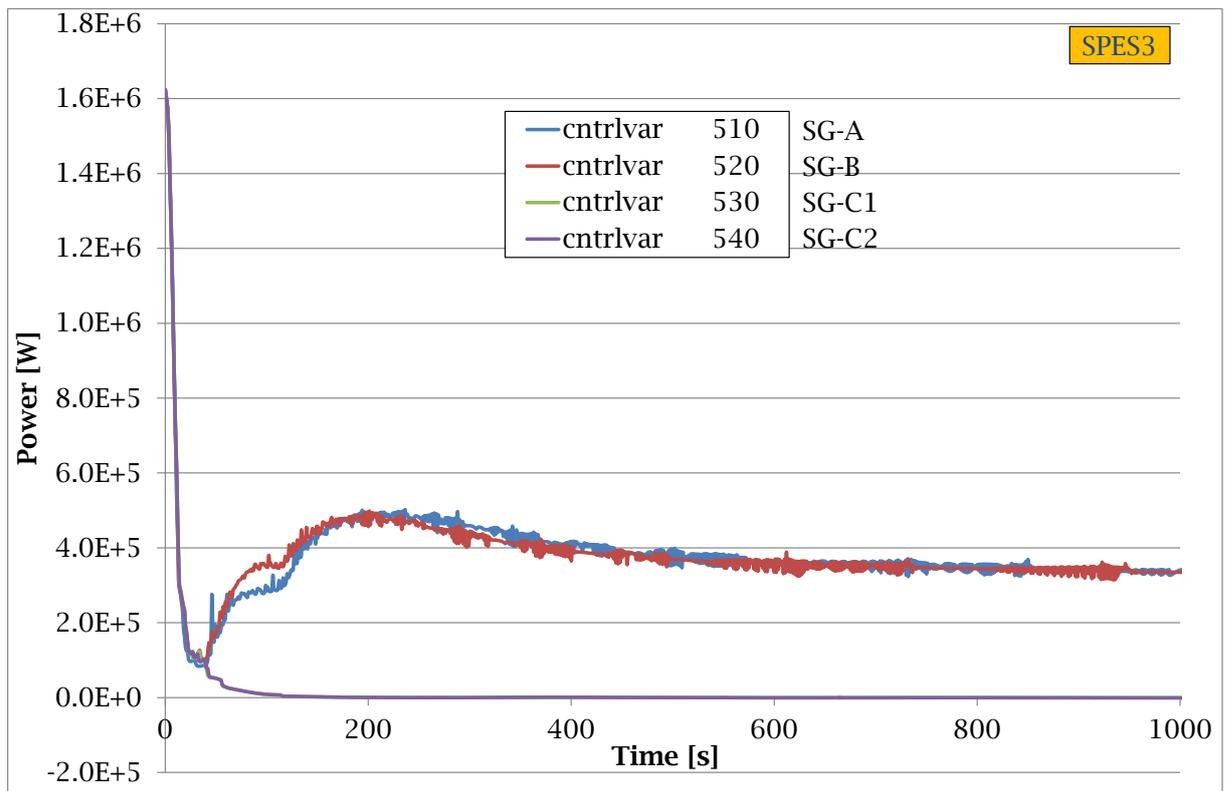


Fig. 6.22 – Potenza rimossa dai secondari SG in SPES3 (part.).

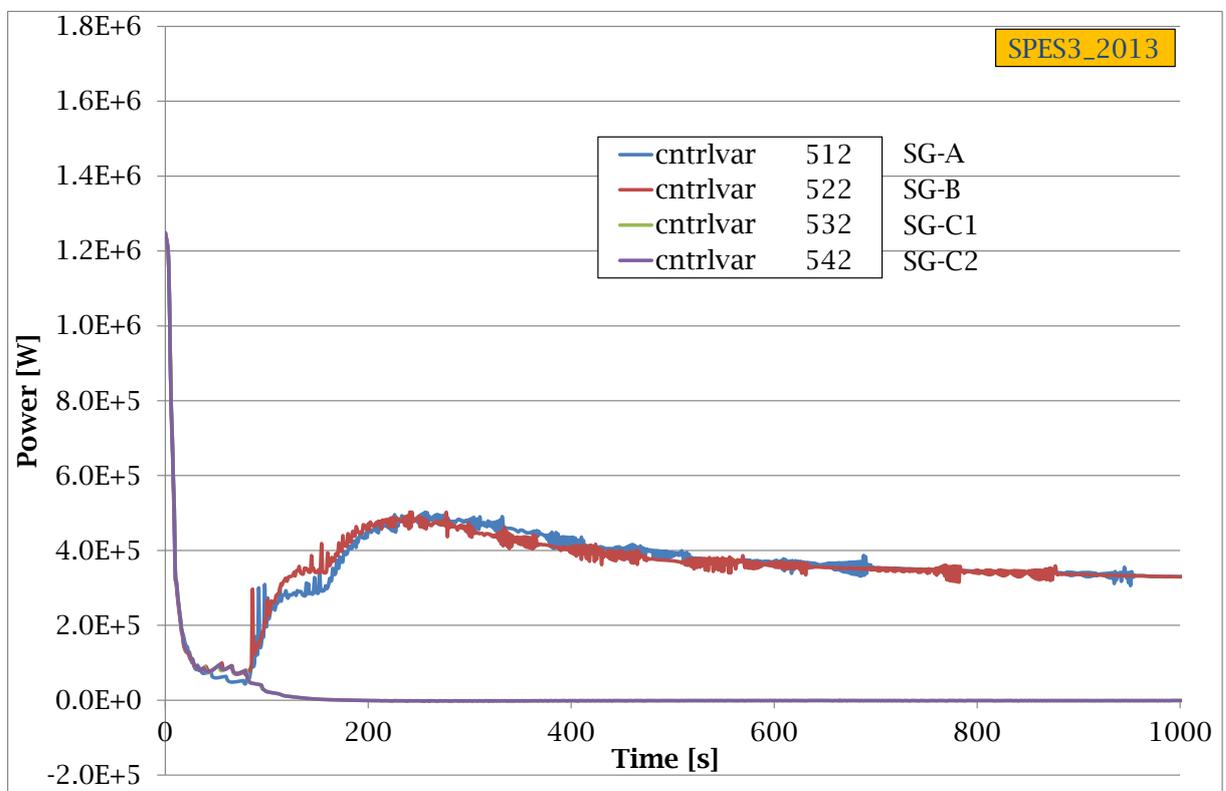


Fig. 6.23 – Potenza rimossa dai secondari SG in SPES3_2013 (part.).

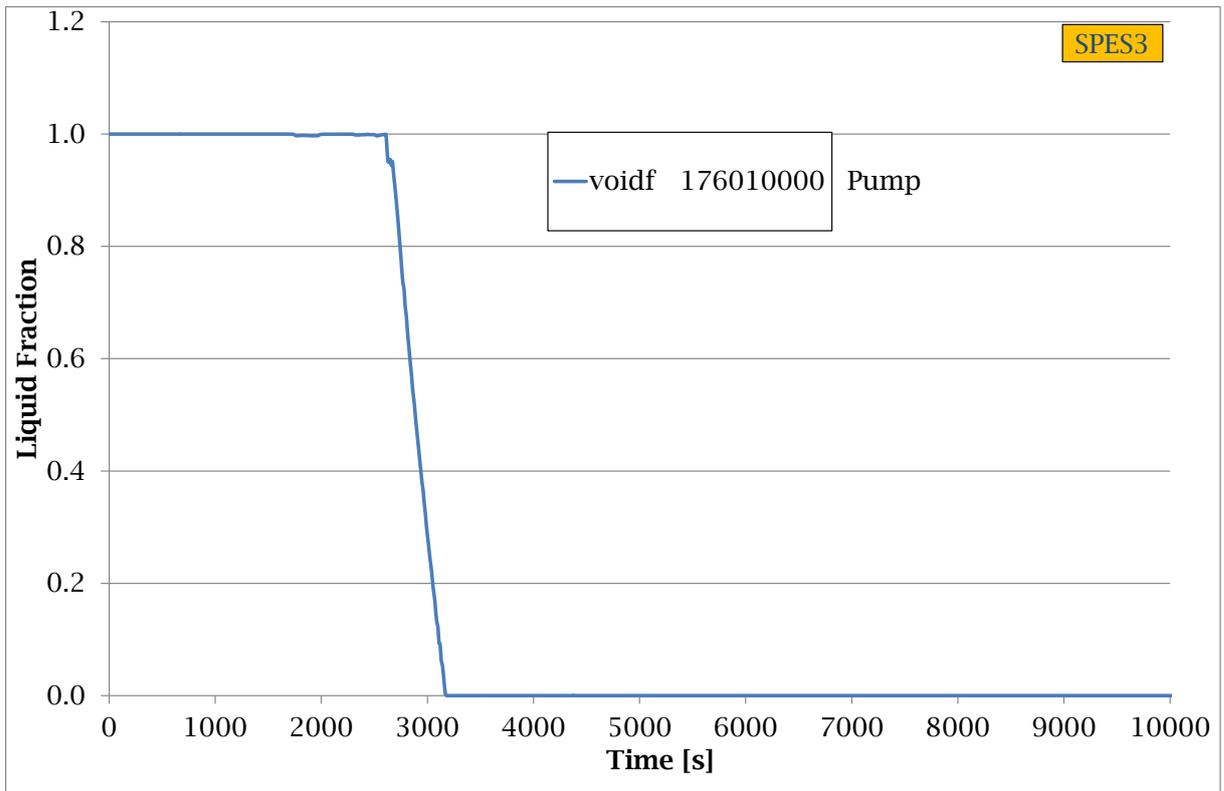


Fig. 6.24 – Frazione di liquido in ingresso pompa SPES3 (part.).

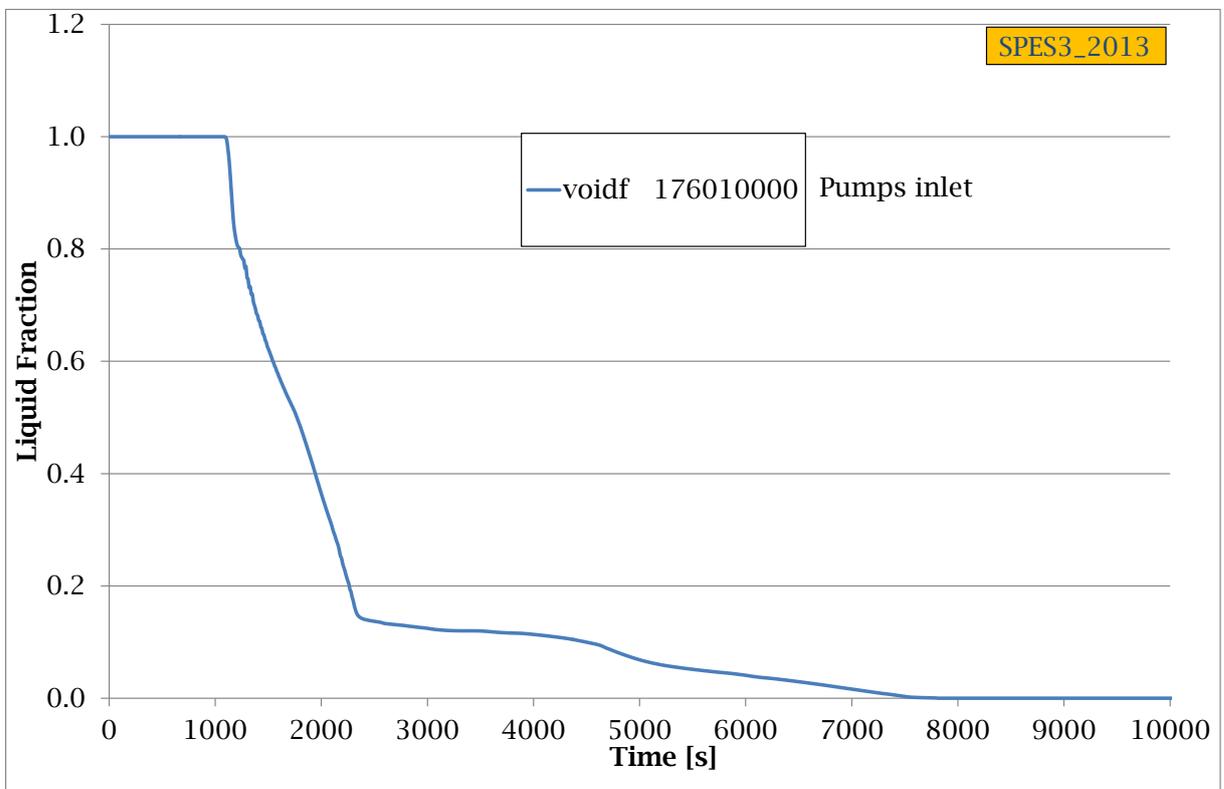


Fig. 6.25 – Frazione di liquido in ingresso pompe SPES3_2013 (part.).

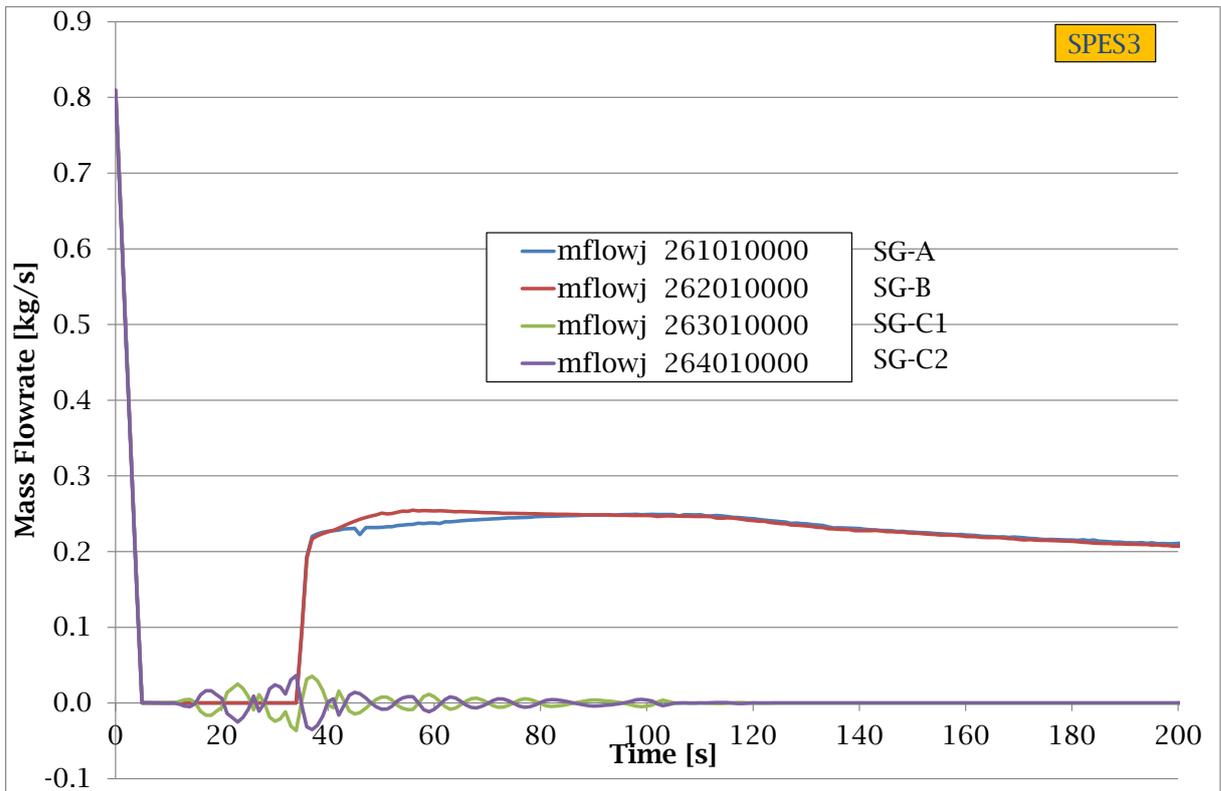


Fig. 6.26 – Portata degli SGs SPES3 (part.).

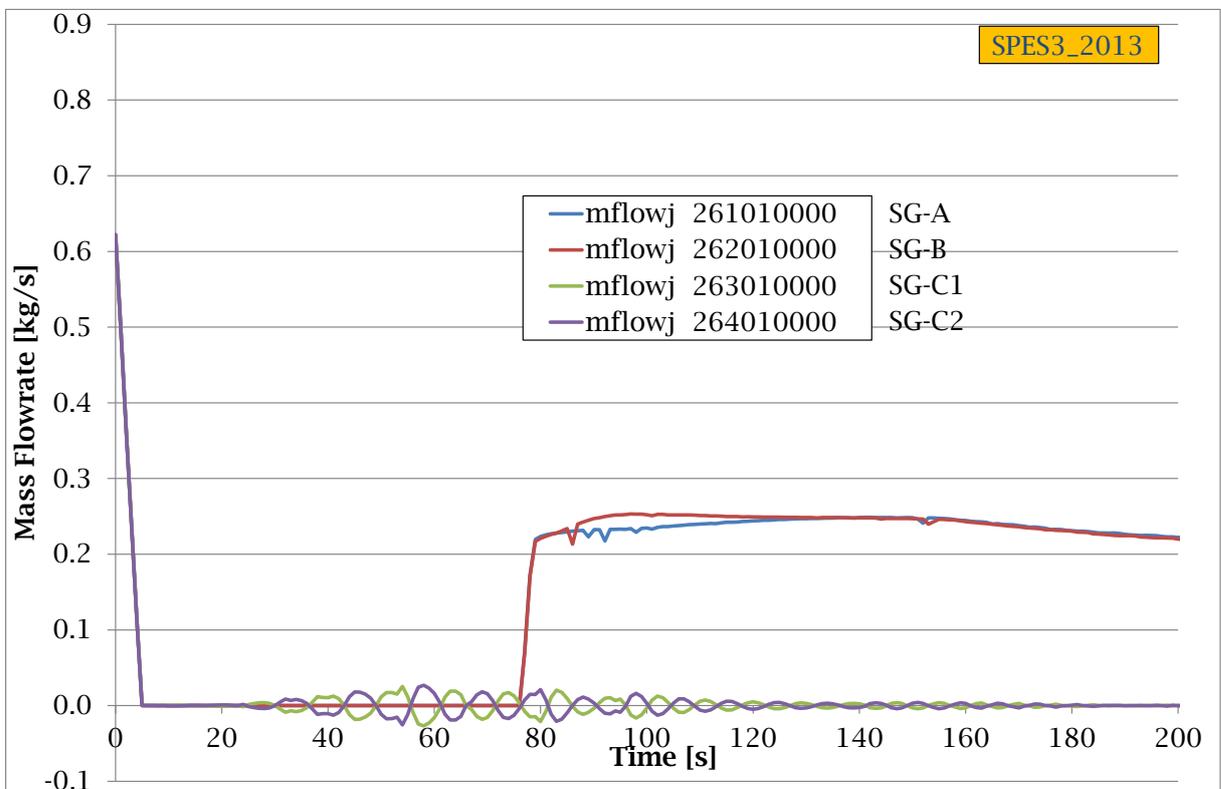


Fig. 6.27 – Portata degli SGs SPES3_2013 (part.).

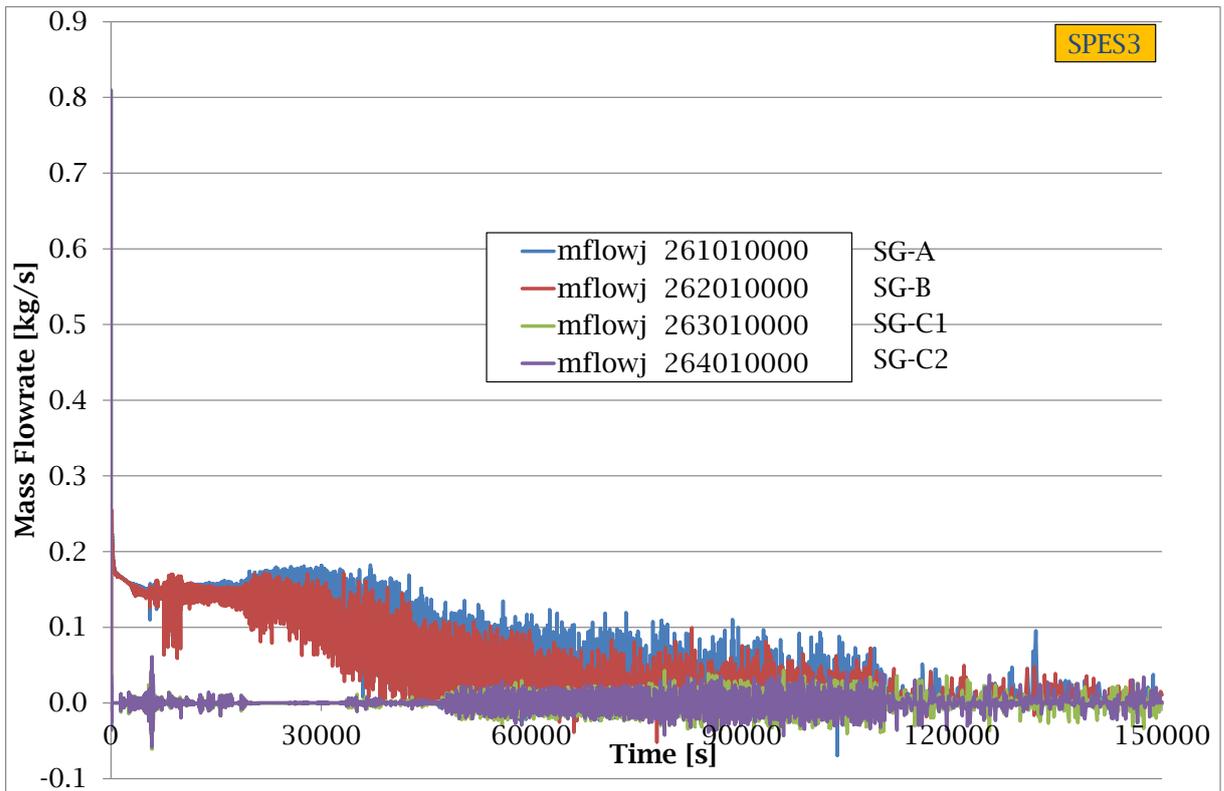


Fig. 6.28 – Portata degli SGs SPES3.

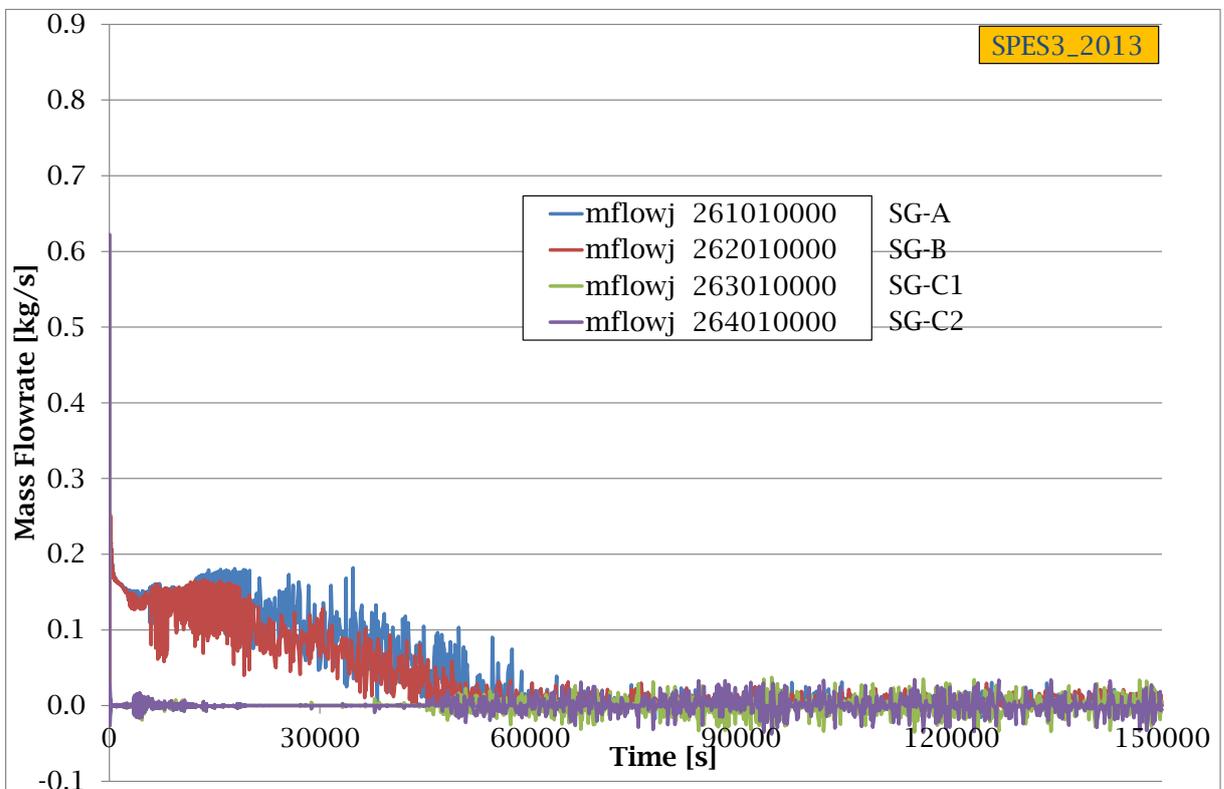


Fig. 6.29 – Portata degli SGs SPES3_2013.

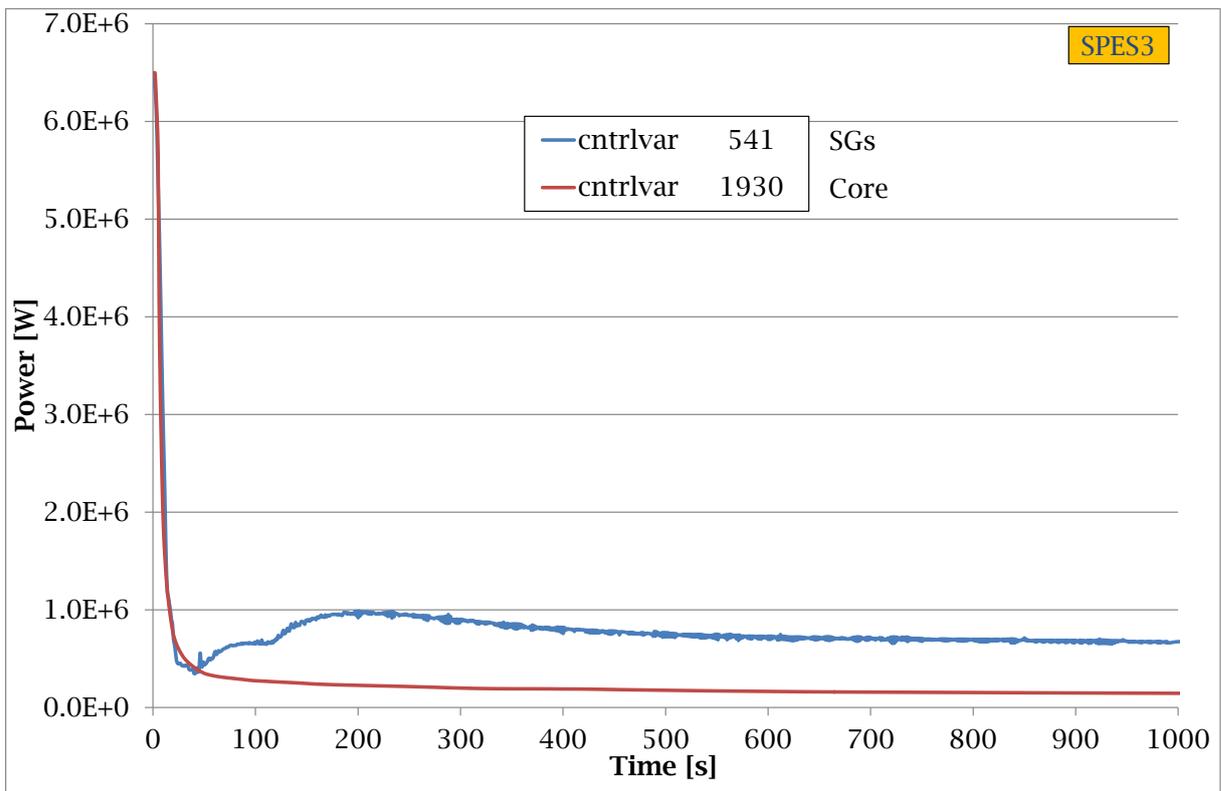


Fig. 6.30 – Potenza totale del core e degli SGs SPES3 (part.).

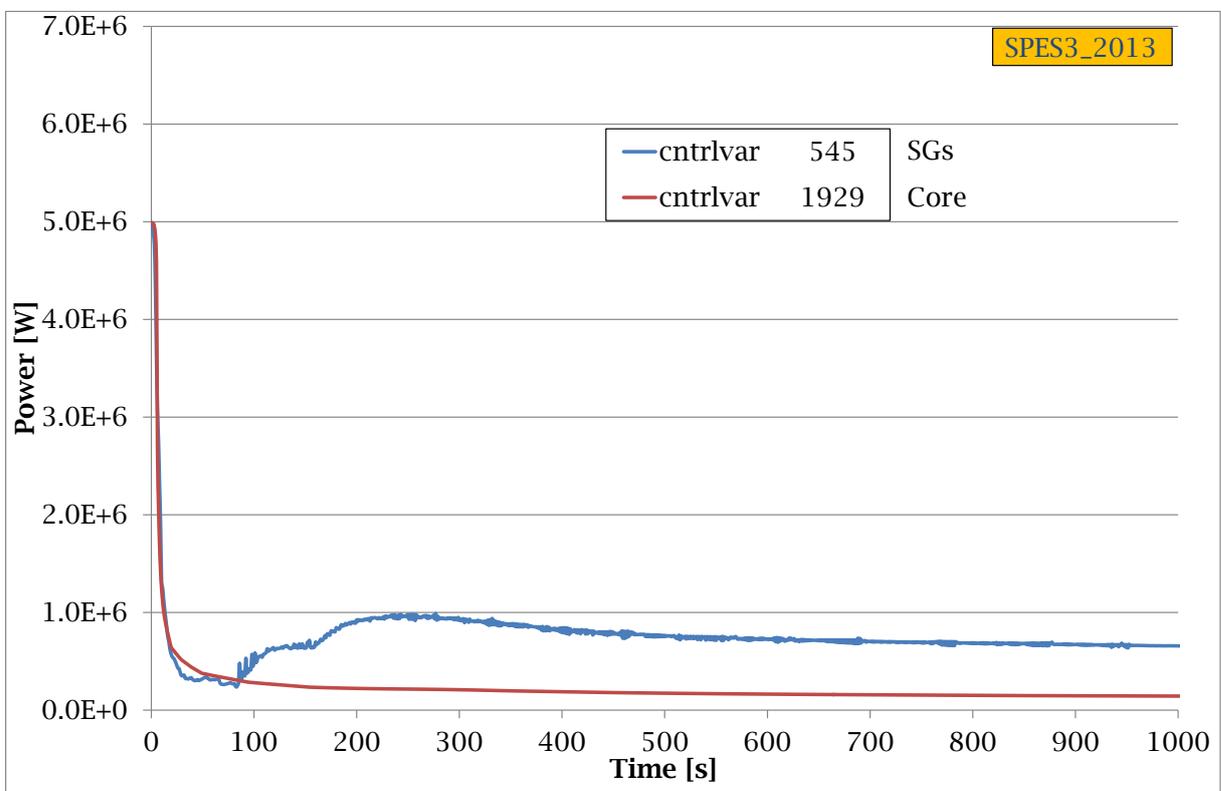


Fig. 6.31 – Potenza totale del core e degli SGs SPES3_2013 (part.).

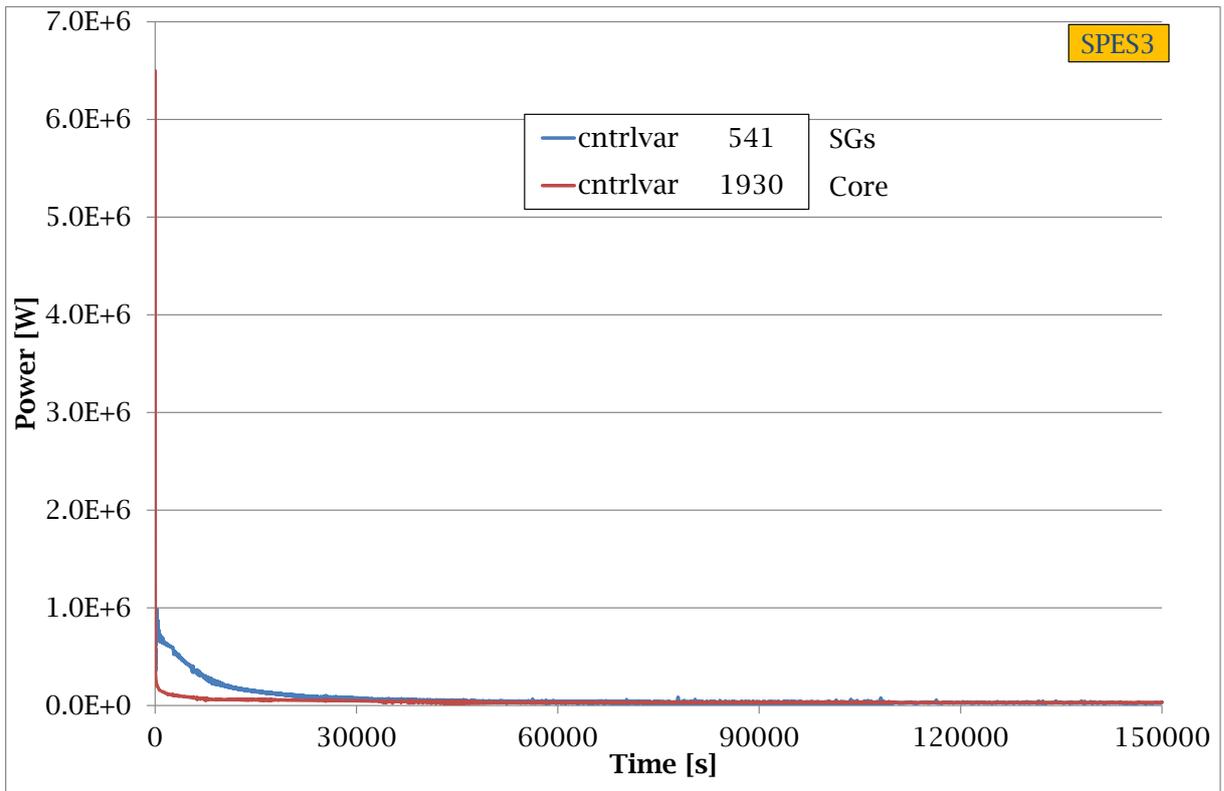


Fig. 6.32 – Potenza totale del core e degli SGs SPES3.

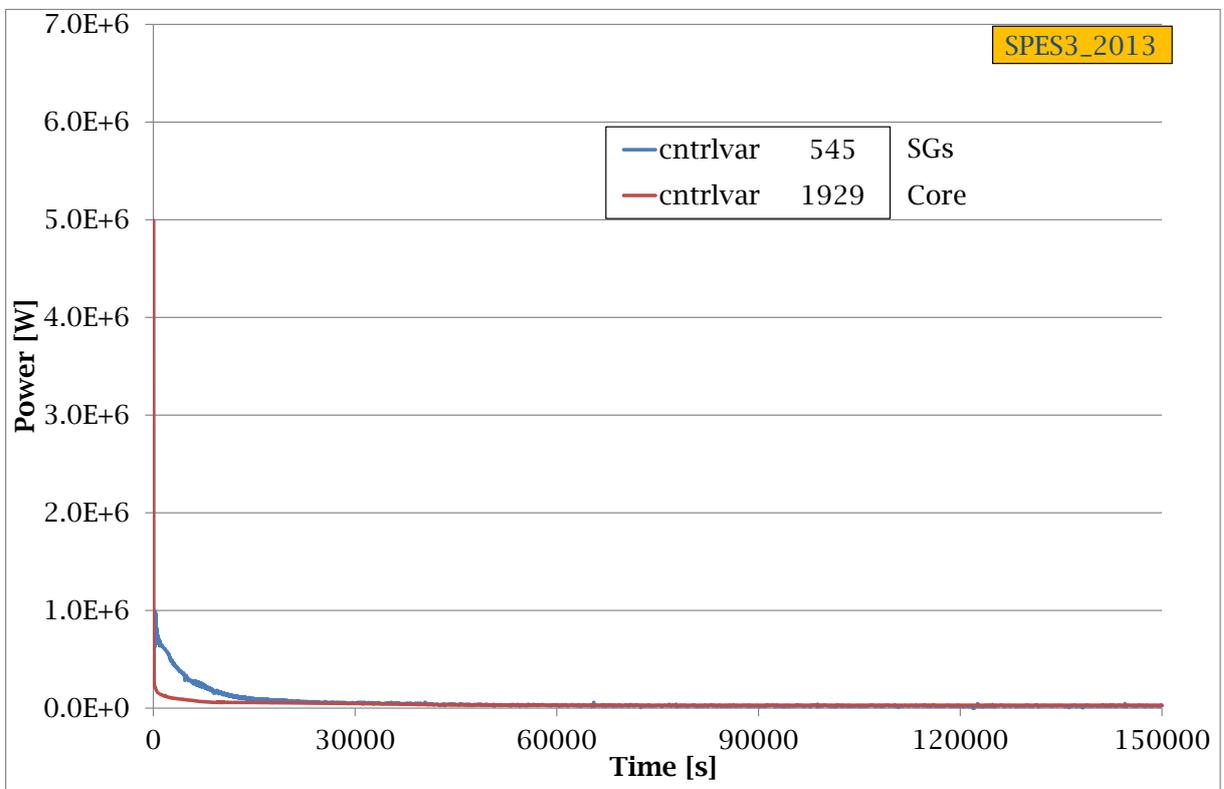


Fig. 6.33 – Potenza totale del core e degli SGs SPES3_2013.

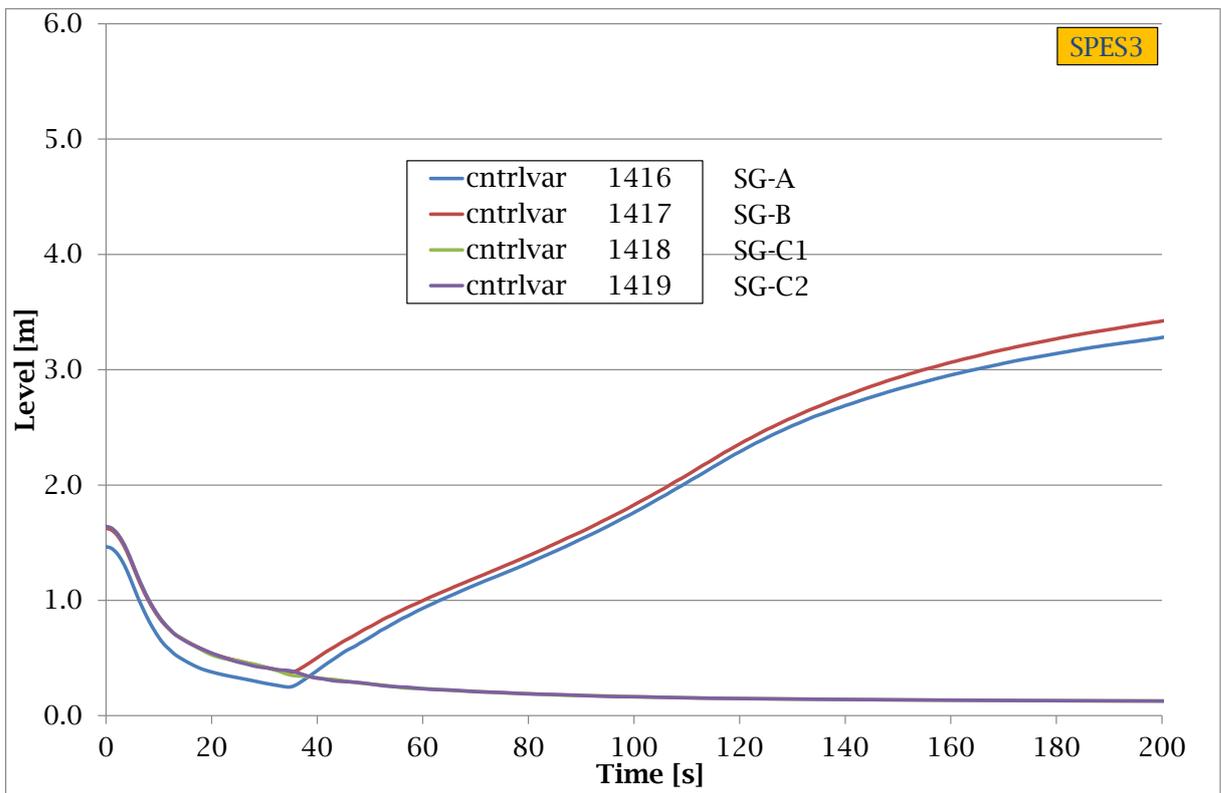


Fig. 6.34 – Livello collassato nei secondari SGs in SPES3 (part.).

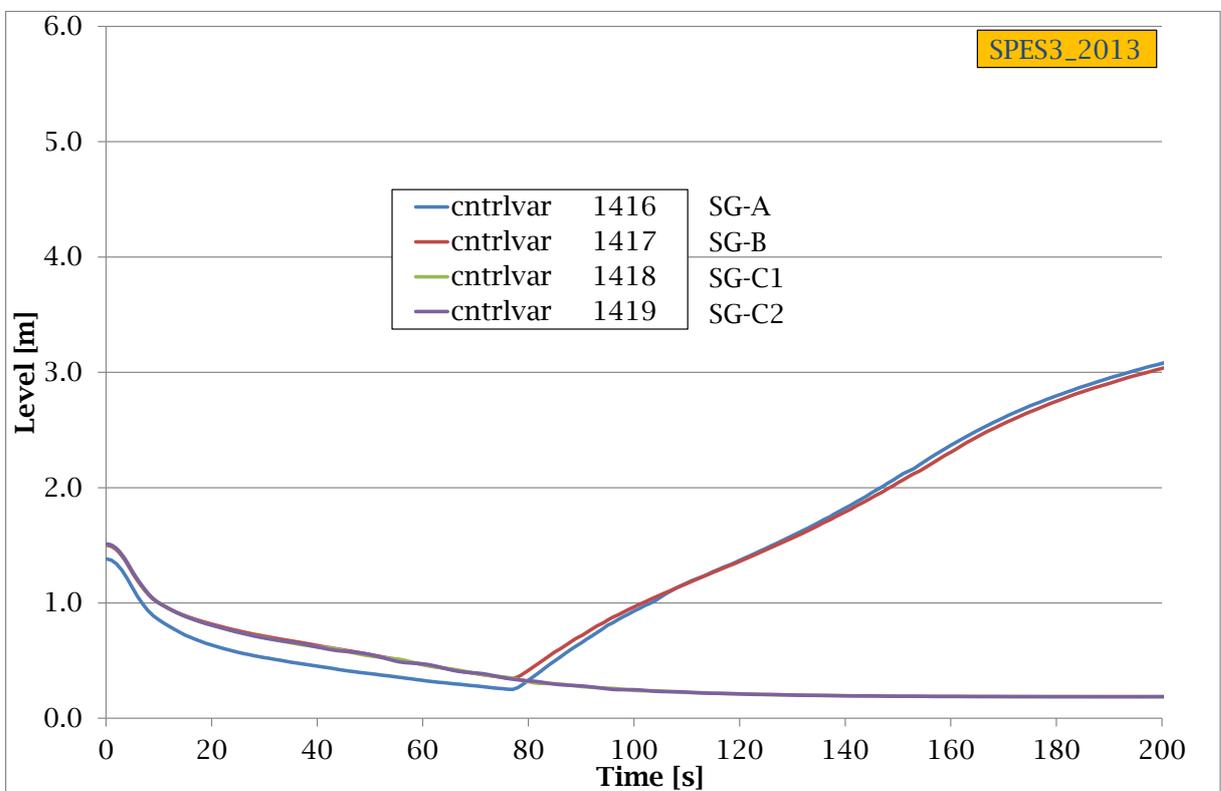


Fig. 6.35 – Livello collassato nei secondari SGs in SPES3_2013 (part.).

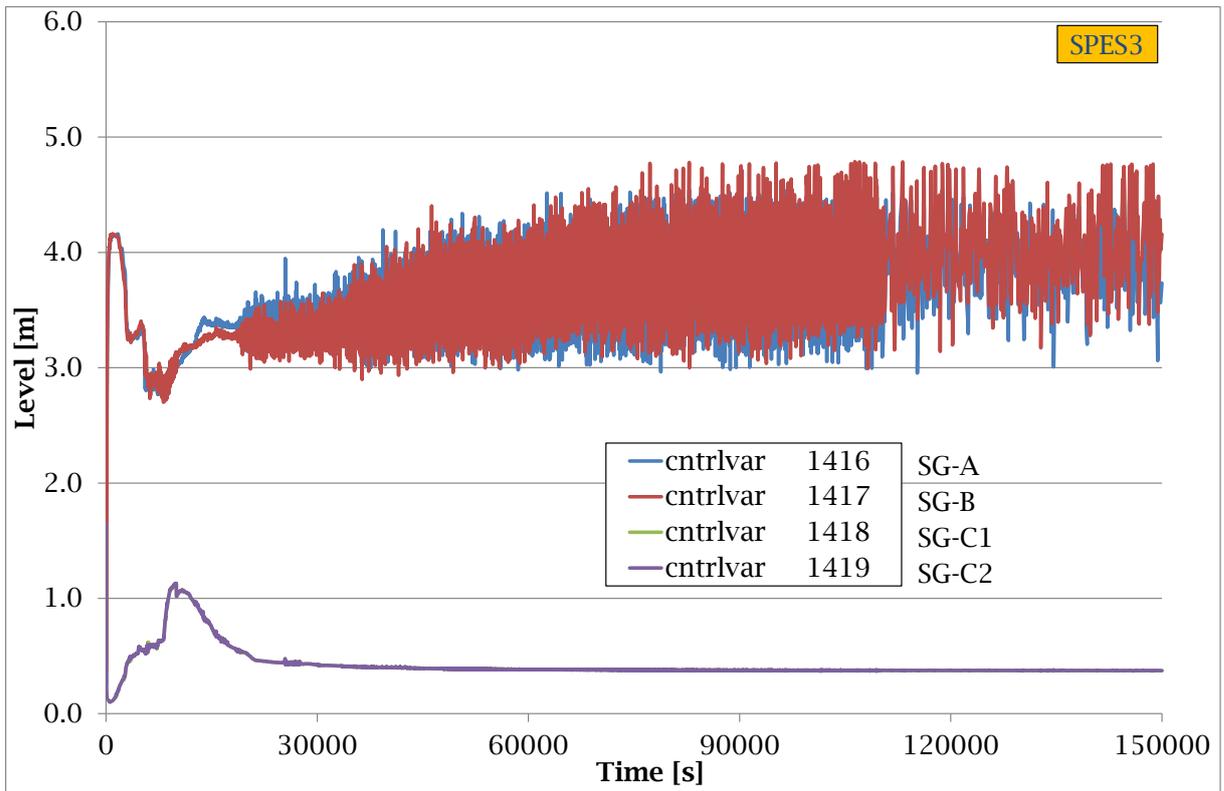


Fig. 6.36 – Livello collassato nei secondari SGs in SPES3.

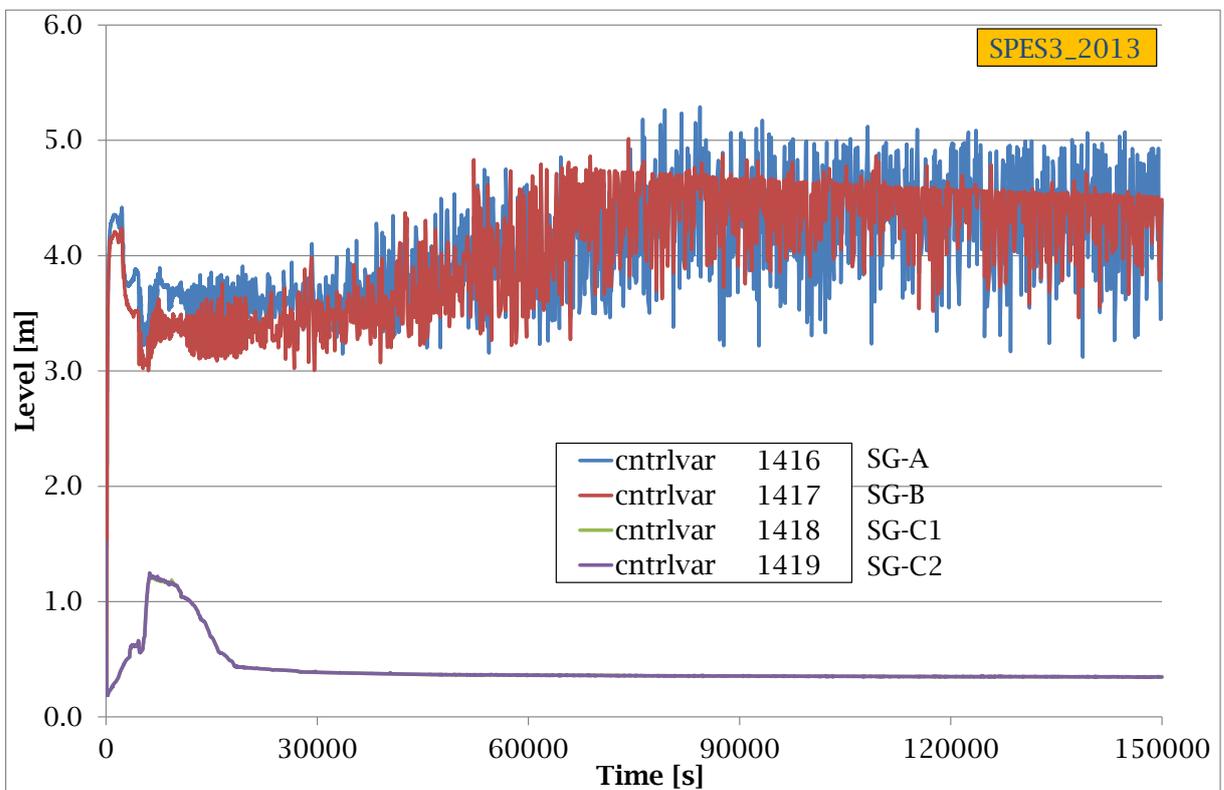


Fig. 6.37 – Livello collassato nei secondari SGs in SPES3_2013.

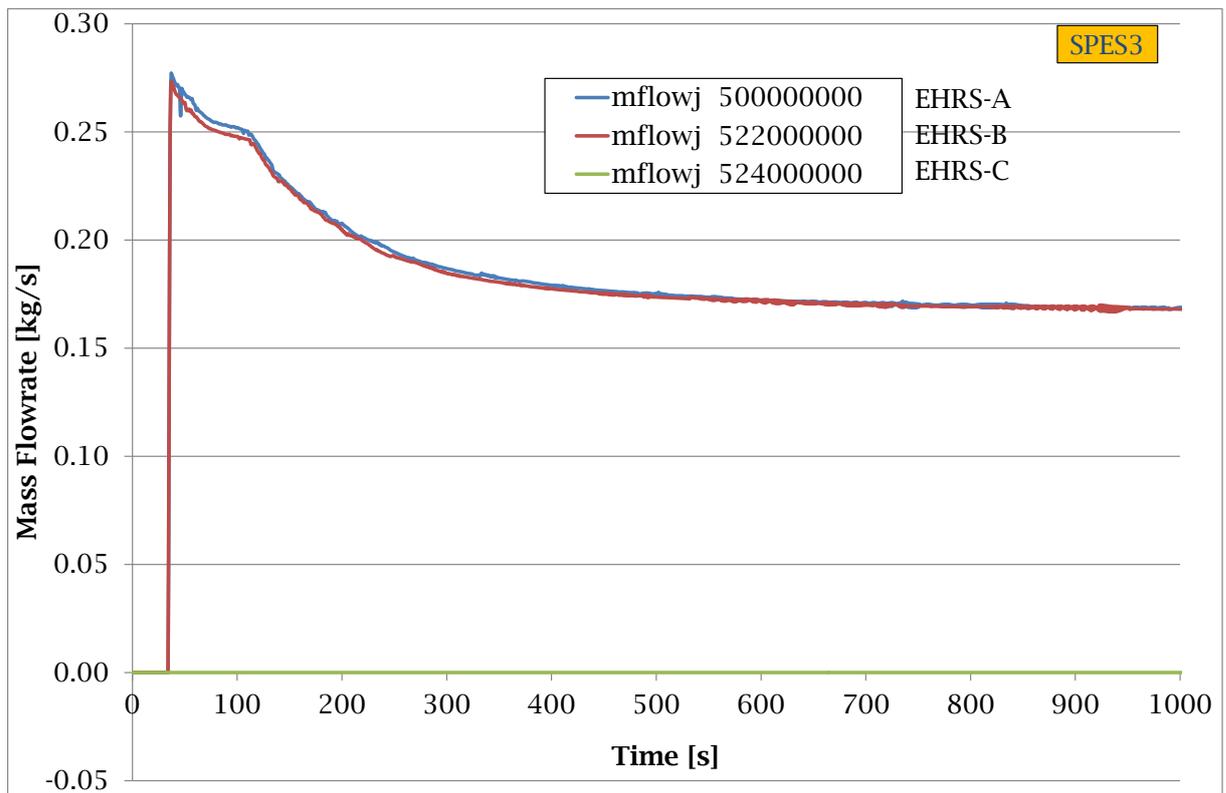


Fig. 6.38 – Portata degli EHRs in SPES3 (part.).

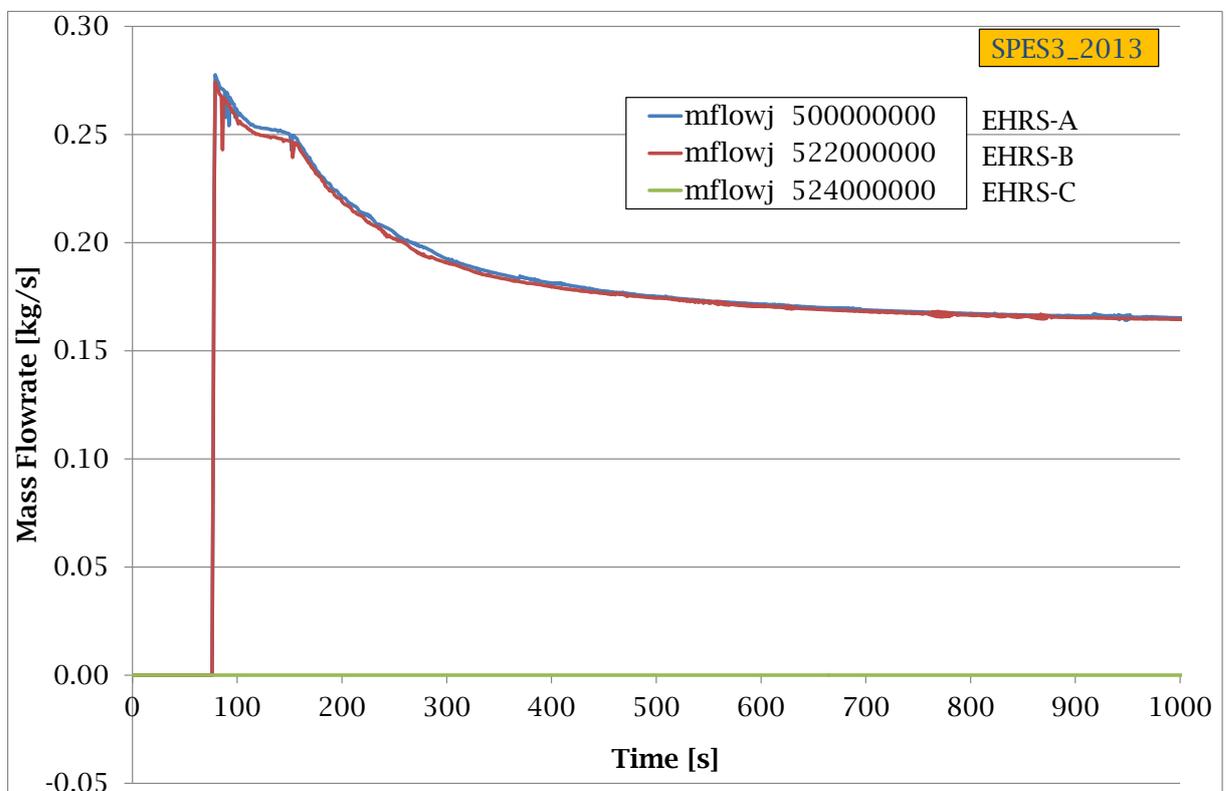


Fig. 6.39 – Portata degli EHRs in SPES3_2013 (part.).

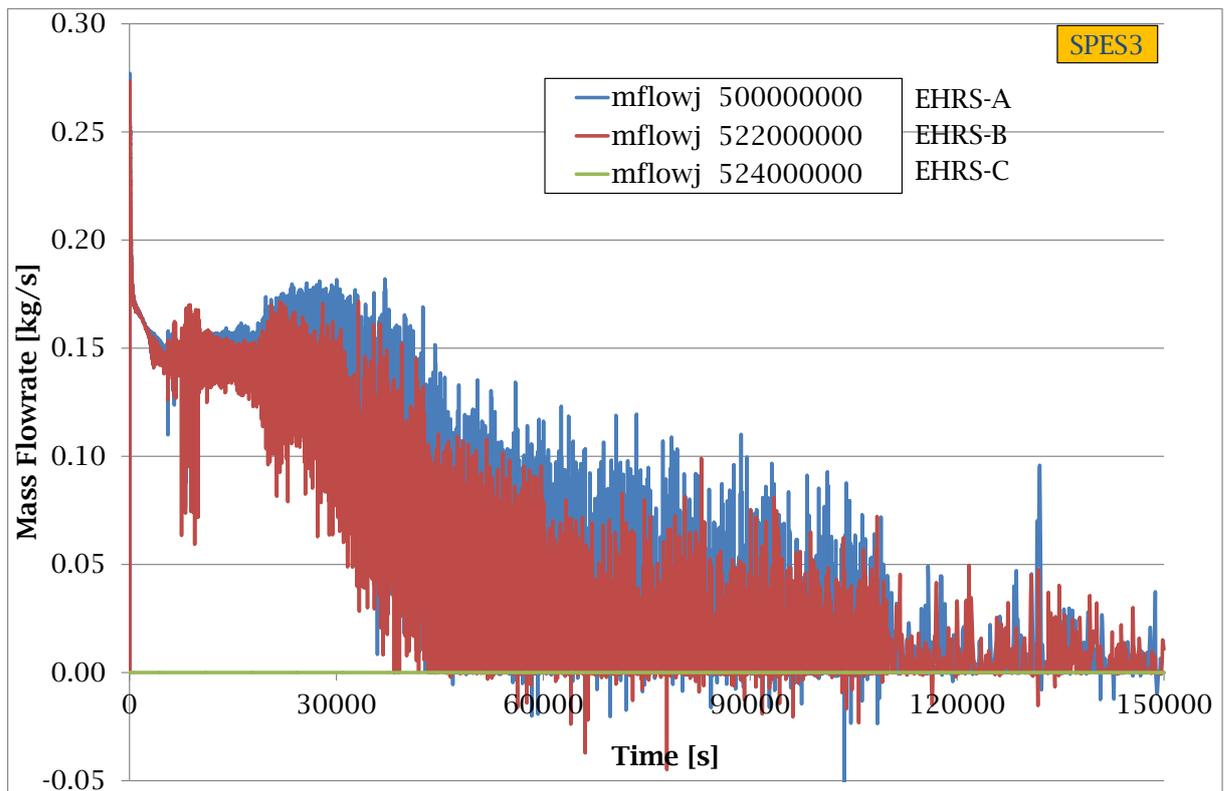


Fig. 6.40 – Portata degli EHRs in SPES3.

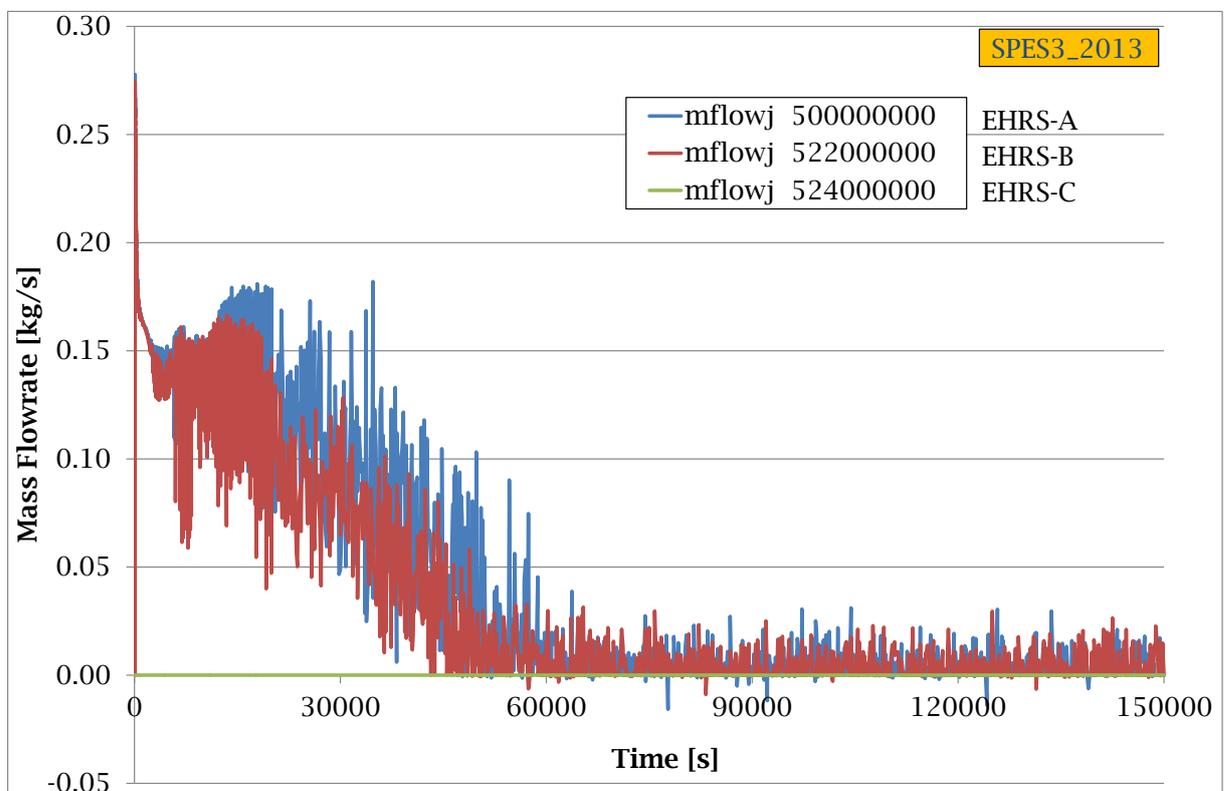


Fig. 6.41 – Portata degli EHRs in SPES3_2013.

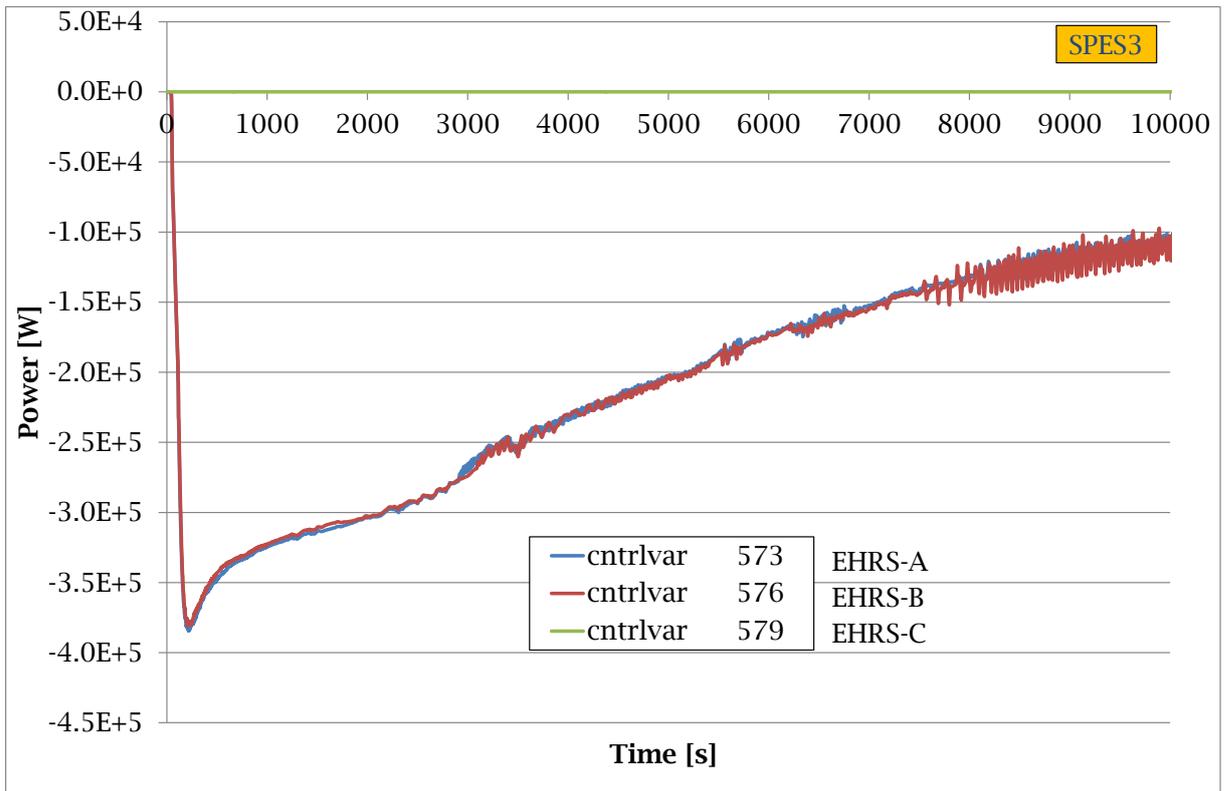


Fig. 6.42 – Potenza rimossa dagli EHRs in SPES3 (part.).

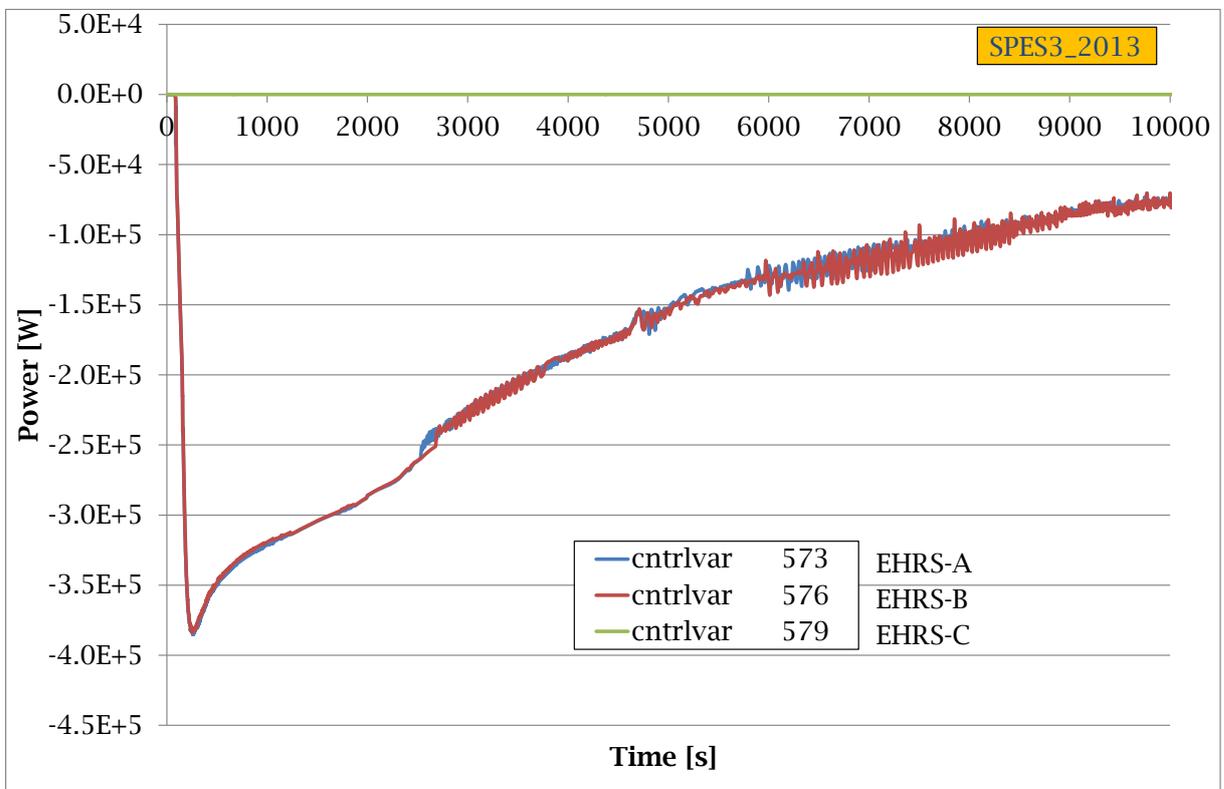


Fig. 6.43 – Potenza rimossa dagli EHRs in SPES3_2013 (part.).

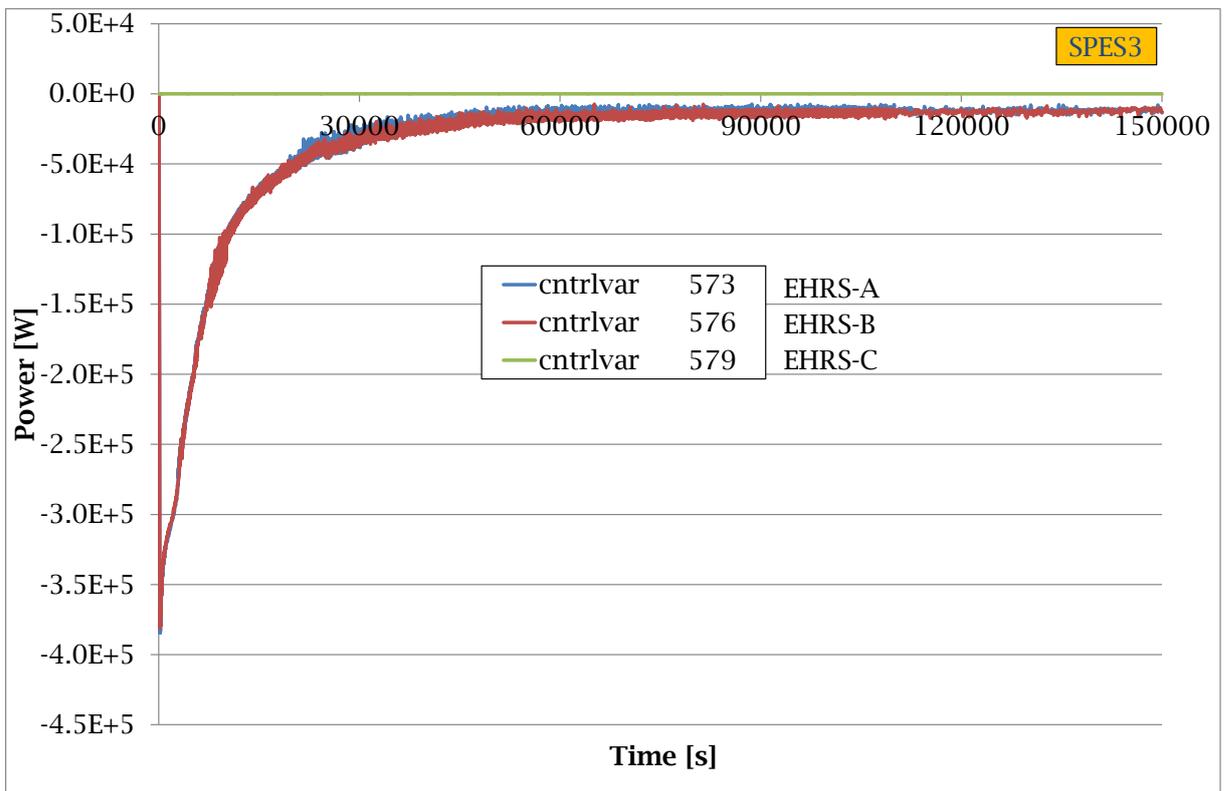


Fig. 6.44 – Potenza rimossa dagli EHRs in SPES3.

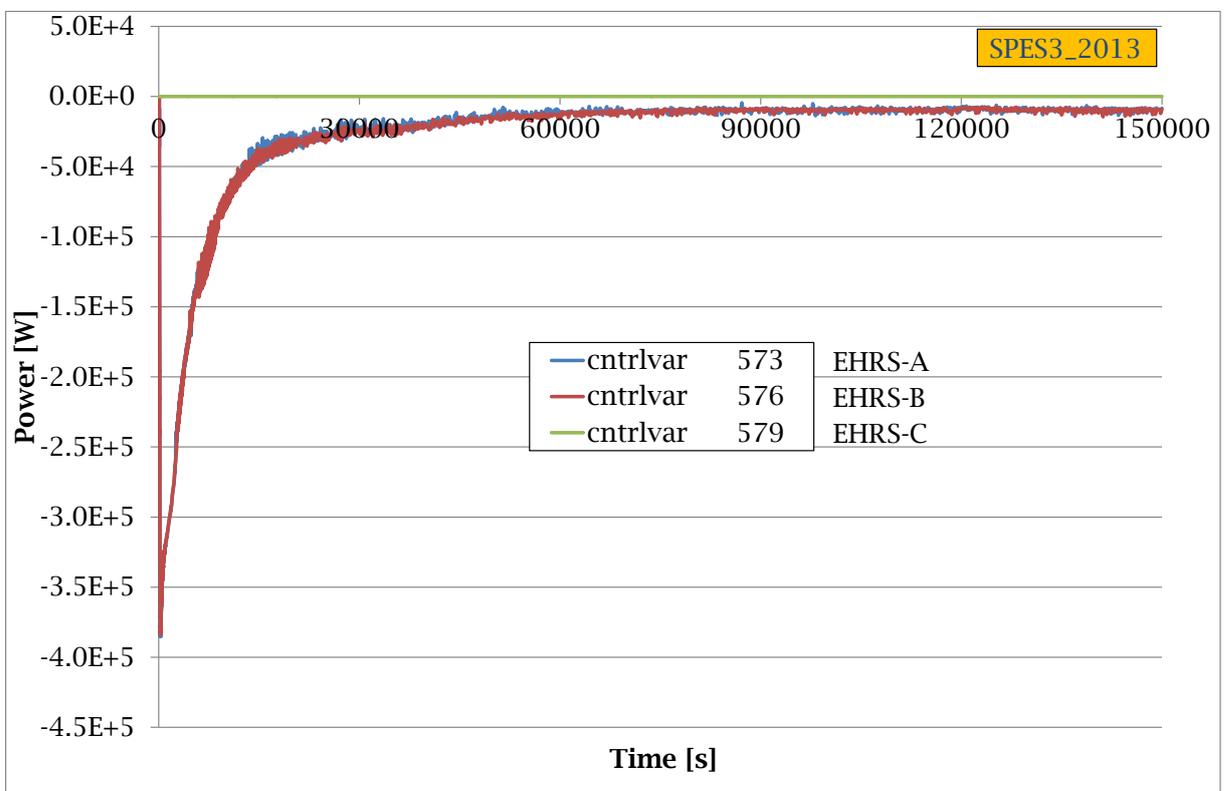


Fig. 6.45 – Potenza rimossa dagli EHRs in SPES3_2013.

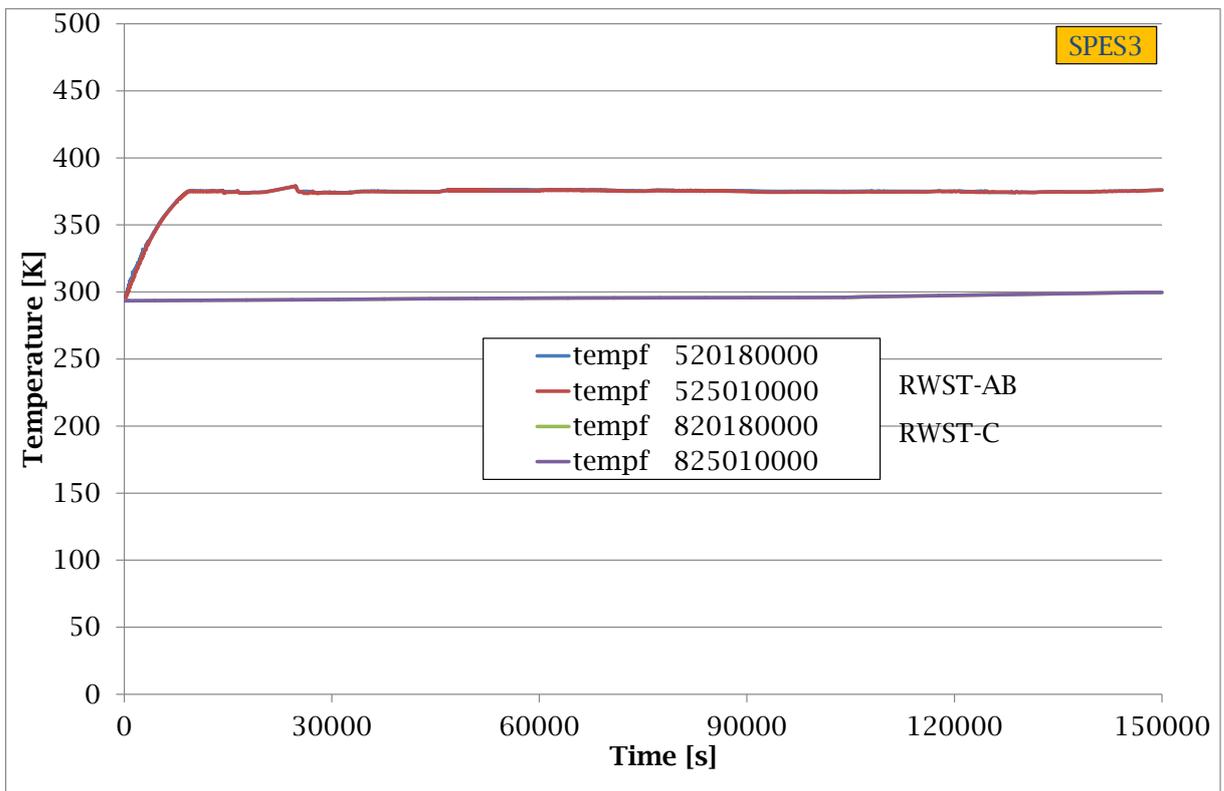


Fig. 6.46 – Temperatura degli RWST in SPES3.

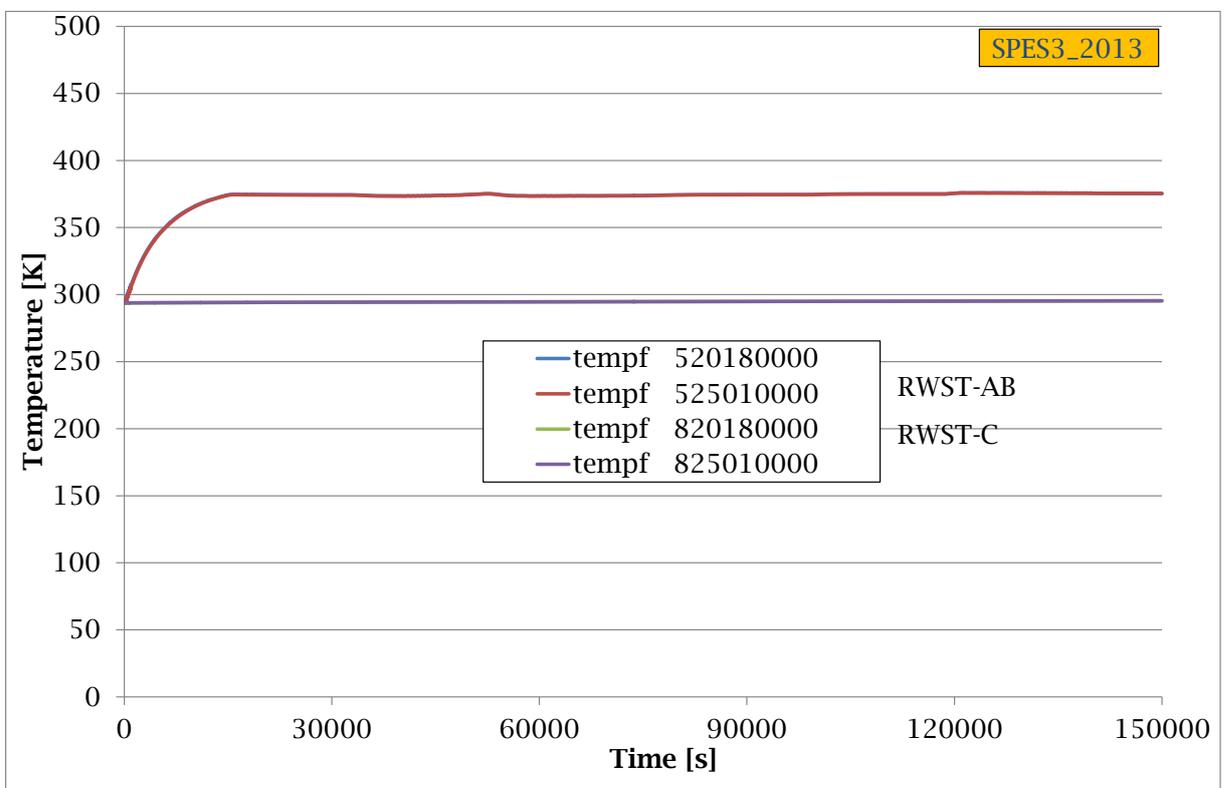


Fig. 6.47 – Temperatura degli RWST in SPES3_2013.

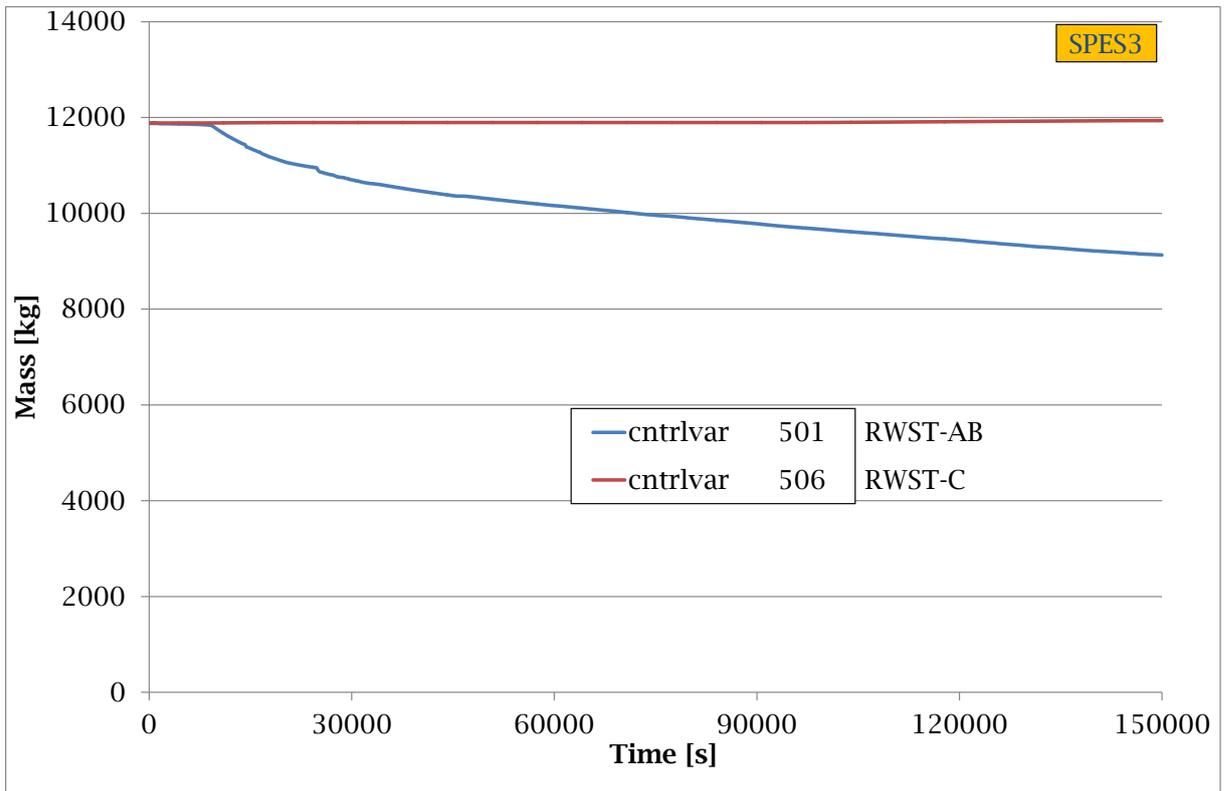


Fig. 6.48 – Massa degli RWST in SPES3.

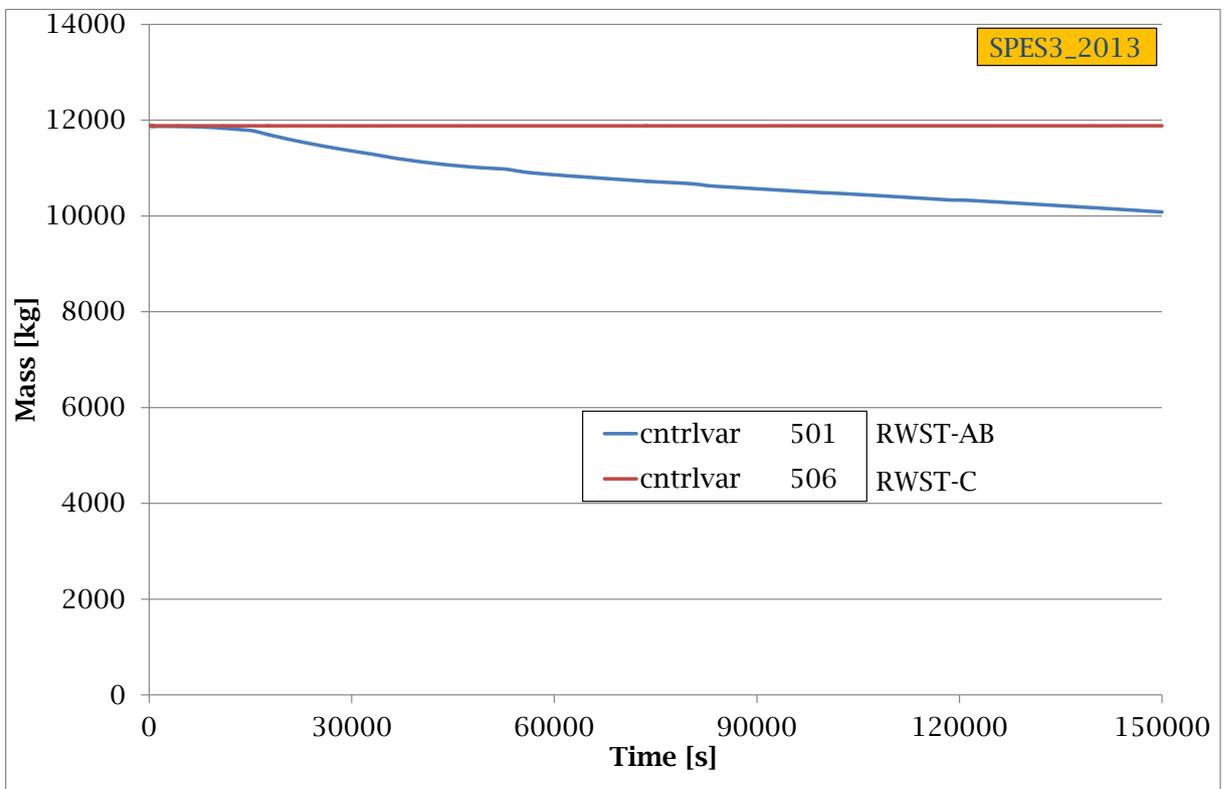


Fig. 6.49 – Massa degli RWST in SPES3_2013.

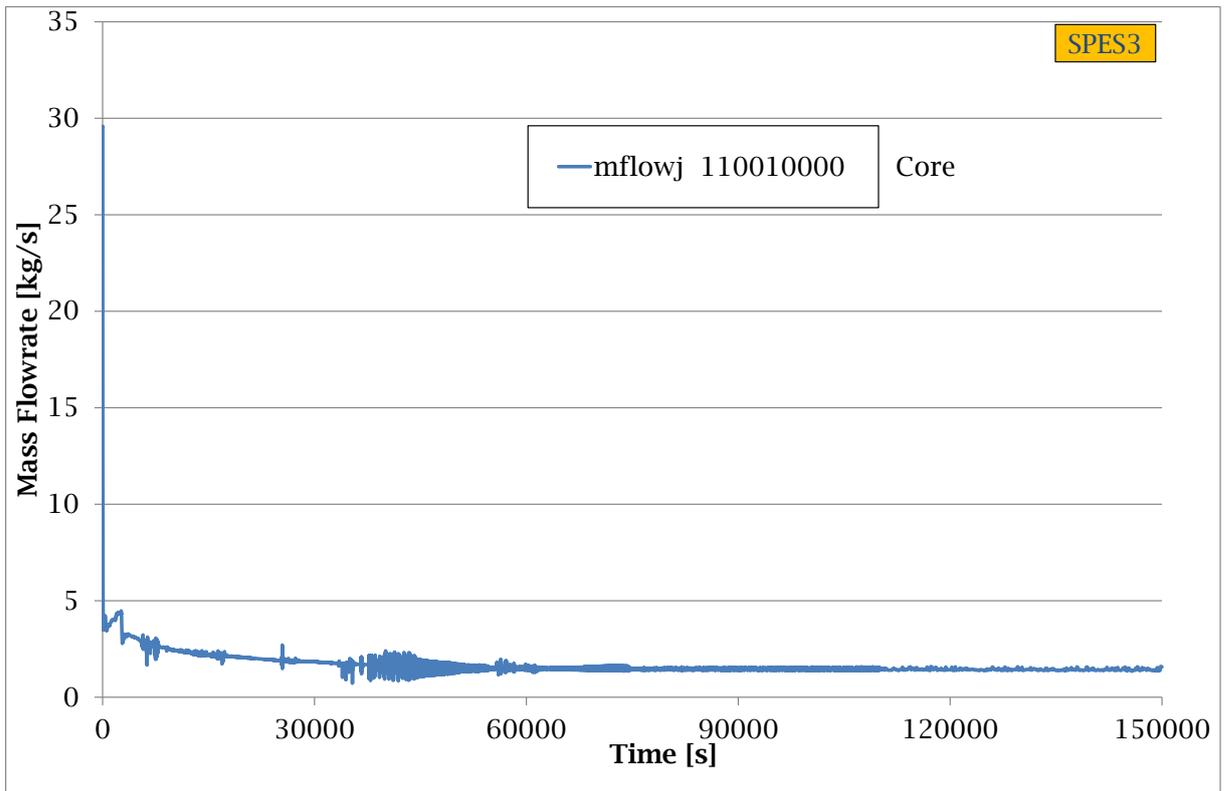


Fig. 6.50 – Portata del core SPES3.

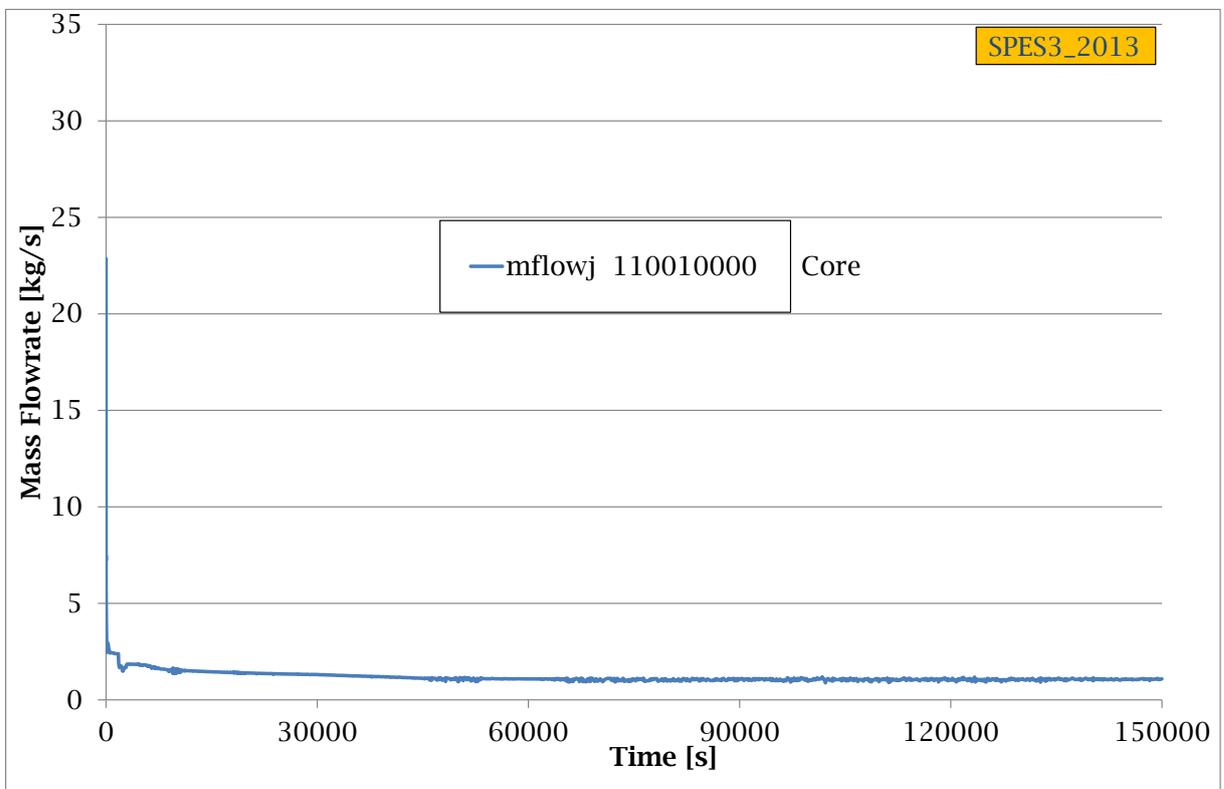


Fig. 6.51 – Portata del core SPES3_2013.

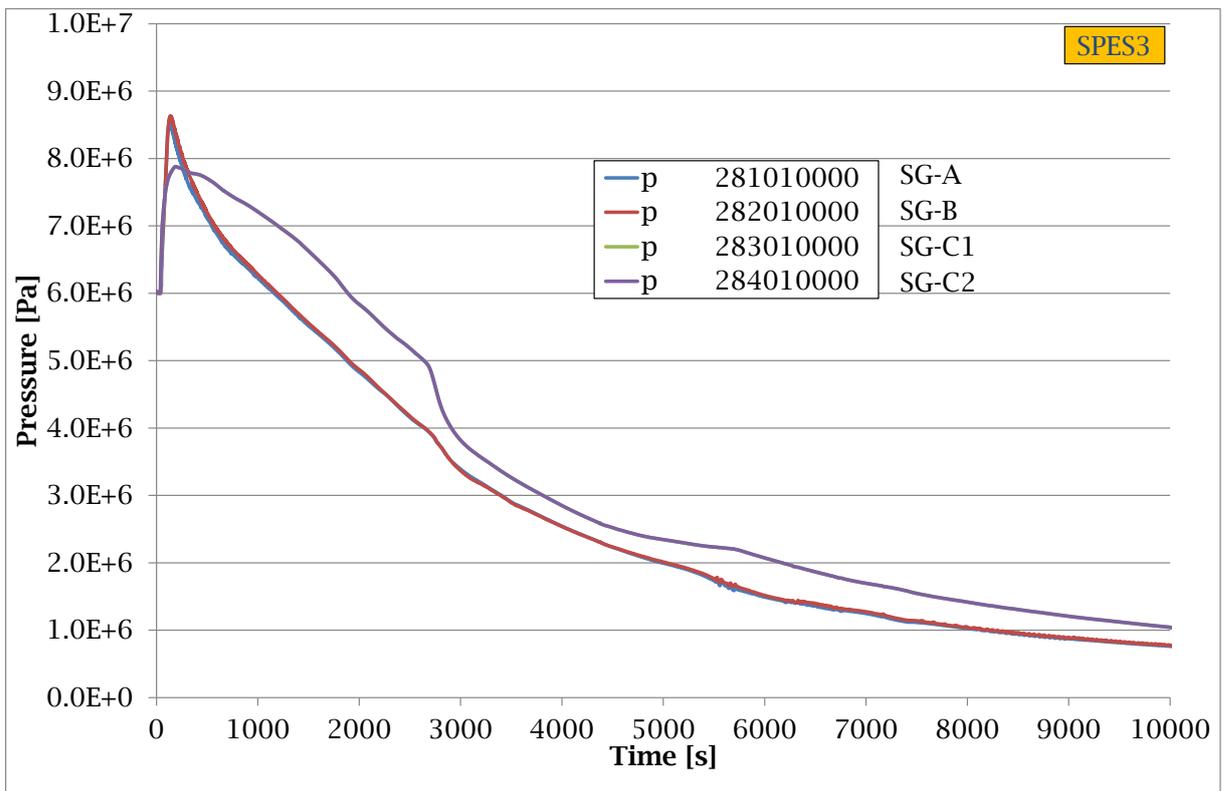


Fig. 6.52 – Pressione in uscita dagli SG lato secondario in SPES3 (part.).

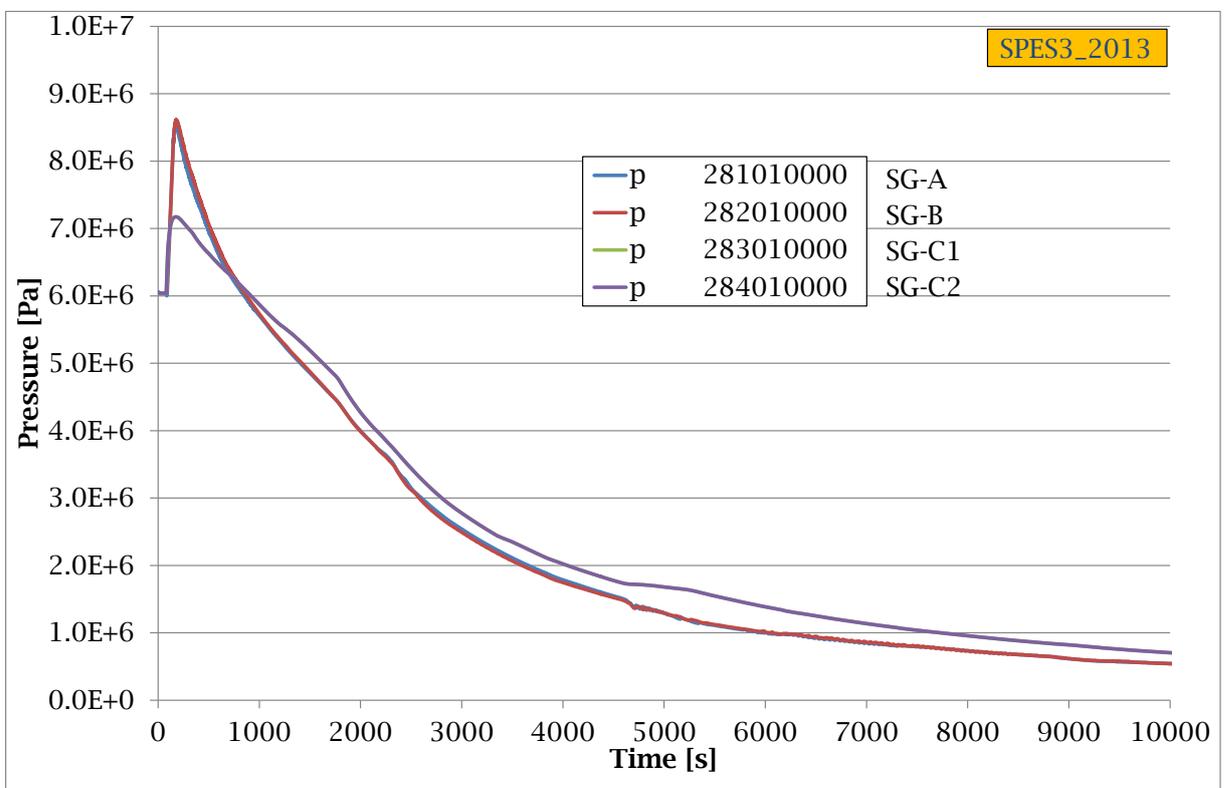


Fig. 6.53 – Pressione in uscita dagli SG lato secondario in SPES3_2013 (part.).

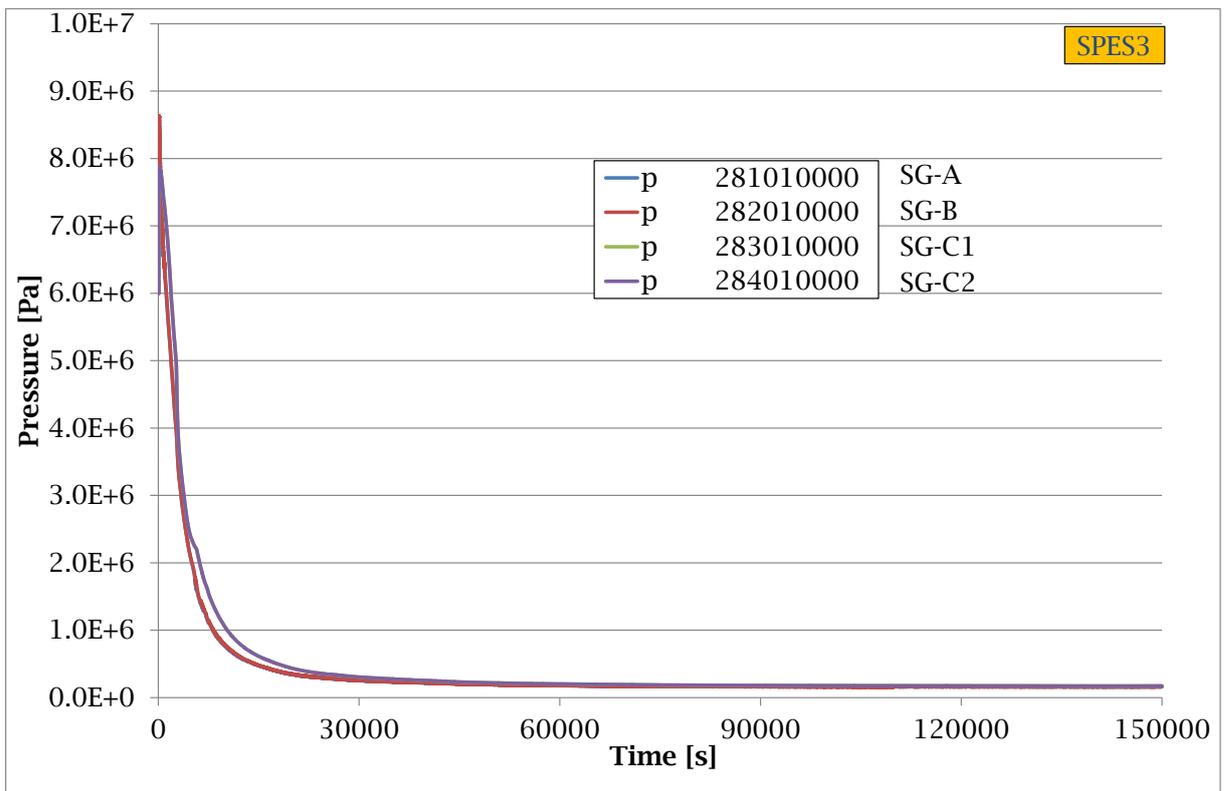


Fig. 6.54 – Pressione in uscita dagli SG lato secondario in SPES3.

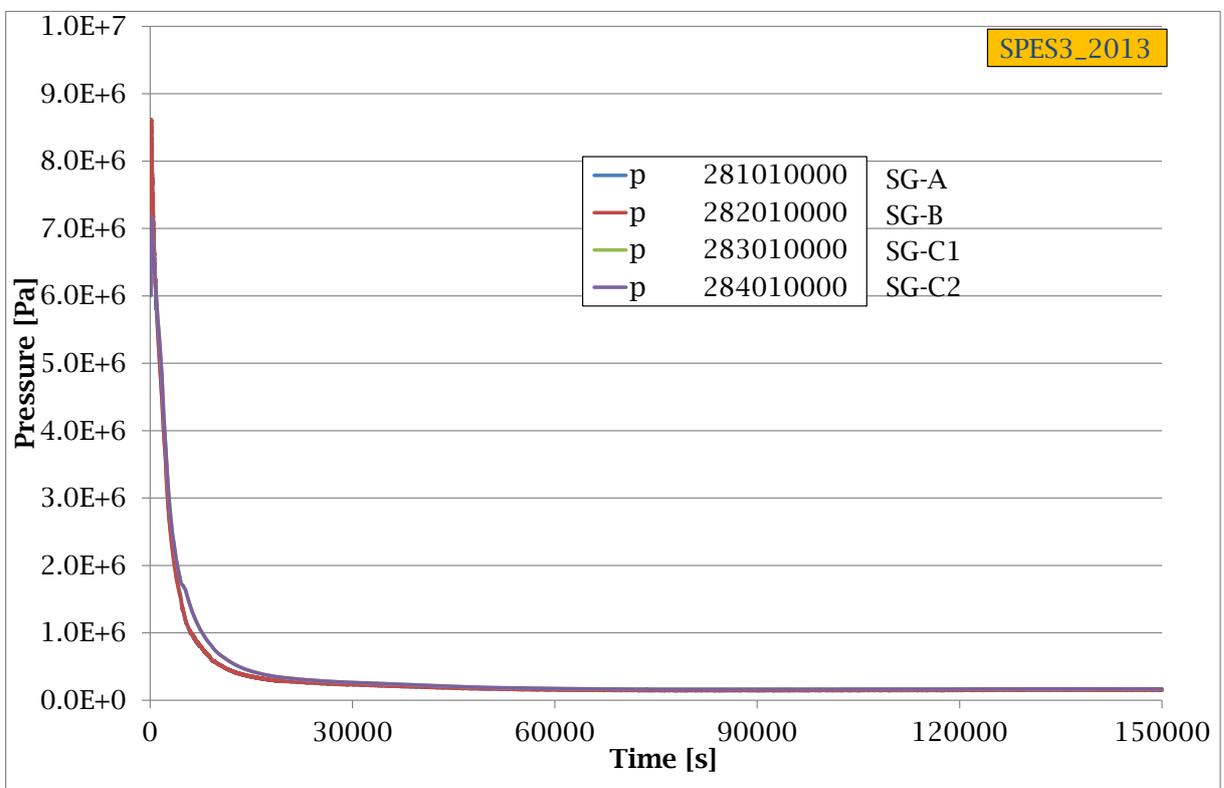


Fig. 6.55 – Pressione in uscita dagli SG lato secondario in SPES3_2013.

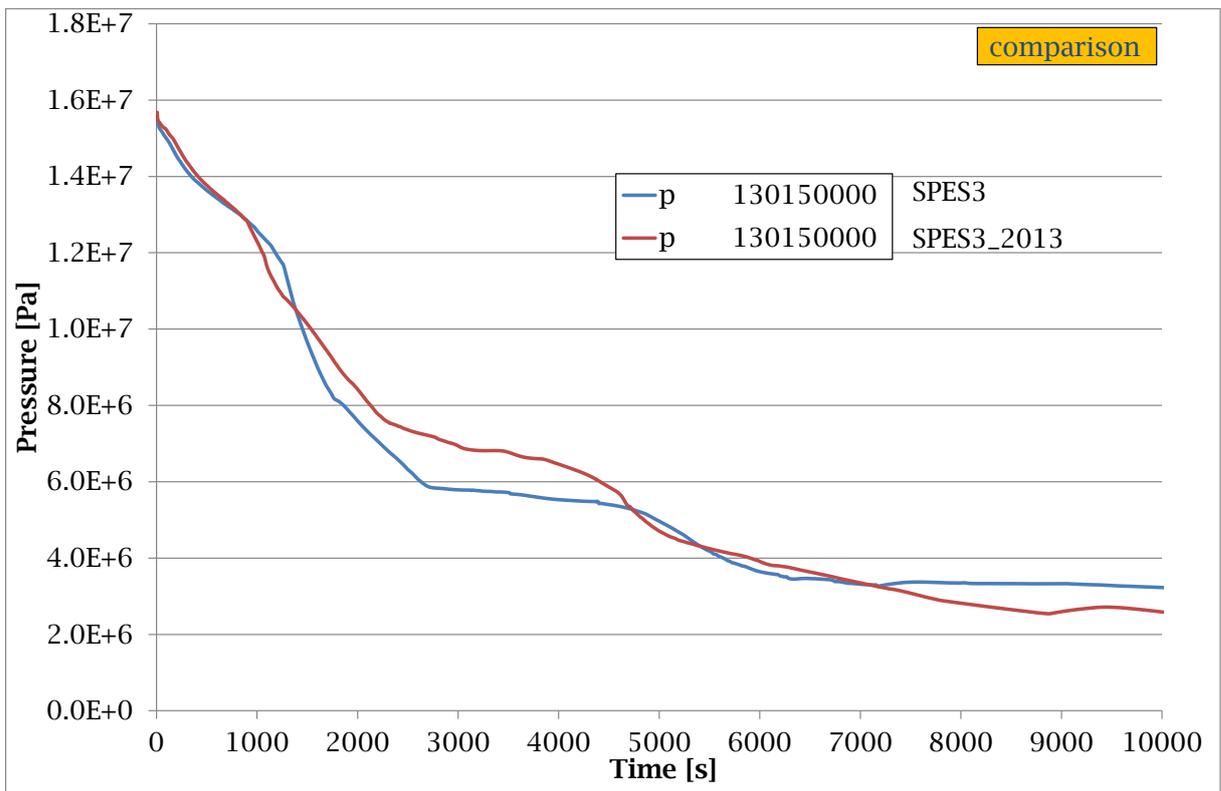


Fig. 6.56 – Confronto delle pressioni del circuito primario (part.).

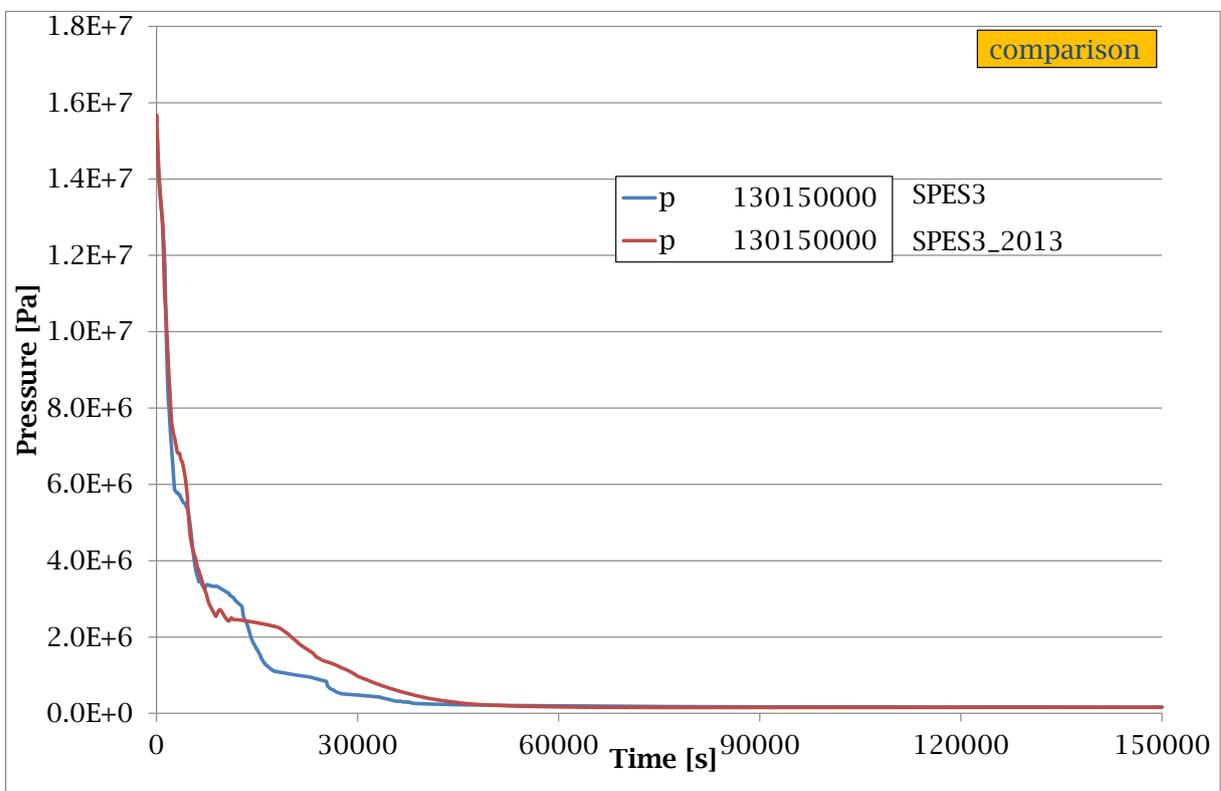


Fig. 6.57 – Confronto delle pressioni del circuito primario.

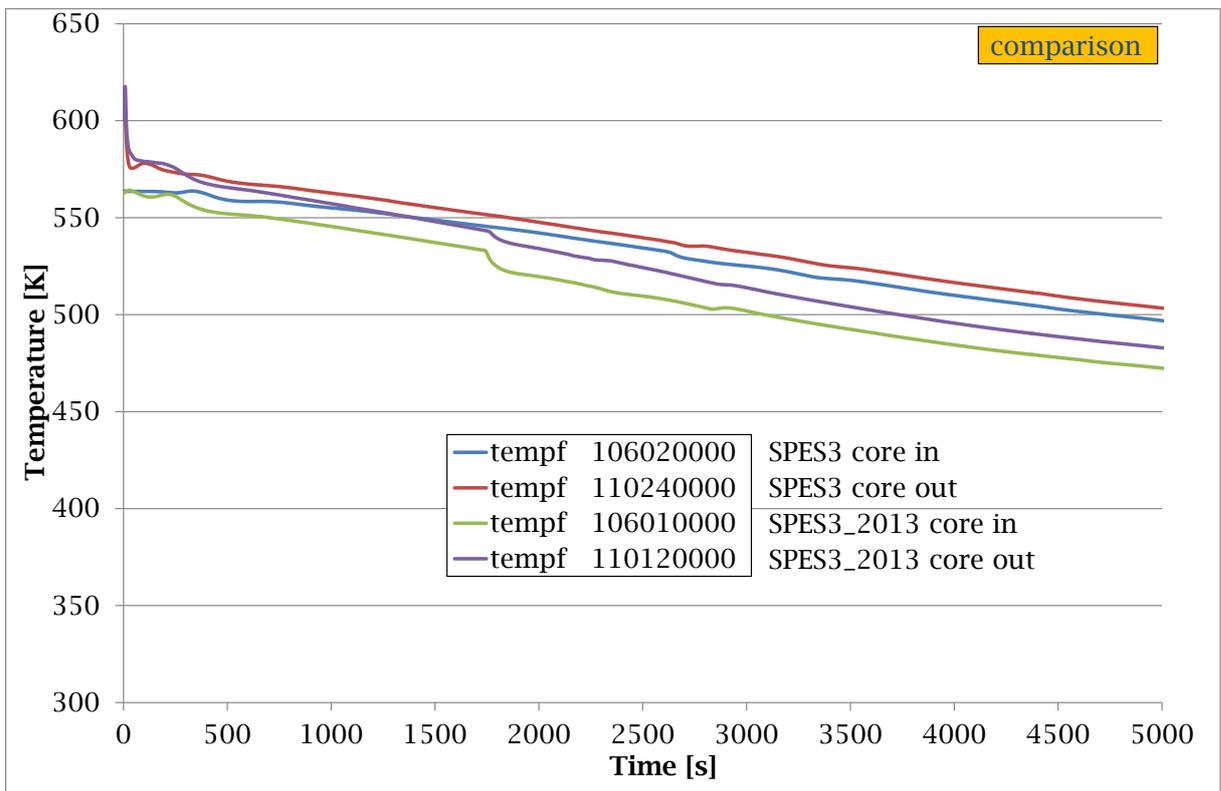


Fig. 6.58 – Confronto delle temperature in ingresso/uscita core (part.).

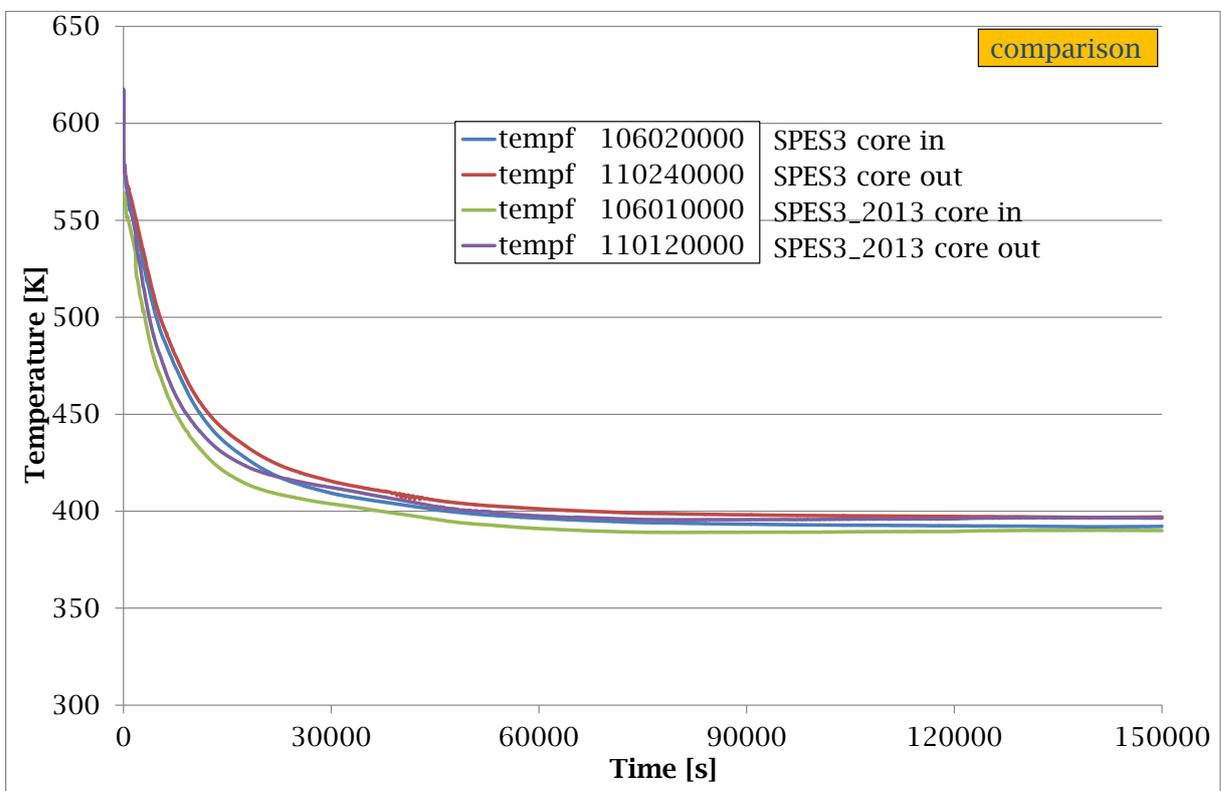


Fig. 6.59 – Confronto delle temperature ingresso/uscita core.

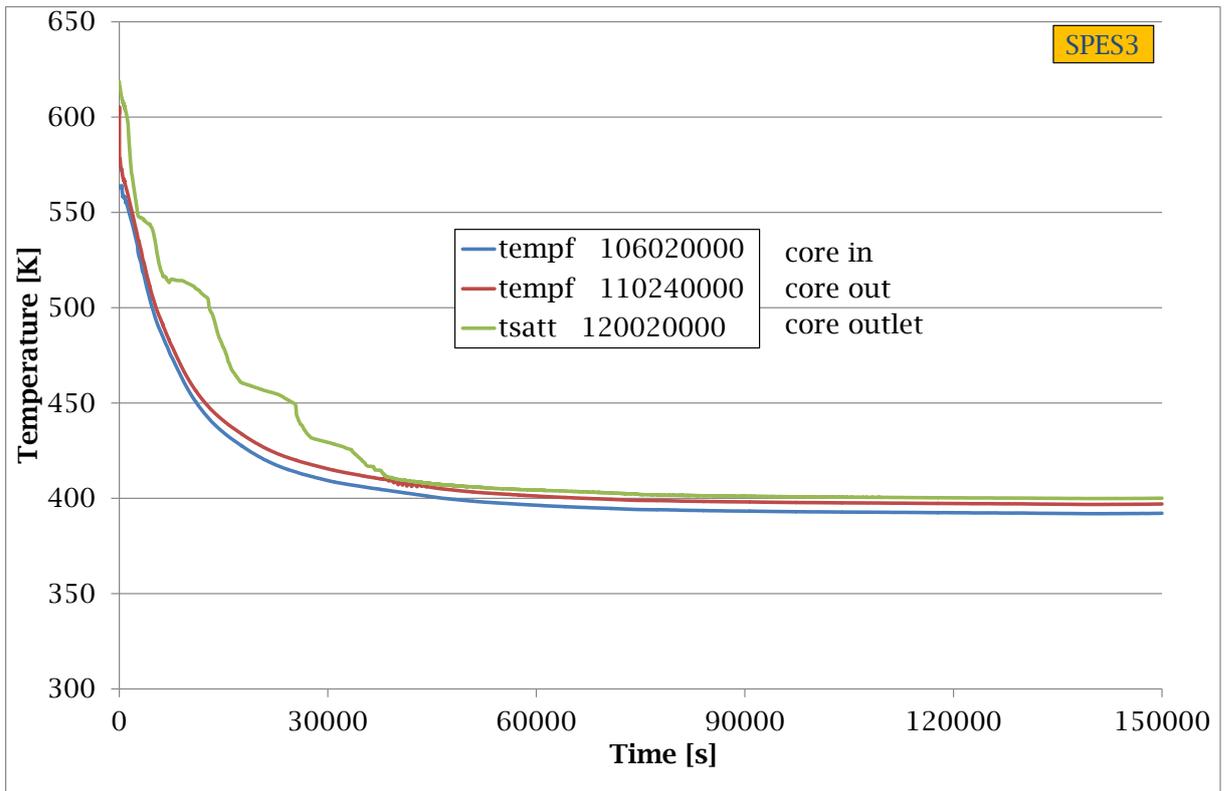


Fig. 6.60 – Temperature ingresso/uscita e saturazione del core SPES3.

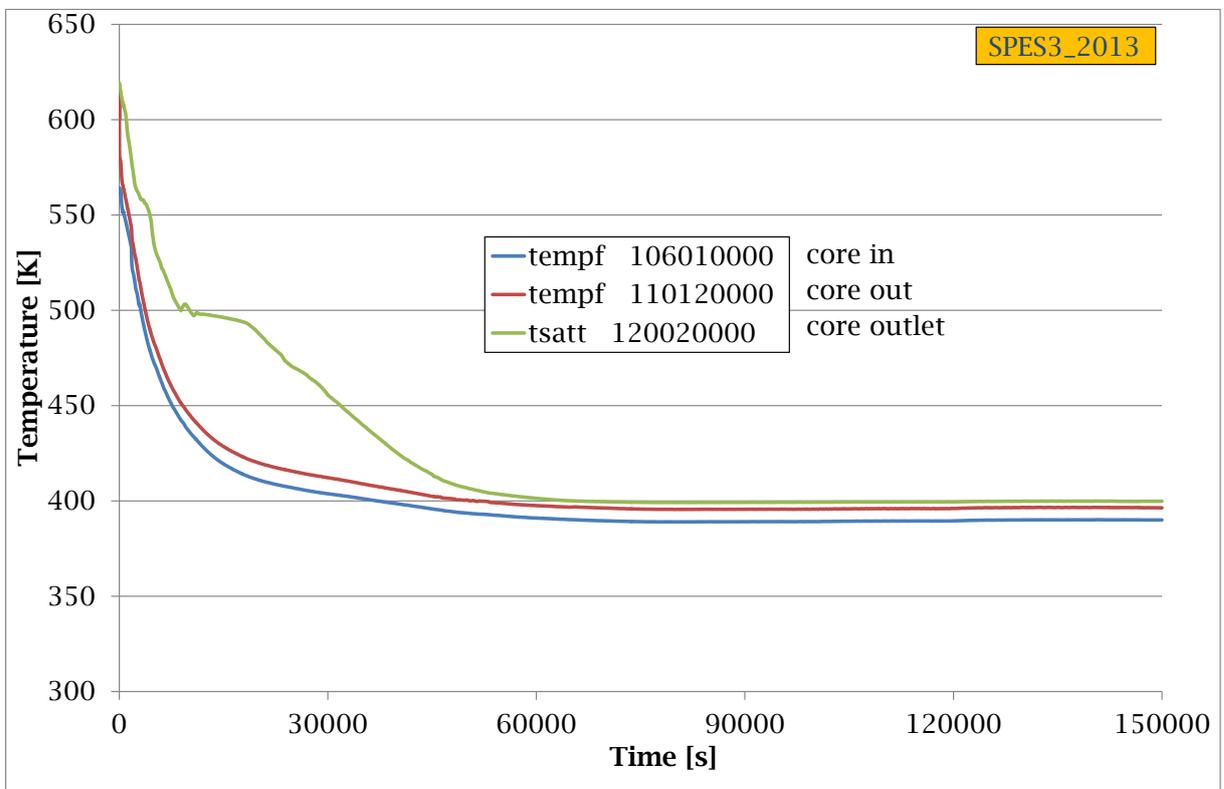


Fig. 6.61 – Temperature ingresso/uscita e saturazione del core SPES3_2013.

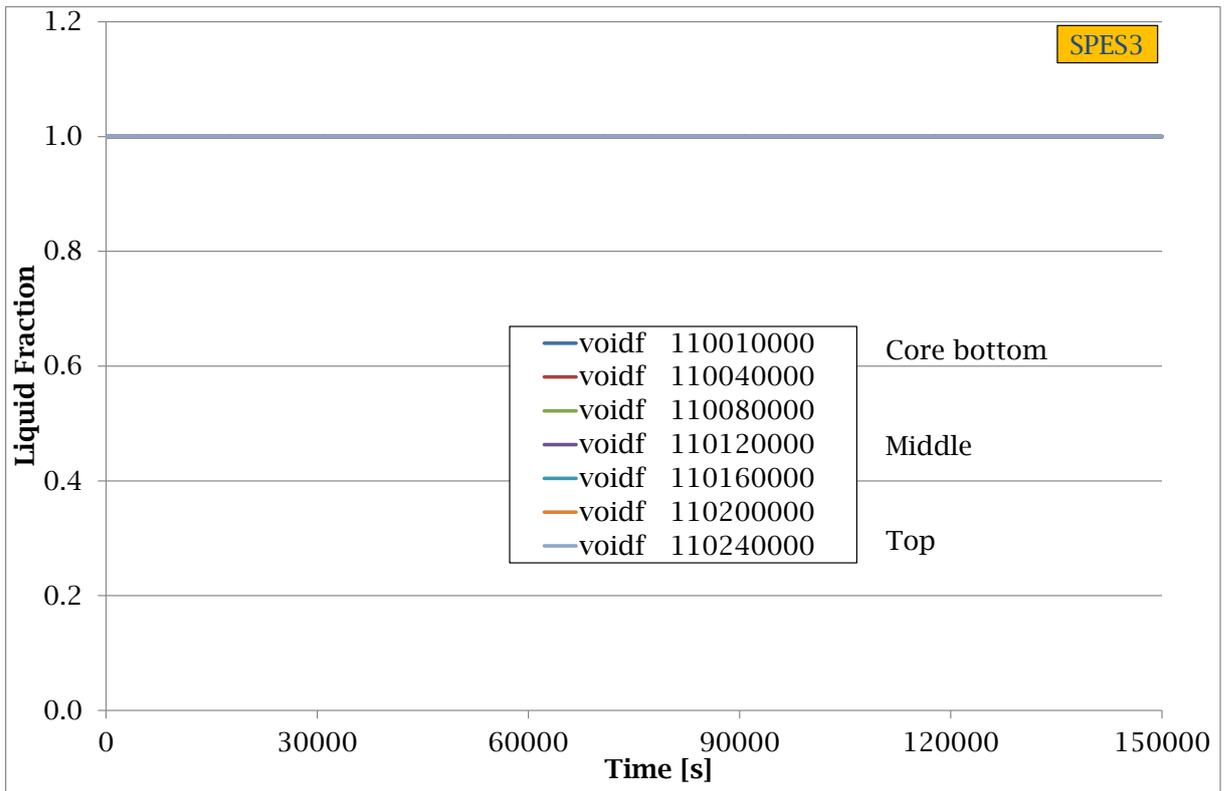


Fig. 6.62 – Frazione di liquido nel core di SPES3.

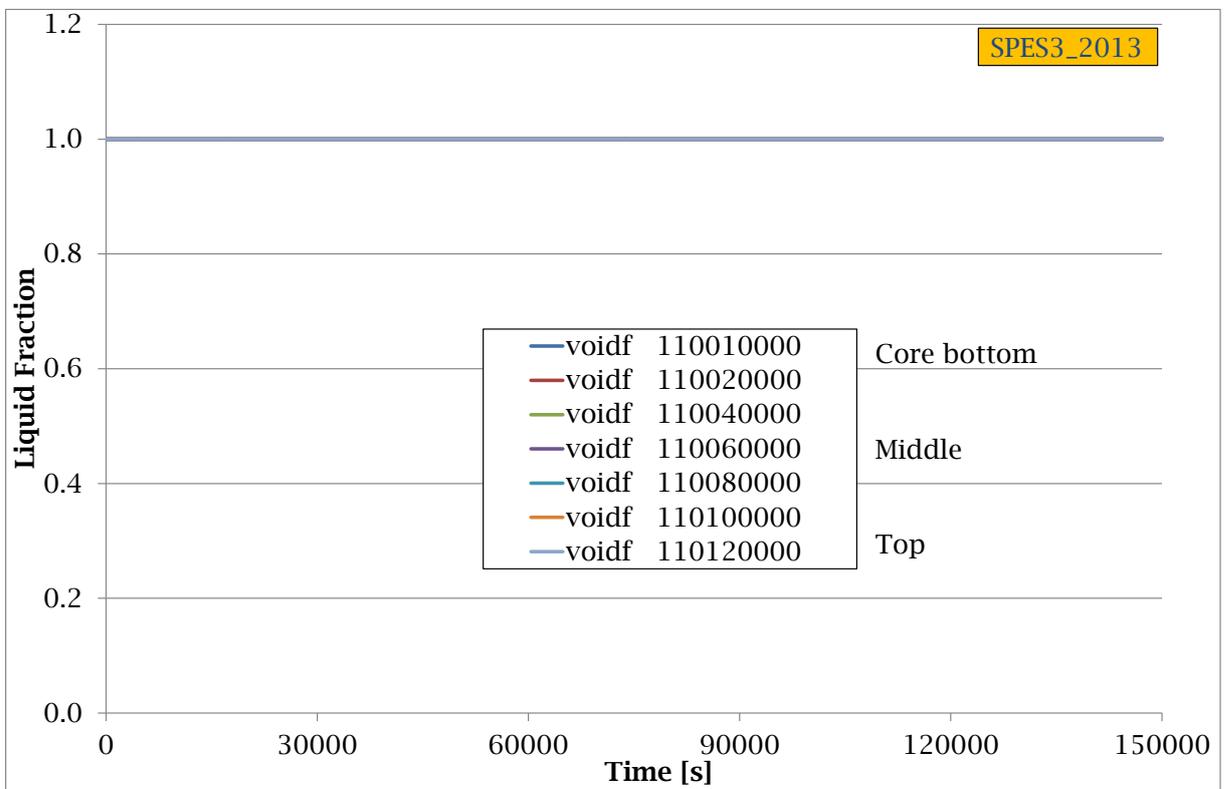


Fig. 6.63 – Frazione di liquido nel core di SPES3_2013.

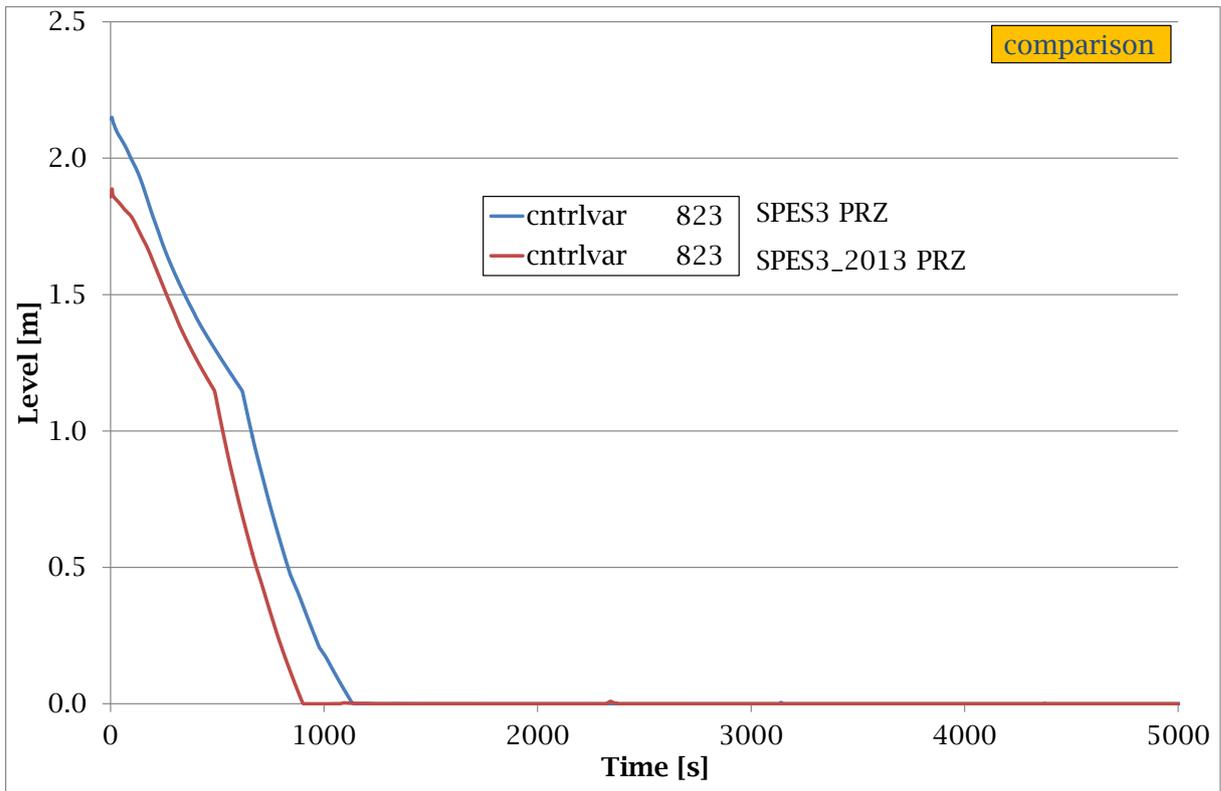


Fig. 6.64 – Confronto livello del pressurizzatore (part.).

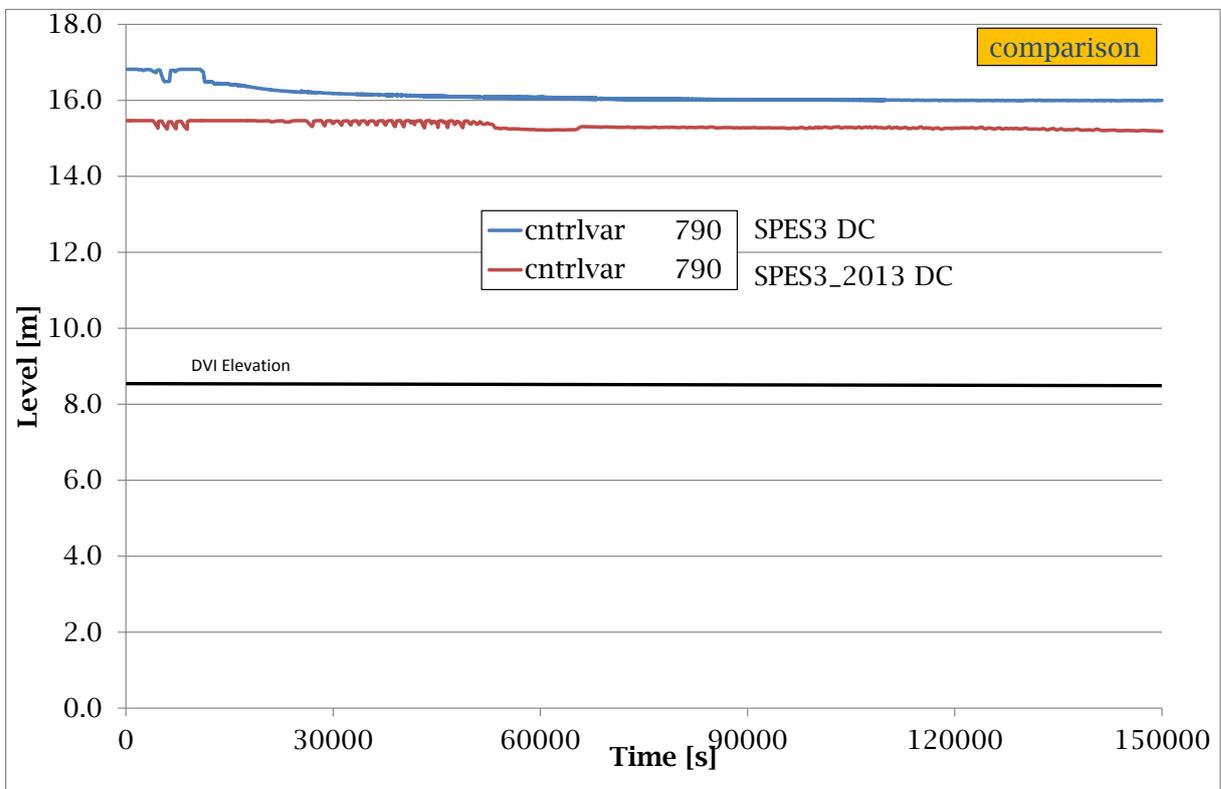


Fig. 6.65 – Confronto livello del downcomer.

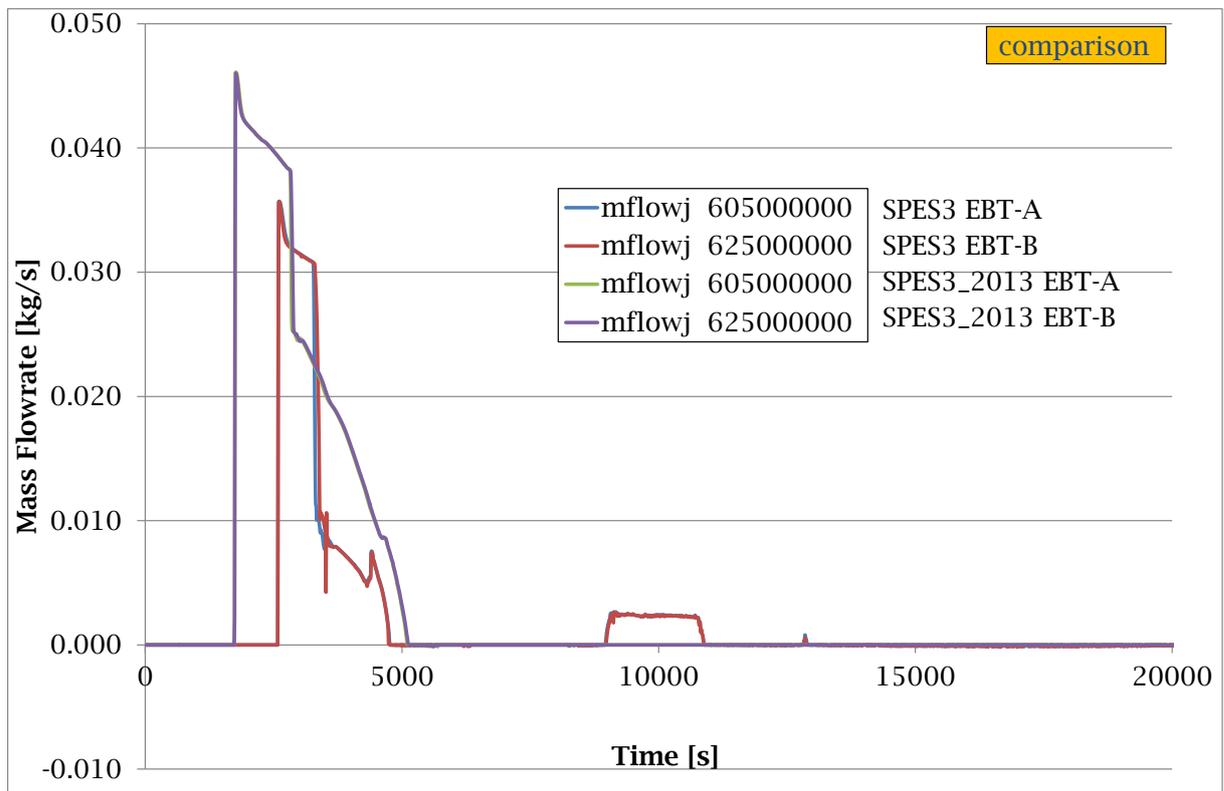


Fig. 6.66 – Confronto portata di iniezione degli EBT (part.).

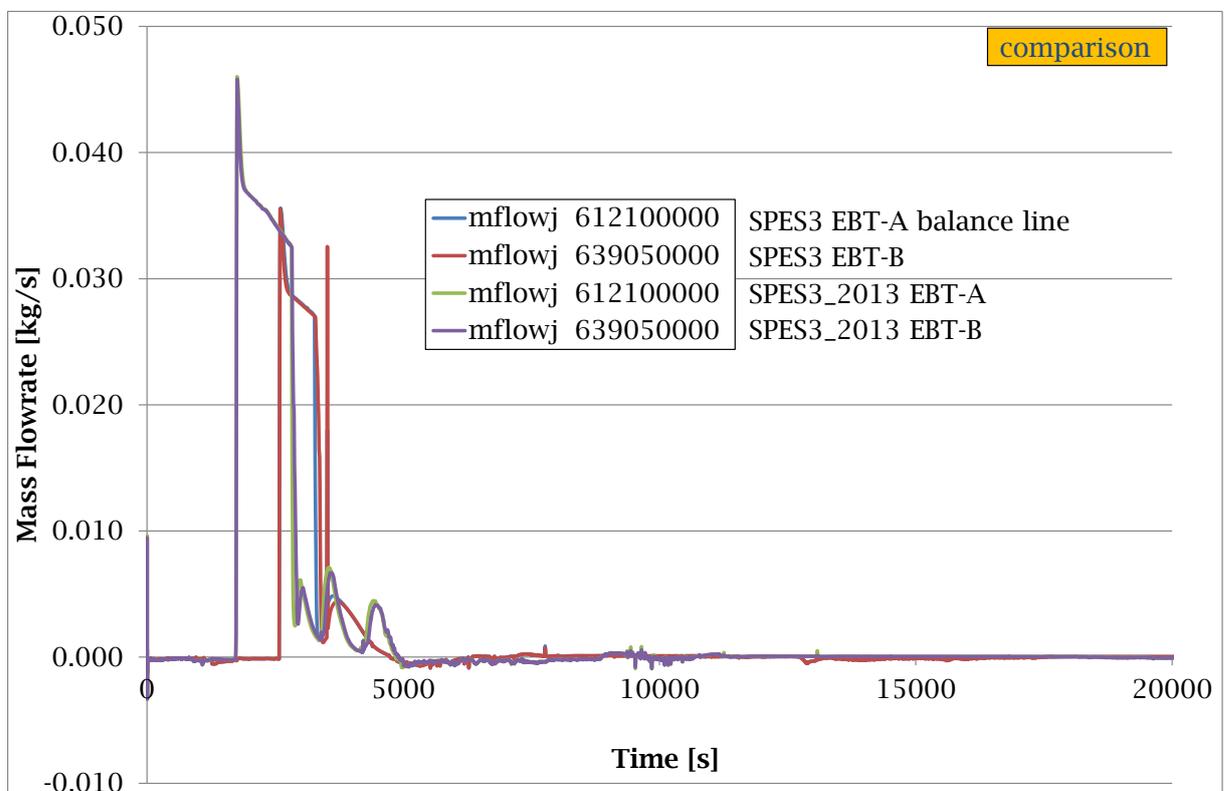


Fig. 6.67 – Confronto portata delle balance line degli EBT (part.).

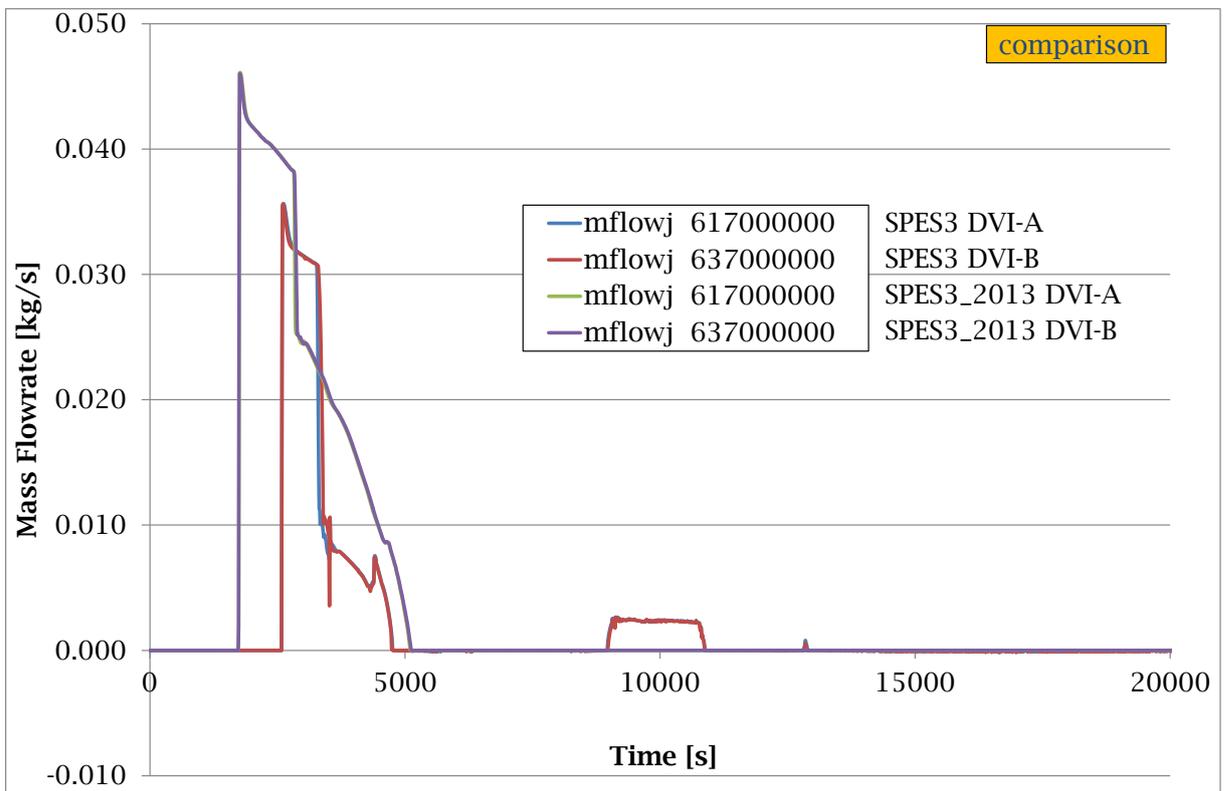


Fig. 6.68 – Confronto portata delle DVI (part.).

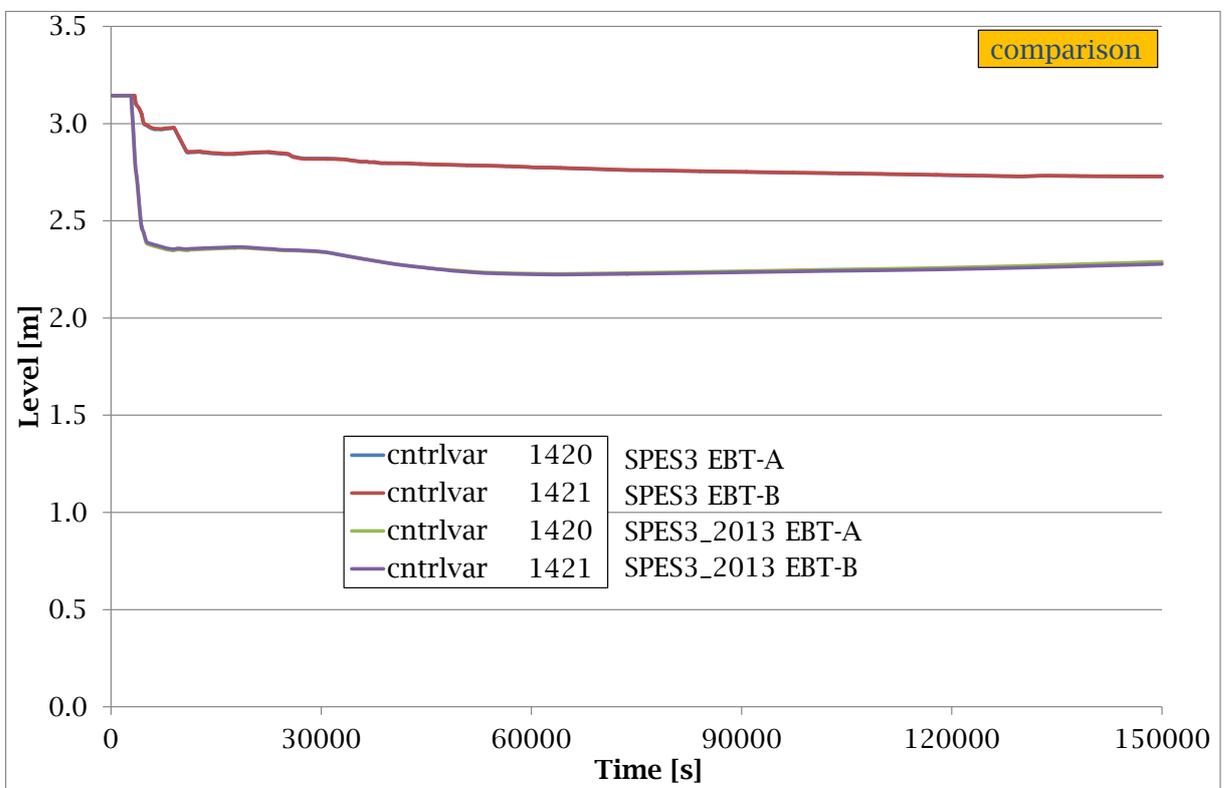


Fig. 6.69 – Confronto livello degli EBT.

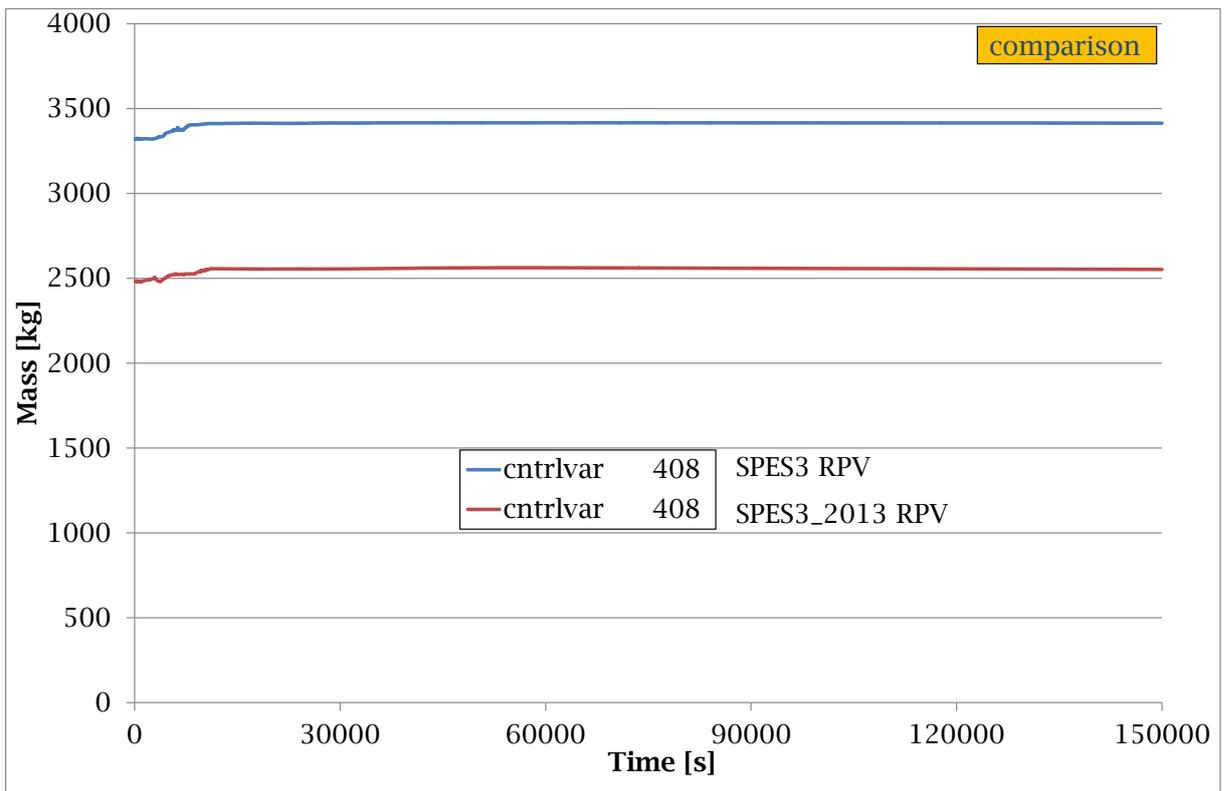


Fig. 6.70 – Confronto delle masse di liquido negli RPV.

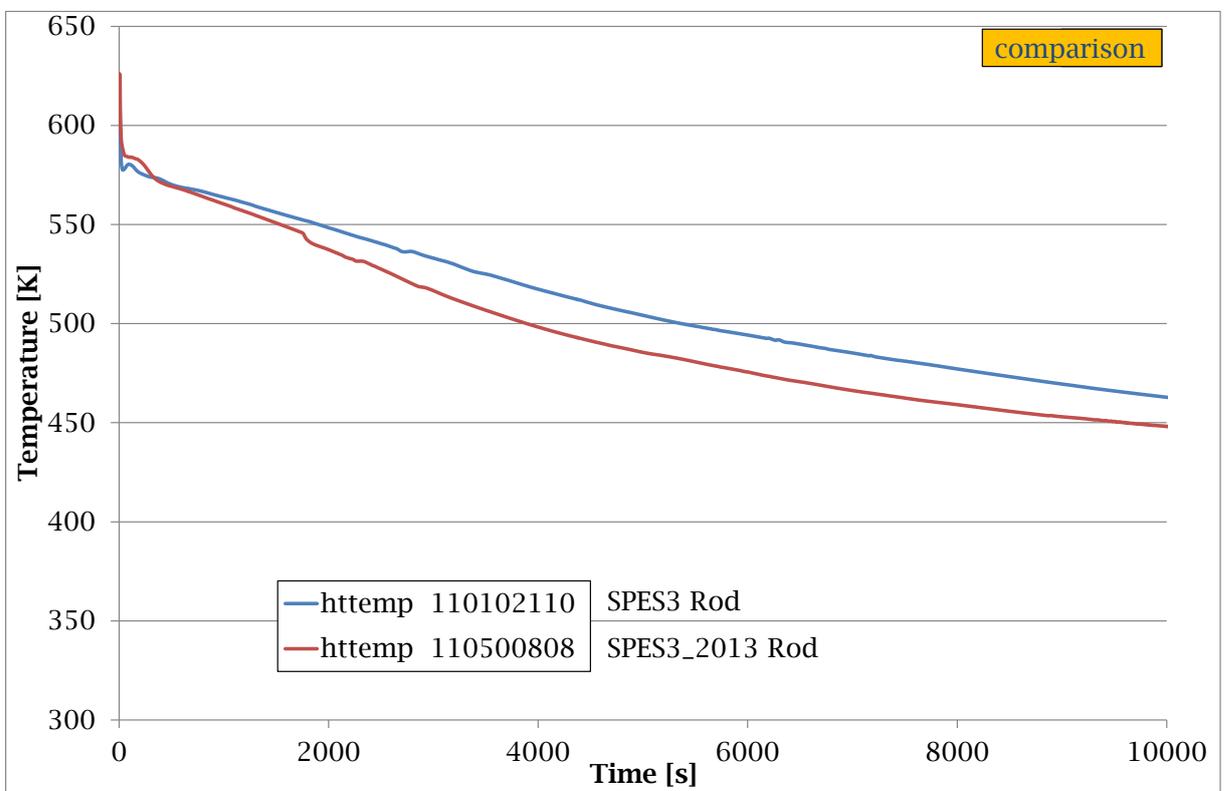


Fig. 6.71 – Confronto delle temperature delle barre scaldanti (part.).

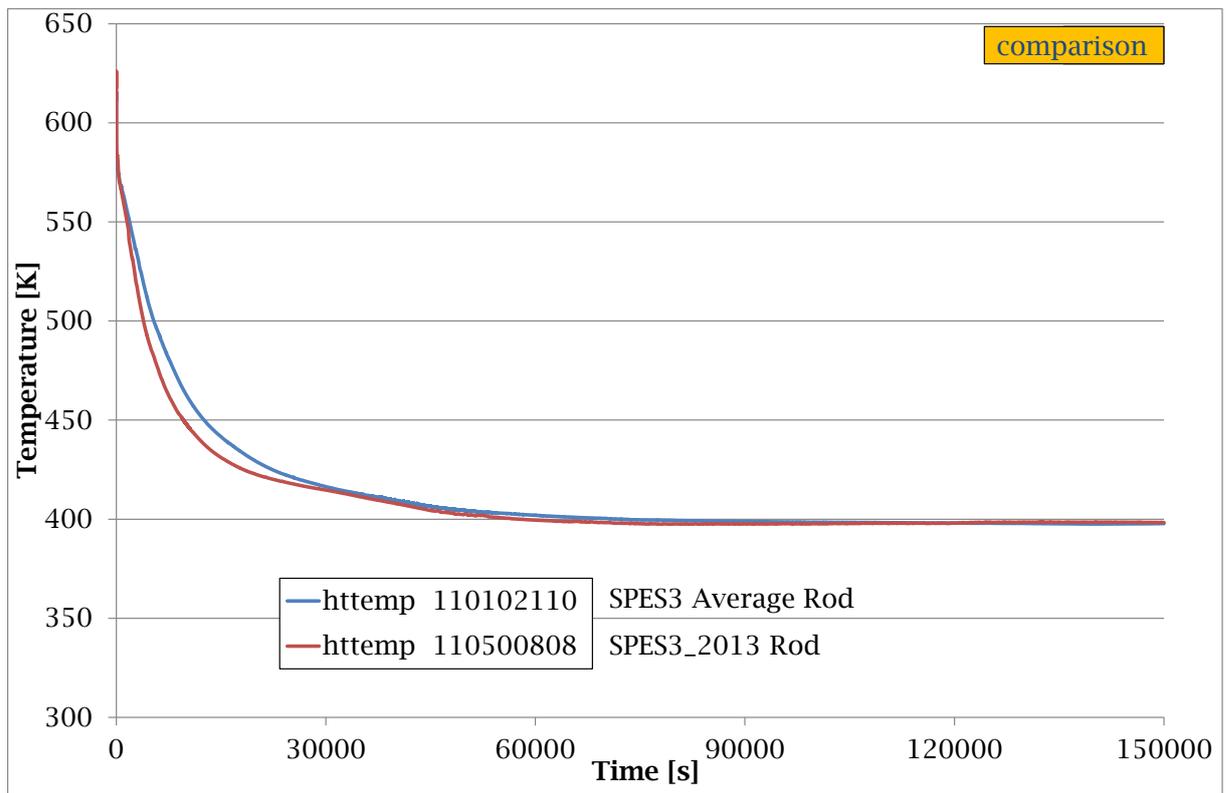


Fig. 6.72 – Confronto delle temperature delle barre scaldanti.

6.5 TRANSITORIO DI ROTTURA DELLA LINEA SUPERIORE EBT-B (180)

Nel presente paragrafo discuteremo dell'incidente di rottura a ghigliottina nella parte alta della linea EBT, classificato come BDE. Tale tipo di transitorio presenta come evento iniziatore una rottura di 4" equivalenti e come unico sistema capace di mitigare gli effetti dell'incidente prevede l'intervento del PCC. Esso ha il compito di rimuovere la potenza residua dell'impianto, in quanto viene previsto il fallimento di tutti i sistemi EHRS.

A causa del mancato intervento degli EHRS, il sistema PCC viene fatto intervenire sulla base del raggiungimento di un valore di alta pressione nel contenimento e con 1800 s di ritardo rispetto al segnale LM. Contemporaneamente al suddetto segnale, si ha l'intervento del primo e del secondo stadio delle valvole ADS. In seguito all'intervento del sistema PCC, la pressione nel contenimento oscillerà tra 0.8 e 0.9 MPa.

Al tempo $t = 0$ s si verifica l'evento iniziatore del transitorio, cioè l'apertura della rottura. L'elenco dei principali eventi viene succintamente riportato:

- L'improvvisa apertura della rottura causa l'iniziale e violenta fase di svuotamento e di depressurizzazione del sistema primario in conseguenza del quale si assiste all'aumento della pressione del contenimento e allo scarico del vapore dentro al sistema PSS.

- L'S-signal comanda lo spegnimento del reattore e l'isolamento dei secondari dei generatori di vapore. Inoltre si assiste al fallimento dell'intervento dei sistemi EHRS-A e B.

- Sulla base del segnale di basso livello di liquido nel PRZ inizia il coast-down delle pompe di circolazione del primario, inoltre si assiste all'innescò della circolazione naturale nel core che sussiste fino a quando il livello di liquido nel RPV è superiore alla quota delle check-valve che collegano il riser al downcomer (a circa 1/3 dell'altezza dei generatori di vapore).

- Sulla base della violenta depressurizzazione del primario, l'LM-signal comanda l'apertura delle valvole dell'ADS sia del primo che del secondo stadio e l'intervento del sistema EBT che inietta acqua nel circuito primario. Si assiste al fallimento dell'intervento del sistema EHRS-C.

- L'intervento del sistema PCC si verifica quando nel contenimento si raggiunge un valore di pressione di 0.9 MPa e con un ritardo di 1800 s dopo l'attivazione dell'LM-signal.

- Il sistema PCC riesce ad abbassare la pressione nel contenimento e quando la pressione al suo interno è superiore alla prevalenza della colonna nei tubi di sfiato, l'acqua fredda viene fatta fluire dal PSS al DW contribuendo alla depressurizzazione del contenimento e allagando la RC.

- Il segnale di bassa differenza di pressione tra il RPV e il DW, pilota l'intervento del sistema LGMS e l'apertura delle valvole di connessione tra RC e DVI, facendo aumentare la quantità di fluido che dal contenimento ritorna al sistema.

- Il sistema PCC mantiene i valori della pressione nel DW tra i valori fissati di set-point.

- Nel lungo termine il sistema PCC riesce a mantenere la pressione del sistema all'interno di valori di set-point condensando il vapore che fuoriesce dal RPV con acqua di riflusso da RC a RPV.

Nel paragrafo successivo sono riportati e commentati in dettaglio i risultati del transitorio appena descritto.

6.5.1 *Descrizione del transitorio*

Le condizioni di stazionario, a partire dalle quali viene simulato il transitorio, sono riportate nella Tab. 2.1.

Apertura della rottura

La portata di fluido attraverso la rottura, in uscita dal RPV (SPLIT) e in ingresso al contenimento (DEG), è mostrata nella Fig. 6.72 per SPES-3 e nella Fig. 6.74 per SPES3_2013.

Il valore massimo della portata in uscita dal RPV, pari a 4.74 kg/s per SPES3 e a 4.72 kg/s per SPES3_2013, si osserva dopo 2 s dall'apertura della rottura in ambedue le configurazioni. A partire da 75 s in SPES3 e circa 35 s in SPES3_2013 la portata in uscita dalla rottura diminuisce a causa dell'intervento delle valvole di ADS che, facendo diminuire la pressione nel RPV, causa il flash del liquido con conseguente diminuzione della frazione di liquido della miscela in uscita dalla rottura. La Fig. 6.77 mostra l'andamento della frazione di liquido del flusso attraverso la rottura per SPES3 mentre la Fig. 6.78 mostra l'andamento della stessa variabile per la configurazione SPES3_2013. La portata proveniente dalla rottura e in ingresso al contenimento per la configurazione SPES3 risulta trascurabile a partire dai primi istanti dell'apertura della rottura e sino a circa 660 s, istante in corrispondenza al quale si presenta una piccola portata inversa tra il DW e EBT-B che inizia a svuotarsi. Tale fenomeno invece non si presenta nella configurazione SPES3_2013. Le oscillazioni della portata (SPLIT) nel lungo termine sono da ricondursi al funzionamento del sistema PCC.

Blowdown, depressurizzazione del RPV e pressurizzazione del contenimento

La fase di blowdown depressurizza il RPV, a causa del fatto che massa ed energia vengono trasferiti dal RPV al contenimento. L'andamento della pressione nel PRZ viene mostrata nella Fig. 6.79 e nella Fig. 6.80.

La depressurizzazione del RPV provoca l'aumento della pressione nel DW, vedi Fig. 6.82, Fig. 6.83, Fig. 6.84 e Fig. 6.84. L'intervento delle valvole di ADS (circa 69 s dopo l'apertura della rottura in SPES3 e 75 s in SPES3_2013), sia del primo che del secondo stadio, provoca un aumento della velocità di depressurizzazione del RPV e una contemporanea aumento della pressione nel DW che raggiunge il valore di picco (di circa 1.62 MPa) all'istante di circa 1880 s in ambedue le configurazioni.

L'intervento del sistema PCC, che rimuove energia dal contenimento, consente l'abbattimento della pressione nel DW che oscillerà quindi tra i valori di set-point fissati in 0.8 e 0.9 MPa, vedi Fig. 6.81 e Fig. 6.82. L'iniezione dell'acqua nel DW da parte del sistema PSS contribuisce ad abbassare la pressione nel DW per mezzo della condensazione del vapore.

Scarico di vapore nel PSS

Il fenomeno dell'aumento di pressione nel contenimento (sia nel DW che nel RC) provoca il trasferimento di una miscela di gas e vapore dal DW al PSS attraverso le linee di scarico del PSS, a partire da 4 s dopo l'apertura della rottura e fino all'intervento del PCC che provoca l'abbassamento della pressione nel DW (vedi Fig. 6.85 e Fig. 6.87 per SPES3, Fig. 6.86 e Fig. 6.88 per SPES3_2013).

In circa 200 s, quasi tutto il gas incondensabile è trasferito dal DW al PSS (vedi Fig. 6.89 e Fig. 6.91 per SPES3, Fig. 6.90 e Fig. 6.92 SPES3_2013).

Il vapore viene iniettato attraverso i distributori del PSS sotto il pelo libero dell'acqua e in conseguenza di ciò si assiste all'aumento della pressione sia nel PSS (vedi Fig. 6.93 e Fig. 6.94) che nel LGMS (vedi Fig. 6.95 e Fig. 6.96).

La temperatura dell'acqua del sistema PSS aumenta in conseguenza della massa di fluido che il sistema DW vi scarica, vedi Fig. 6.97 e Fig. 6.99 per SPES3 e Fig. 6.98 e Fig. 6.100 per la configurazione SPES3_2013. In ambedue le configurazioni si evidenzia che le temperature del liquido e del gas sono simili e che l'acqua nel sistema PSS non raggiunge mai le condizioni di saturazione.

S-Signal: spegnimento del reattore, isolamento dei secondari dei generatori di vapore fallimento dell'intervento EHRS-A and B

Il raggiungimento del valore di set-point della pressione nel contenimento ($1.7e5$ Pa), raggiunto a 6.77 s dopo l'apertura della rottura, invia l'S-signal.

Quest'ultimo comanda lo spegnimento del reattore e l'isolamento dei secondari dei generatori di vapore. Viene inoltre assunto che i sistemi EHRS-A e B falliscano il loro intervento.

La potenza residua rilasciata dal core insieme alla potenza asportata dai generatori di vapore viene mostrata in Fig. 6.101 e Fig. 6.103 per SPES3 e in Fig. 6.102 e Fig. 6.104 per SPES3_2013.

Le valvole MFIV e MSIV dei secondari dei generatori di vapore vengono chiuse in 5 s e come conseguenza, la portata di alimentazione del secondario si annulla (vedi Fig. 6.105 per SPES3 e Fig. 6.106 per SPES3_2013).

L'andamento della pressione nei secondari dei generatori di vapore viene mostrato in Fig. 6.107 per SPES3 e Fig. 6.108 per SPES3_2013. Dall'esame delle figure può notarsi come, dopo l'isolamento dei secondari, la loro pressione aumenti fino ad un valore di picco di circa 11.3 MPa in SPES3 e di circa 10.5 MPa in SPES3_2013, a causa del continuo trasferimento di calore dal lato primario e dell'evaporazione dell'acqua nei tubi del secondario. Quest'ultimo fenomeno comporta l'abbassarsi del livello di liquido dentro ai generatori di vapore, vedi Fig. 6.111 e Fig. 6.112.

Nel lungo termine il livello di liquido nei generatori di vapore decresce molto lentamente dal momento che la rimozione di calore dal primario avviene grazie all'intervento del PCC.

Coastdown delle pompe e innesco della circolazione naturale tra RI e DC

La Fig. 6.115 mostra il livello di liquido nel PRZ per ambedue le configurazioni della facility. In essa può notare una prima fase di diminuzione del livello, fino all'intervento delle valvole di ADS, dovuta alla perdita di massa del circuito primario attraverso la rottura. L'aumento del livello, che si evidenzia dopo l'intervento delle valvole di ADS, è imputabile all'intervento dei sistemi QT e DW in seguito all'intervento rispettivamente delle valvole di ADS del I e del II stadio. A causa della perdita di massa attraverso la rottura e le valvole di ADS, le pompe del primario rimangono scoperte (vedi Fig. 6.116). Vale la pena di sottolineare che in SPES3_2013 le pompe rimangono completamente scoperte in anticipo rispetto alla configurazione SPES3. Il coastdown delle pompe viene comandato dal segnale di basso livello nel PRZ con un ritardo di 15 s, successivamente alla totale scopertura delle pompe si assiste al blocco della circolazione naturale nel RPV attraverso le linee di bypass delle pompe. La portata del fluido primario attraverso il core viene mostrata nella Fig. 6.117 per SPES3 e nella Fig. 6.118 per SPES3_2013. La circolazione naturale permane fino a quando le valvole RI/DC risultano sotto battente. E' importante sottolineare che le portate associate alla circolazione naturale attraverso tali valvole (vedi Fig. 6.121 per SPES3 e Fig. 6.122 per SPES3_2013) risultano sensibilmente differenti: la portata in SPES3_2013 è sensibilmente inferiore rispetto alla configurazione originale della facility.

Nel lungo termine, quando il livello del liquido nel RPV è ristabilito, si ripresenta il fenomeno della circolazione naturale sulla base dell'asportazione di calore dal primario affidata al PCC (vedi Fig. 6.123 per SPES3 e Fig. 6.124 per SPES3_2013).

Segnale LM: attuazione del primo stadio delle valvole ADS, attuazione del secondo stadio delle valvole ADS e del sistema EBT. Mancato intervento del sistema EHRS-C. Intervento del sistema PCC

Il segnale di mitigazione delle conseguenze del LOCA (LM-signal) viene inviato quando la pressione nel PRZ raggiunge il valore di set-point pari a 11.72 MPa (vedi Fig. 6.79).

Sulla base del segnale LM dovrebbe intervenire il sistema EHRS-C, nella simulazione del presente transitorio viene invece assunto che esso fallisca l'intervento.

Come conseguenza di ciò e con un ritardo di 1800 s viene fatto intervenire il sistema PCC. Tale ritardo viene assunto come tempo necessario per consentire il riempimento delle "containment refuelling cavity", considerata come pozzo termico per il sistema PCC.

Il fallimento di tutti i sistemi EHRS consente la classificazione dell'incidente ipotizzato come "beyond design accident" e fa sì che le conseguenti procedure d'emergenza richiedano l'intervento contemporaneo sia delle valvole ADS di primo e secondo stadio, sia delle valvole d'attuazione del sistema EBT.

Tutte le valvole ADS sono attuate contemporaneamente e la loro apertura totale avviene in 10 s.

La massa di fluido scaricata dal I stadio delle valvole ADS viene mostrata nella Fig. 6.125 per SPES3 e nella Fig. 6.126 per la configurazione SPES3_2013, mentre la massa di fluido scaricata dal II stadio delle valvole ADS viene mostrata nella Fig. 6.131 per SPES3 e nella Fig. 6.132 per SPES3_2013 (il valore negativo di quest'ultima variabile è da imputare alla direzione della giunzione fissata nel modello).

Il picco di portata è da correlare alla frazione di liquido presente all'uscita delle ADS, quando il livello di liquido nel PRZ diminuisce all'apertura delle valvole di ADS (vedi Fig. 6.130 per SPES3, Fig. 6.135 per SPES3_2013, e Fig. 6.116 per ambedue le configurazioni dell'impianto).

Il segnale LM comanda l'apertura delle valvole d'intercettazione del sistema EBT che vengono completamente aperte in 15 s. La portata iniettata da tali sistemi è mostrata in Fig. 6.137. Il sistema EBT-B (loop affetto dalla rottura) inietta il fluido dentro al RPV attraverso le DVI, solo quando la pressione nel RPV è sufficientemente bassa da risultare prossima a quella del contenimento. L'inventario di massa dei sistemi EBT è mostrato in Fig. 6.138 mentre il livello di liquido viene mostrato in Fig. 6.139.

Nella configurazione SPES3 il sistema EBT-A è completamente vuoto in 3690 s, mentre il sistema EBT-B è vuoto in 2680 s. Nella configurazione SPES3_2013 tali eventi sono anticipati.

Poco dopo l'intervento dei sistemi EBT, inizia la circolazione del liquido dal RPV verso l'EBT-A (loop intatto) attraverso la balance line e permane fino a quando la connessione tra il RPV e tale balance line non risulta scoperta. A partire da tale istante, nella parte alta dell'EBT-A, il vapore prende il posto del liquido (vedi Fig. 6.140 e Fig. 6.142 per SPES3, Fig. 6.141 e Fig. 6.143 per SPES3_2013). La circolazione attraverso la balance line del loop danneggiato inizia invece immediatamente dopo l'apertura della rottura con la portata di fluido richiamata dal contenimento attraverso la SPLIT line. Nell'istante in cui inizia l'iniezione di fluido da parte del sistema EBT-B attraverso le linee DVI, il vapore proveniente dal DW prende il posto del liquido dentro le tanche (vedi Fig. 6.140 e Fig. 6.142 per SPES3, Fig. 6.141 e Fig. 6.143 per la configurazione SPES3_2013).

Condizioni di saturazione dentro al RPV

La fase di violenta depressurizzazione e di perdita di massa attraverso la rottura causa, rapidamente, un fenomeno di flash nel circuito primario e una diminuzione della frazione di liquido all'uscita del core in circa 84 s (138 e Fig. 6.146 per SPES3, e Fig. 6.145 e Fig. 6.147 per SPES3_2013). La frazione di liquido rimane compresa tra 0.7 (nella parte alta del core) e 0.4 (nella parte bassa), fin tanto che il sistema PCC entra in funzione e, grazie alla depressurizzazione del DW, consente la circolazione di fluido tra il PSS e il DW e tra il RC e il RPV attraverso le linee di DVI. La frazione di liquido ritorna a valori superiori, e in modo definitivo, dopo l'entrata in funzione in condizioni di regime del sistema PCC. La temperatura del fluido in ingresso e in uscita dal core viene mostrata in Fig. 6.148 e Fig. 6.149.

La temperatura del canale di potenza viene mostrata nella Fig. 6.150 per SPES3 e in Fig. 6.151 e Fig. 6.152 per SPES3_2013.

Dall'analisi di tali figure può evidenziarsi che, mentre nella configurazione originale della facility non si presenta nessuna escursione di temperatura nel canale di potenza, nella nuova configurazione si presenta invece una sensibile escursione di temperatura. Tale fenomeno è imputabile ad una serie di differenze fondamentali tra la vecchia e la nuova configurazione: l'inventario di massa presente in condizioni nominali nel circuito primario delle due configurazioni è differente (vedi Fig. 6.153), le perdite di carico del primario, il coast-down delle pompe, la portata in circolazione naturale attraverso le valvole tra RI e DC sono anche queste sensibilmente differenti tra loro (Fig. 6.121 per SPES3 e Fig. 6.122 per SPES3_2013).

Messa in servizio del sistema PCC

Il picco di pressione di 1.63 MPa si verifica al tempo $t = 1870$ s in SPES3 mentre non si verifica in SPES3_2013, vedi Fig. 6.81. La pressione all'interno del contenimento decresce rapidamente grazie all'intervento del sistema PCC (sulla base di un ritardo di 1800 s rispetto al segnale LM insieme con il raggiungimento della pressione di set point nel DW, pari a 0.9 MPa). Successivamente, la pressione nel contenimento in accoppiamento alla pressione nel sistema primario, si mantiene compresa tra 0.8 MPa e 0.9 MPa in accordo con la logica di funzionamento del sistema PCC (Fig. 6.81, Fig. 6.83 e Fig. 6.84). La portata scaricata attraverso la hot leg del primario dentro al sistema PCC viene mostrata in Fig. 6.154. Il serbatoio del sistema PCC ha il compito di condensare il vapore al suo ingresso, funzionando quindi da pozzo termico e il livello di liquido al suo interno viene mantenuto al valore di set-point (0.7 m) grazie ad un controllo di tipo proporzionale-integrale che comanda l'iniezione di acqua fredda al suo interno tramite l'intervento di un sistema ausiliario Fig. 6.155. La temperatura del fluido in ingresso e in uscita dal PCC viene mostrata in Fig. 6.156 per SPES3 e in Fig. 6.157 per SPES3_2013. L'acqua entra leggermente sottoraffreddata ed esce leggermente surriscaldata con una frazione di liquido pari a 0.2 (Fig. 6.158 in SPES3 e Fig. 6.159 in SPES3_2013). La potenza rimossa dal sistema è riportata nella Fig. 6.162 e Fig. 6.163.

Segnale di basso DP tra RPV e contenimento, flusso di acqua tra PSS e DW, RC flooding; intervento valvole intercettazione DVI e LGMS, DVI e RC, flusso inverso tra contenimento e RPV

Il segnale di basso DP tra RPV e il contenimento (set-point di 50 kPa) è raggiunto al tempo 658 s. La combinazione tra esso e il segnale LM comanda l'attuazione dei sistemi LGMS e apre le valvole di intercettazione presenti sulla linea che collega RC alla linea della DVI. Tali valvole così come quelle di isolamento delle LGMS vengono aperte con un ritardo di 2 s. L'iniezione del liquido presente nel sistema LGMS dentro le linee DVI è dovuto sia alla

pressurizzazione del gas incondensabile presente nel DW in seguito alla fase di blowdown che all'effetto gravitazionale. Tale iniezione inizia a circa 1300 s quando la pressione nel sistema LGMS risulta superiore alla pressione del primario. La portata di fluido iniettata da LGMS viene riportata in Fig. 6.164 per SPES3 e in Fig. 6.165 per SPES3_2013. La diminuzione della portata, che si osserva a circa 2700 s, è da mettere in relazione con il raggiungimento dello stesso valore di pressione esistente nel DW. A partire da tale istante il motore dell'iniezione è la sola forza di gravità. L'inventario di massa presente in LGMS è riportato in Fig. 6.166, mentre il livello di liquido è riportato in Fig. 6.167. L'iniezione del fluido dentro l'RPV attraverso le DVI da parte del sistema LGMS avviene quando la pressione nelle DVI risulta inferiore rispetto a quella del sistema LGMS, compatibilmente con il funzionamento del sistema PCC, ciò spiega quindi le oscillazioni presenti nella portata iniettata, Fig. 6.164, Fig. 6.165 e Fig. 6.163.

Portata dal PSS al DW, RC flooding, inversione di portata dal contenimento al RPV

La fase di depressurizzazione del contenimento dovuta all'intervento del sistema PCC, fa sì che la pressione nel DW risulti inferiore rispetto a quella del sistema PSS (vedi Fig. 6.168 e Fig. 6.170 per SPES3, Fig. 6.169 e Fig. 6.171 per SPES3_2013) Quando la pressione differenziale tra i due è sufficiente a vincere la pressione idrostatica della colonna di acqua, l'acqua viene spinta dentro al DW fino al completo svuotamento della PSS. L'iniezione di liquido dal PSS al DW inizia a 1980 s, vedi Fig. 6.85 e Fig. 6.87 per SPES3, Fig. 6.86 e Fig. 6.88 per SPES3_2013 (vedi inoltre il livello del liquido dentro i pipes vent del PSS Fig. 6.172 e Fig. 6.173). Dopo circa 2740 s, il PSS e il DW presentano valori di pressione coincidenti, l'andamento delle quali segue le oscillazioni determinate dal sistema PCC (Fig. 6.170 e Fig. 6.171). Il livello di liquido dentro al PSS è mostrato in Fig. 6.174 e in Fig. 6.175, mentre l'inventario di massa è riportato in Fig. 6.176.

Grazie all'intervento del sistema PCC si ha continua estrazione e reintegro di massa dentro al RPV. Quando la pressione nel DW è più alta rispetto a quella nel RPV, del vapore viene spinto dal DW al PSS con conseguente leggero aumento del livello di liquido nel PSS Fig. 6.174 e Fig. 6.175. Il lento ma continuo ciclico trasferimento di massa dal DW al PSS, porta all'immagazzinamento dell'acqua nei serbatoi, facendo sì che tale quantità non risulti disponibile per essere iniettata nel RPV. Ciò potrebbe rappresentare un punto di debolezza qualora la quantità di acqua al di sopra del core risulti piccola.

Il livello di liquido nel RC cresce, inizialmente a causa dell'apertura della rottura e della portata richiamata dalle valvole ADS, e successivamente aumenta rapidamente grazie alla portata che fluisce dal PSS al DW fino al suo completo riempimento che avviene a circa 2690 s (livello pari a 11m) Fig. 6.177.

A 3740 s, il livello del liquido dentro al RC raggiunge l'elevazione delle DVI e il fluido viene richiamato indietro fluendo quindi dal RC al RPV attraversando le valvole di intercettazione presenti sulle DVI e aperte all'istante $t = 658$ s, il passaggio della portata è consentito fino a quando la pressione nel RPV rimane inferiore a quella del contenimento Fig. 6.178 e Fig. 6.179.

Dopo che il RC è completamente pieno di acqua, il livello di liquido e l'inventario di massa del DW continuano ad aumentare seguendo un andamento a gradini corrispondenti alle condizioni operazionali del PCC, Fig. 6.182 e Fig. 6.183. Tra 50000 e 63000 s il livello di liquido nel DW subisce un decremento che si verifica in corrispondenza all'innesco della circolazione naturale tra DW e RC, che sembra imputabile alla scelta del nodding del DW Fig. 6.184 Fig. 6.185.

Il sistema QT, inizialmente vuoto, viene parzialmente riempito dalla portata scaricata dalle valvole ADS, Fig. 6.186 e Fig. 6.187. Intorno a 39000 s l'acqua trasferita al QT dal DW fa aumentare il livello di liquido e l'inventario di massa, riempiendolo fino a circa 75000 s Fig. 6.186 e Fig. 6.187.

6.5.2 Risultati del transitorio di rottura della linea EBT (180)

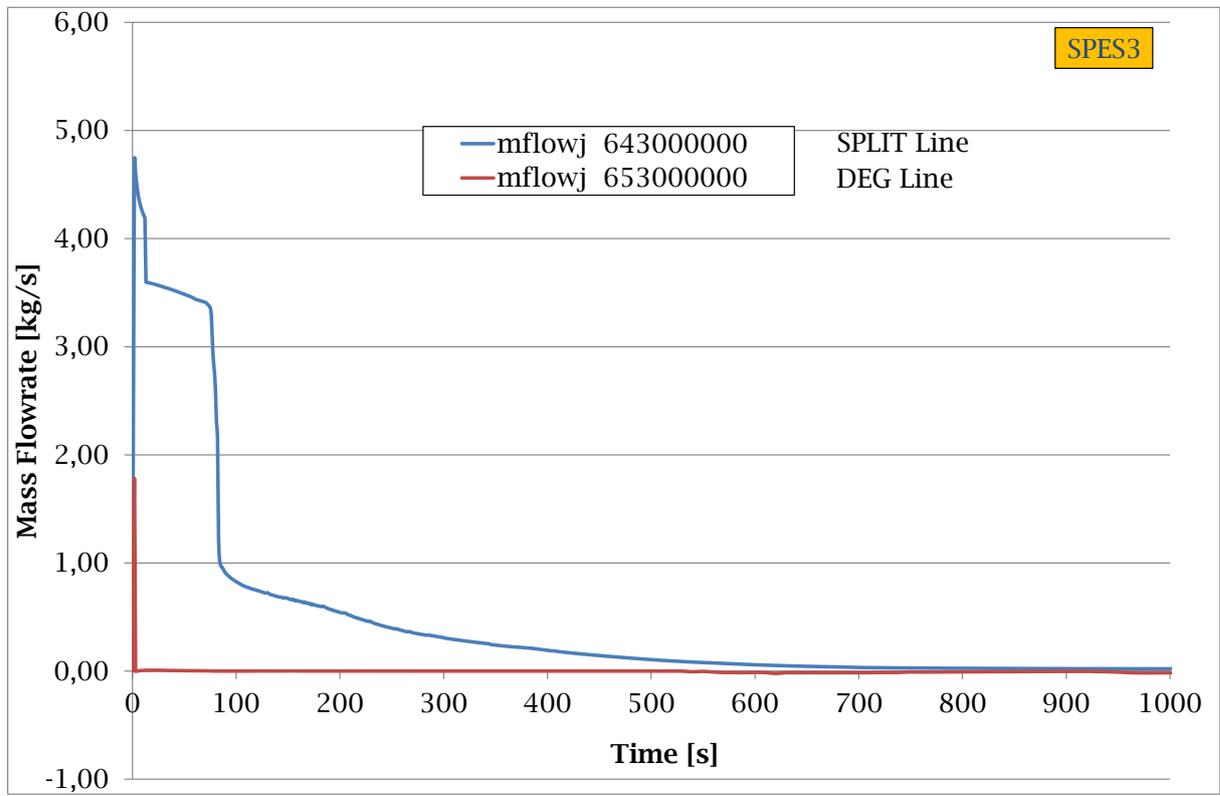


Fig. 6.73 – Portata attraverso la rottura in SPES3 (part.).

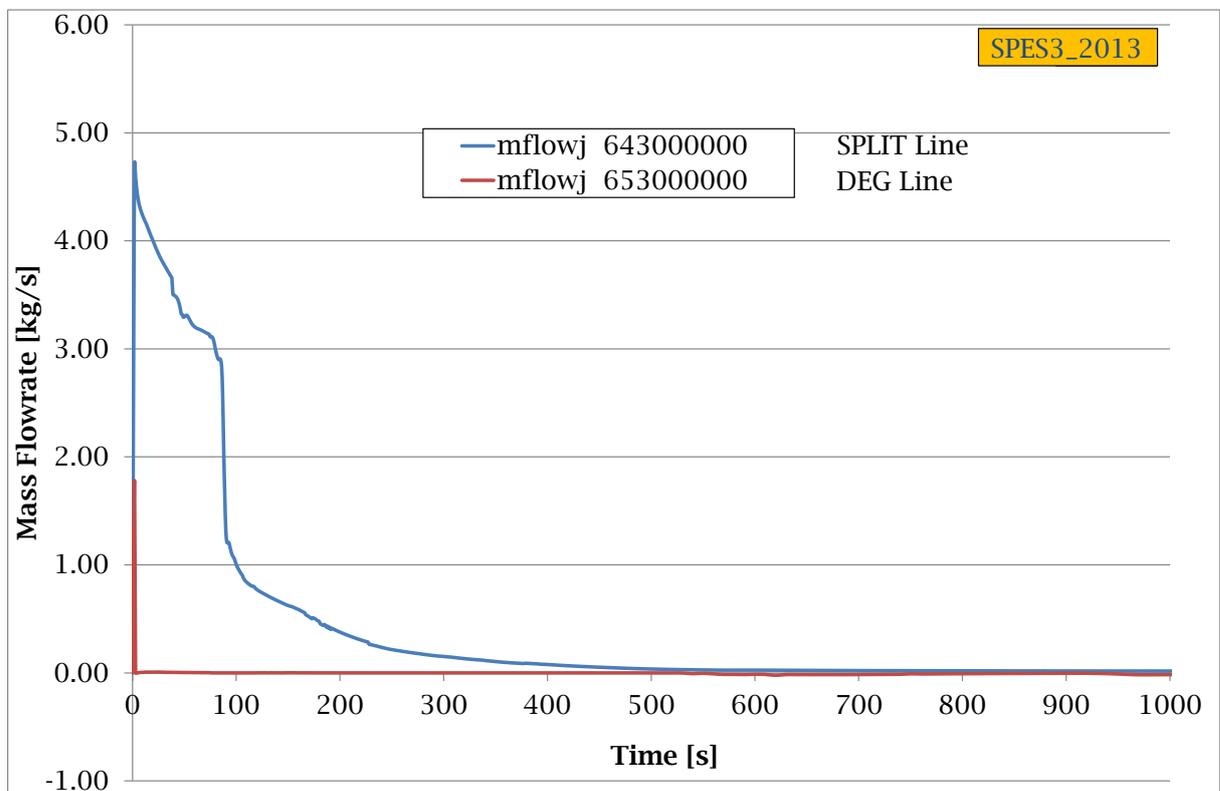


Fig. 6.74 – Portata attraverso la rottura in SPES3_2013 (part.).

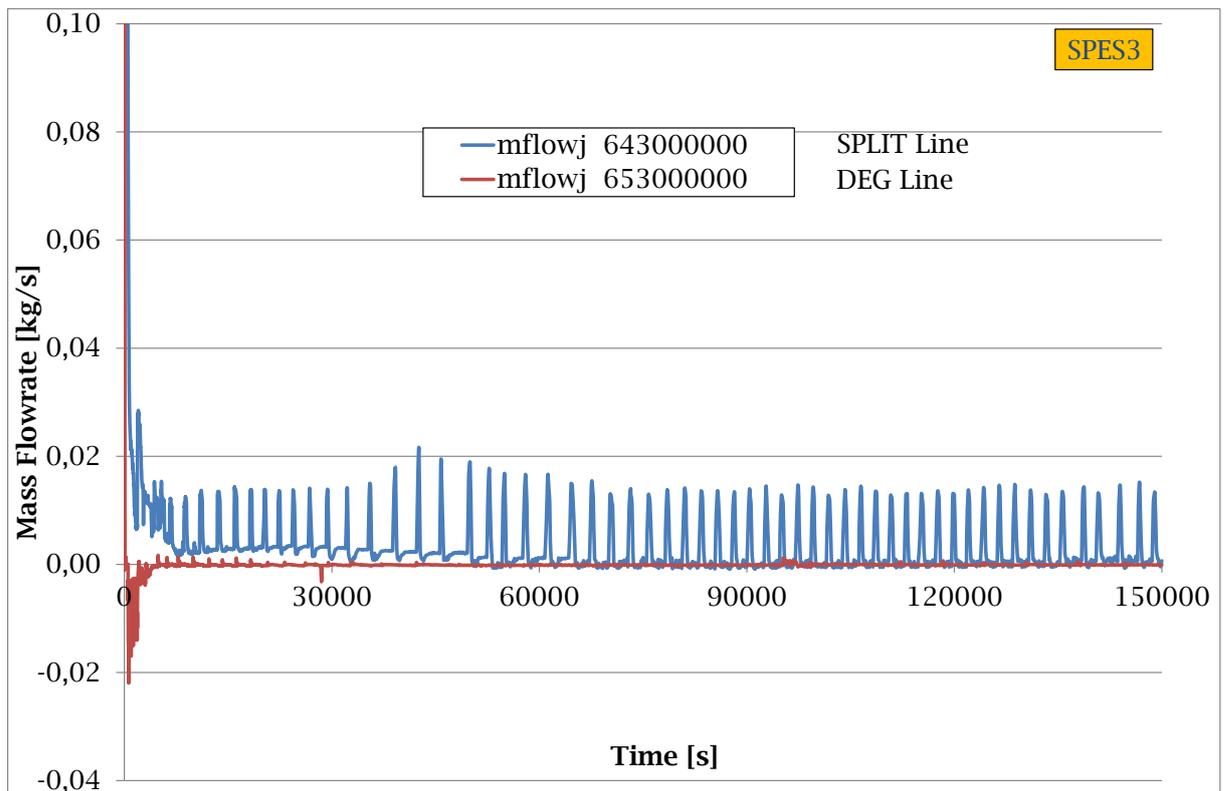


Fig. 6.75 – Portata attraverso la rottura in SPES3.

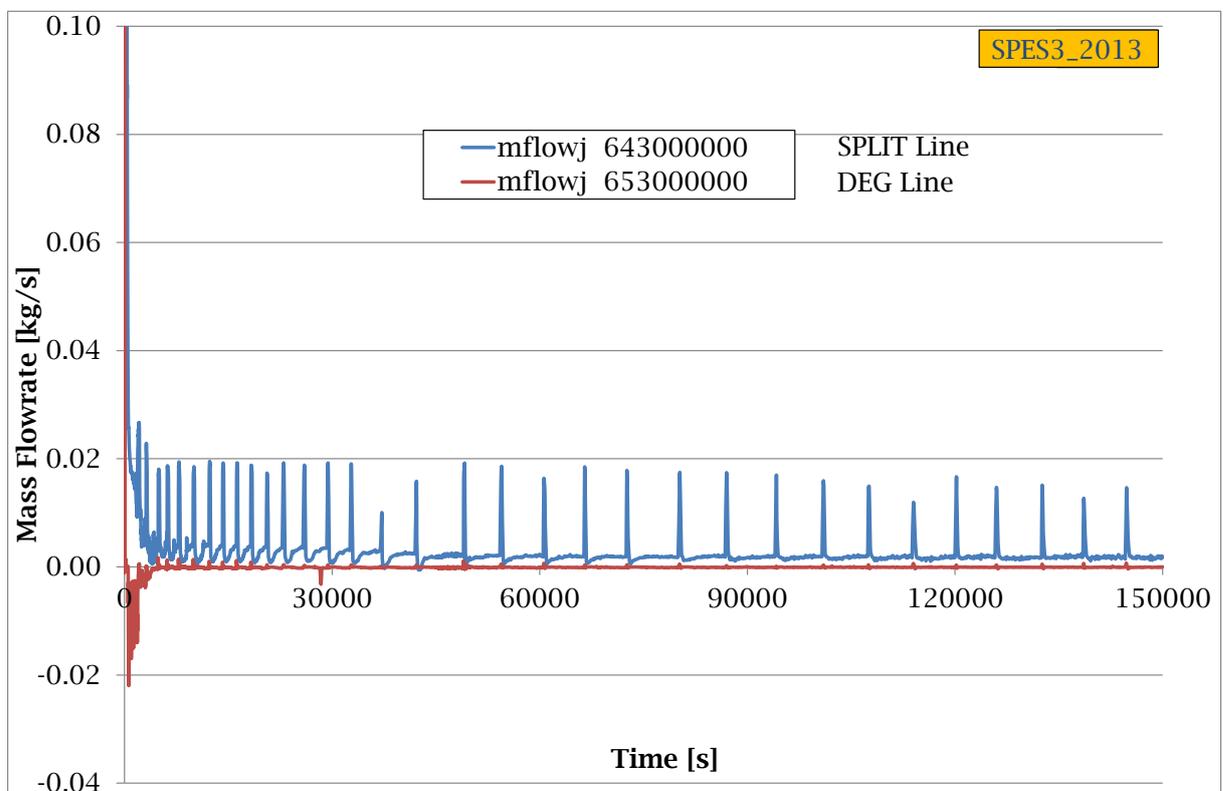


Fig. 6.76 – Portata attraverso la rottura in SPES3_2013.

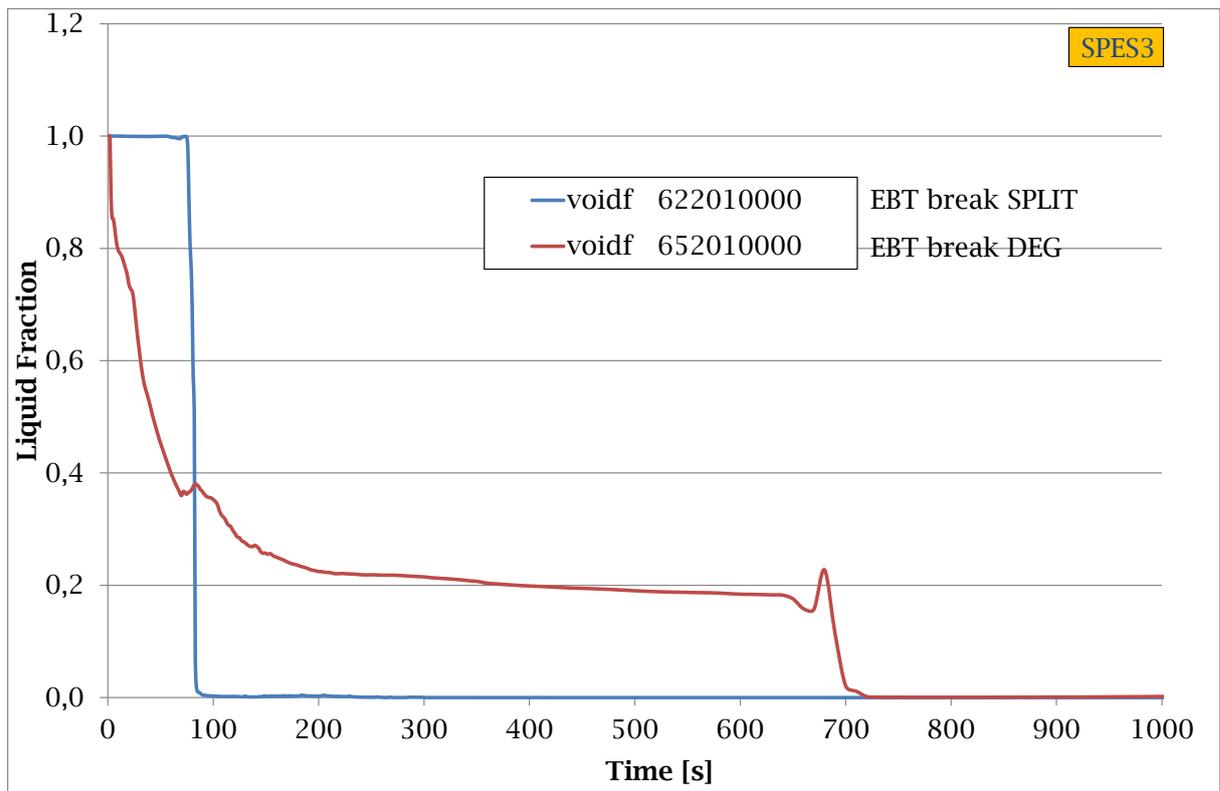


Fig. 6.77 – Frazione di liquido della miscela all’uscita della rottura in SPES3.

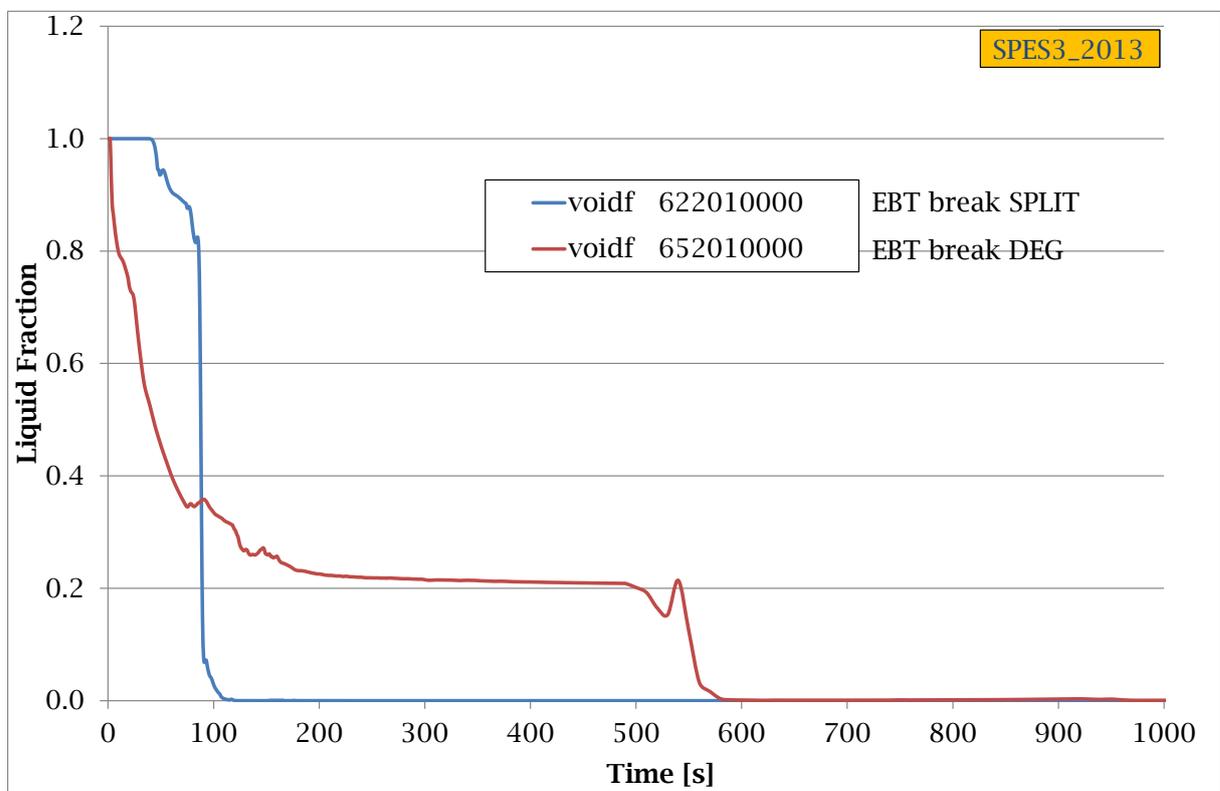


Fig. 6.78 – Frazione di liquido della miscela all’uscita della rottura in SPES3_2013 .

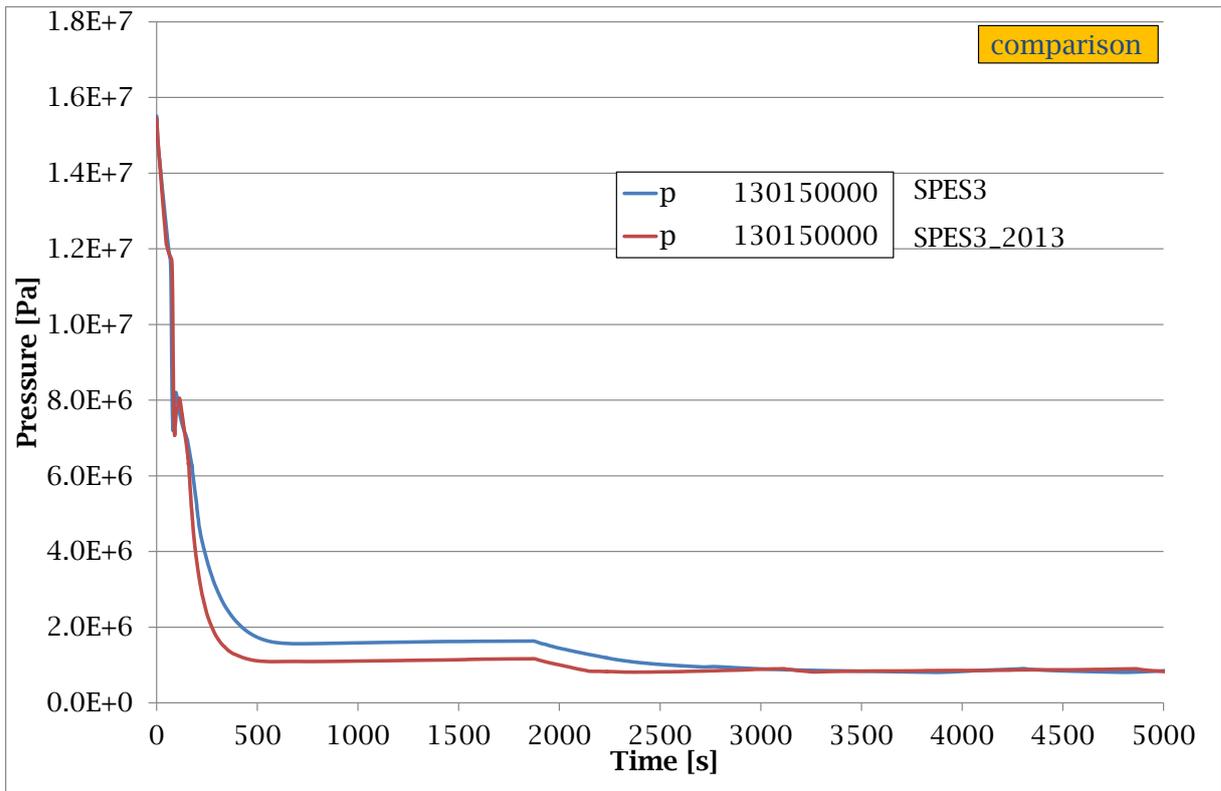


Fig. 6.79 – Pressione nel PRZ (part.).

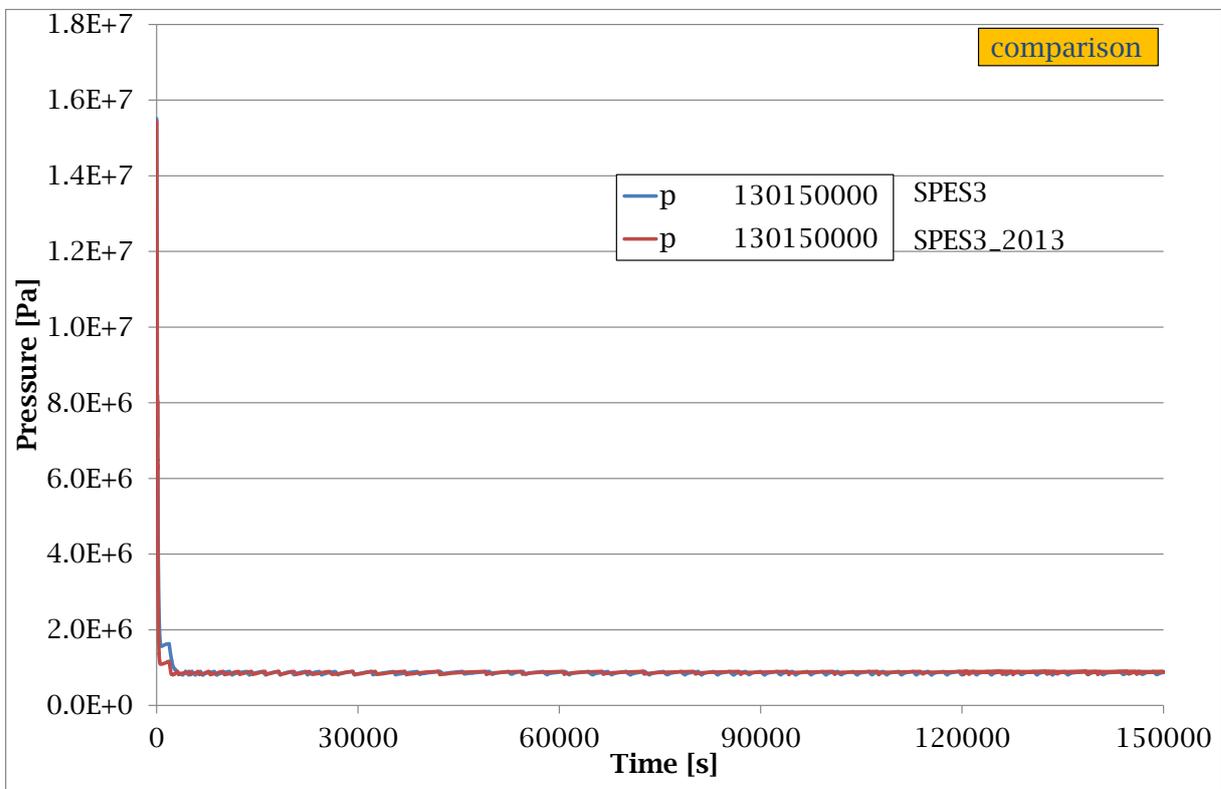


Fig. 6.80 – Pressione nel PRZ.

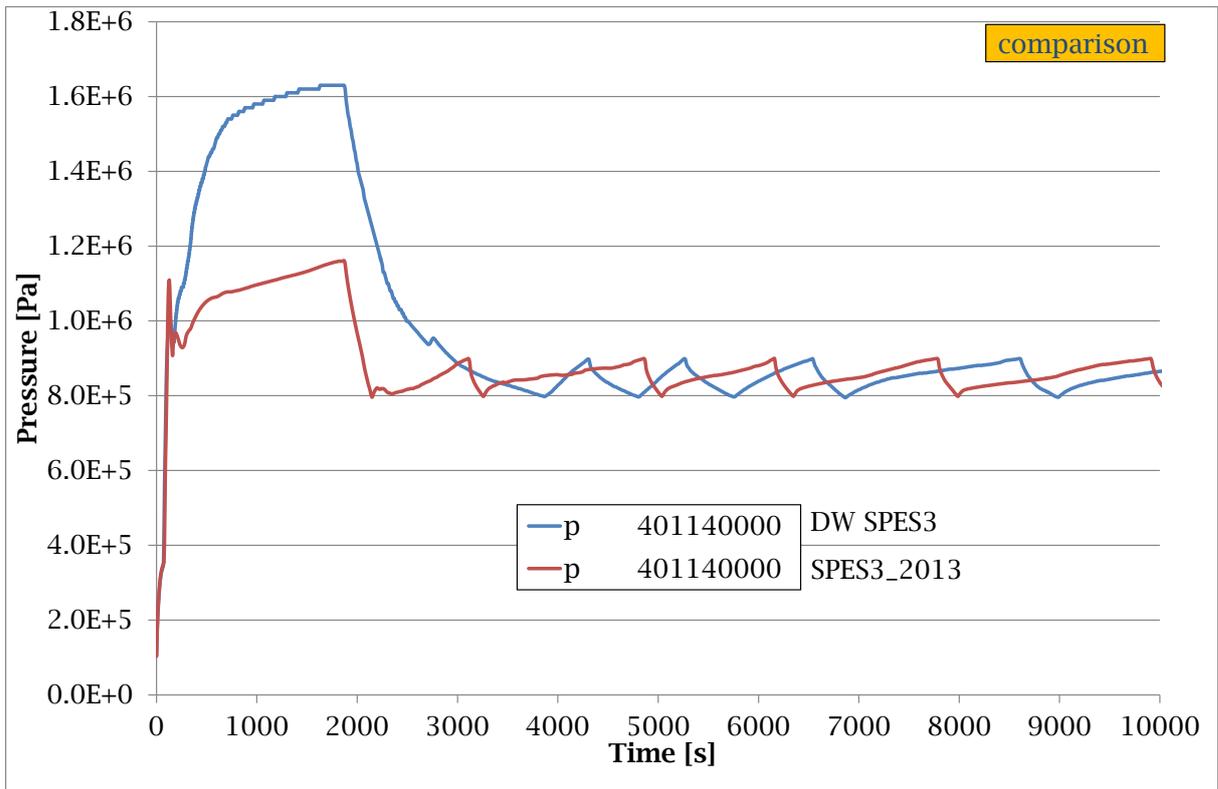


Fig. 6.81 – Pressione nel DW (part.).

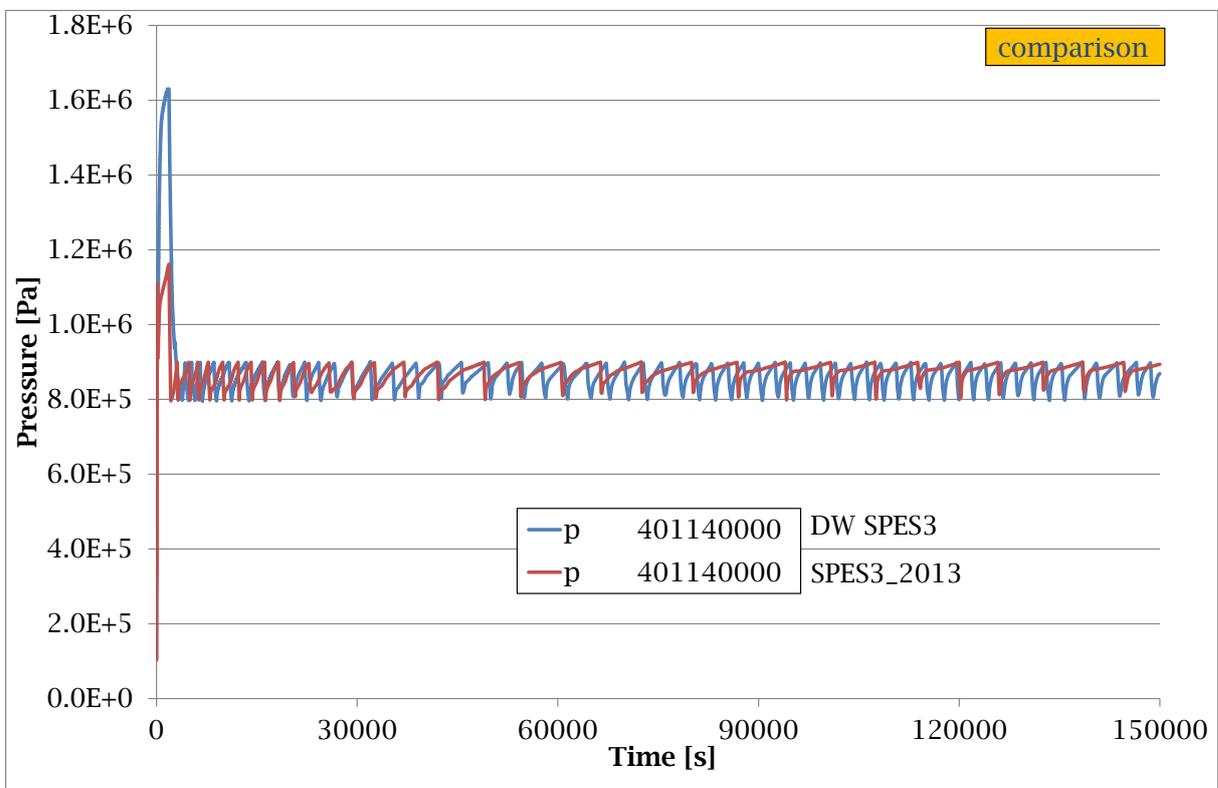


Fig. 6.82 – Pressione nel DW.

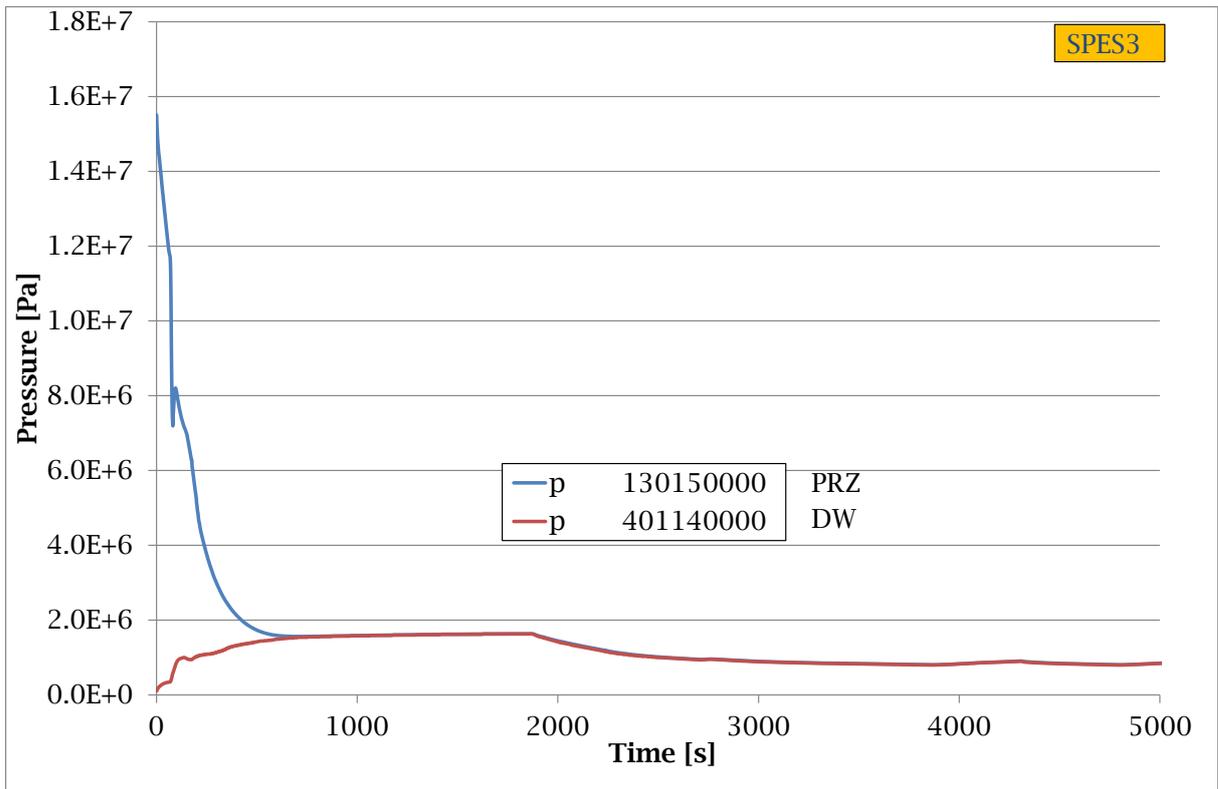


Fig. 6.83 – Pressione nel PRZ e nel DW in SPES3.

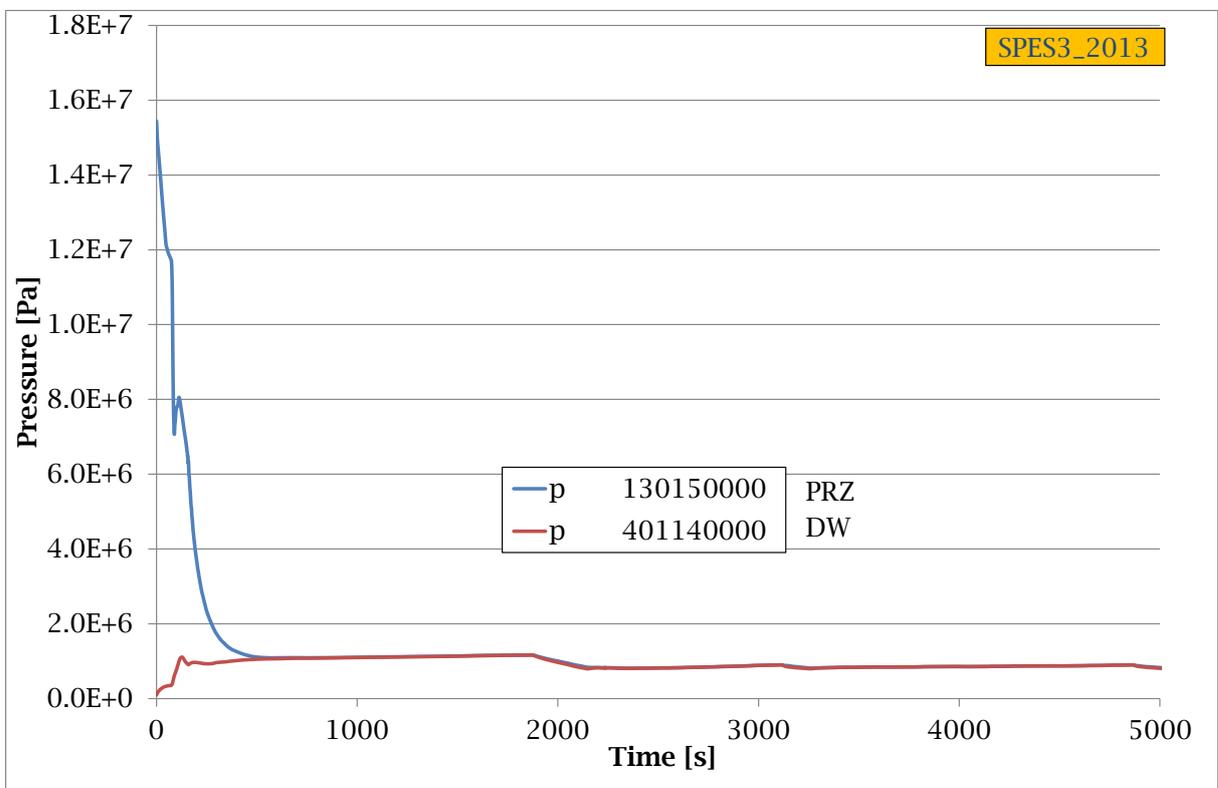


Fig. 6.84 – Pressione nel PRZ e nel DW in SPES3_2013.

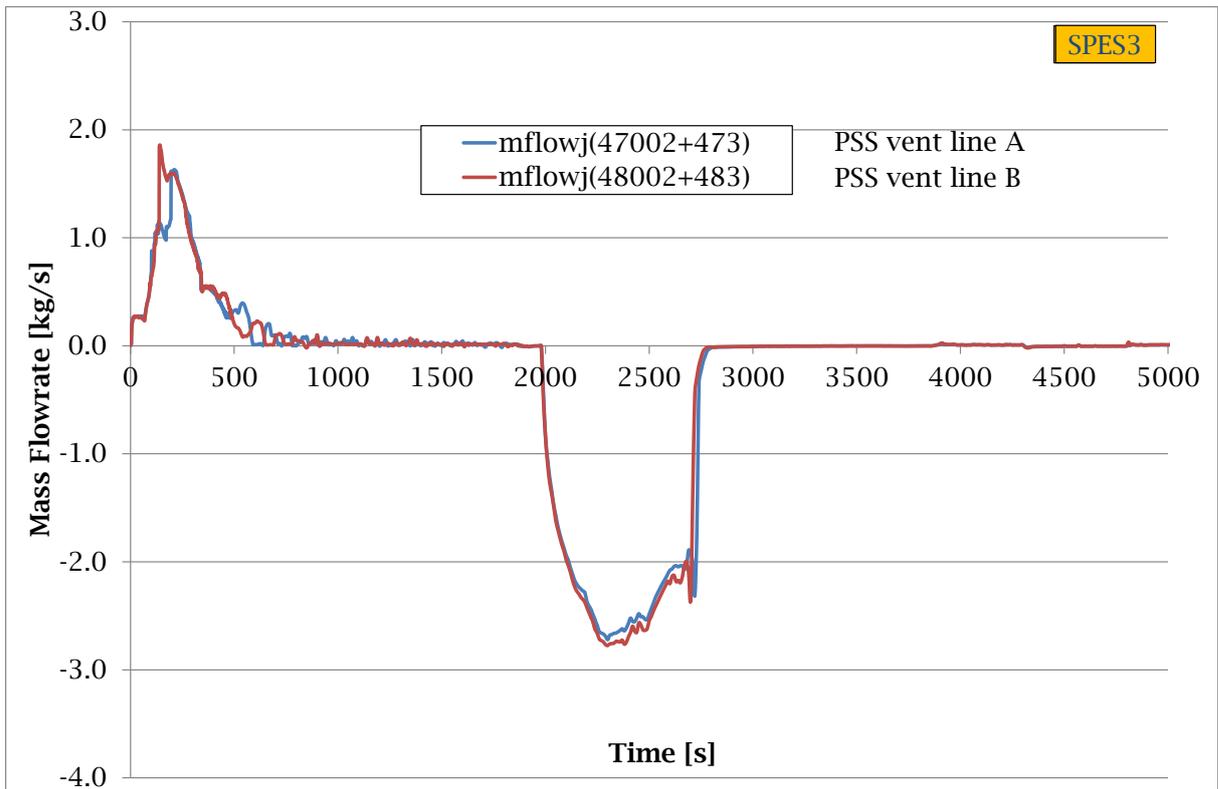


Fig. 6.85 – Portata attraverso la “vent line” A e B del PPS in SPES3 (part.).

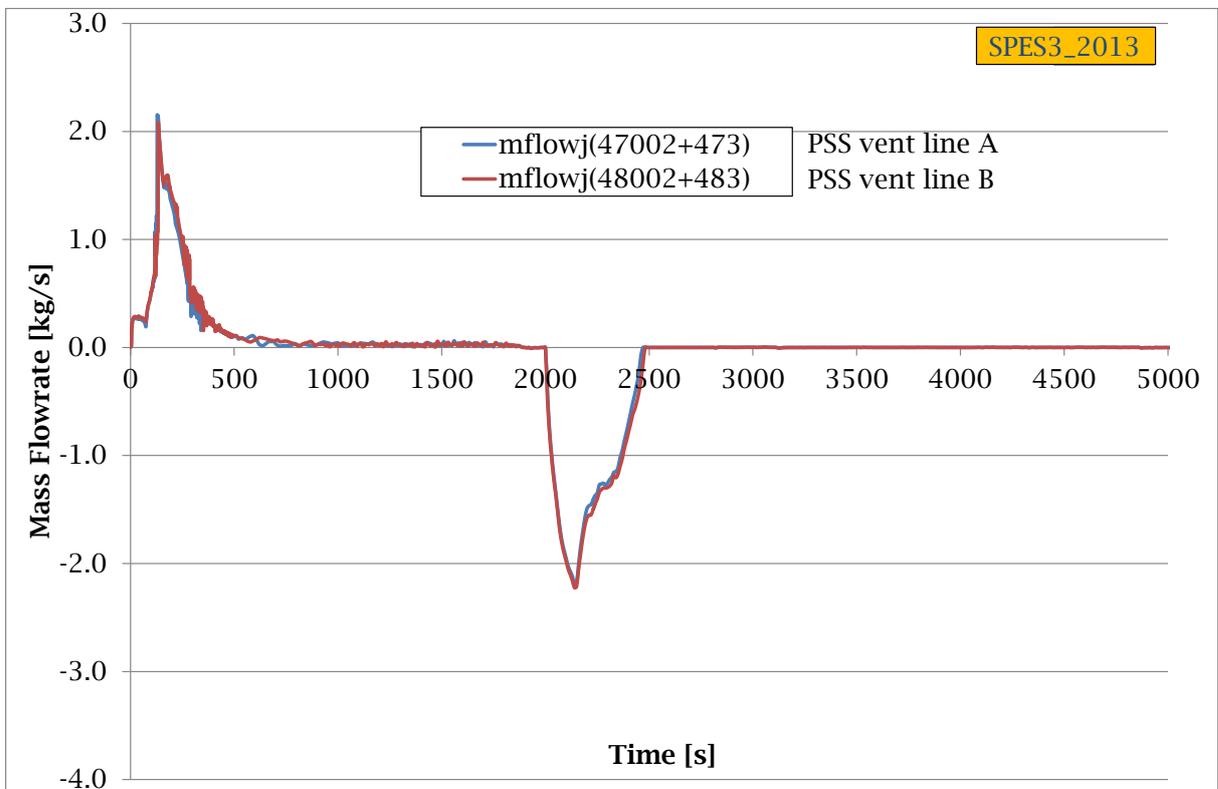


Fig. 6.86 – Portata attraverso la “vent line” A e B del PPS in SPES3_2013 (part.).

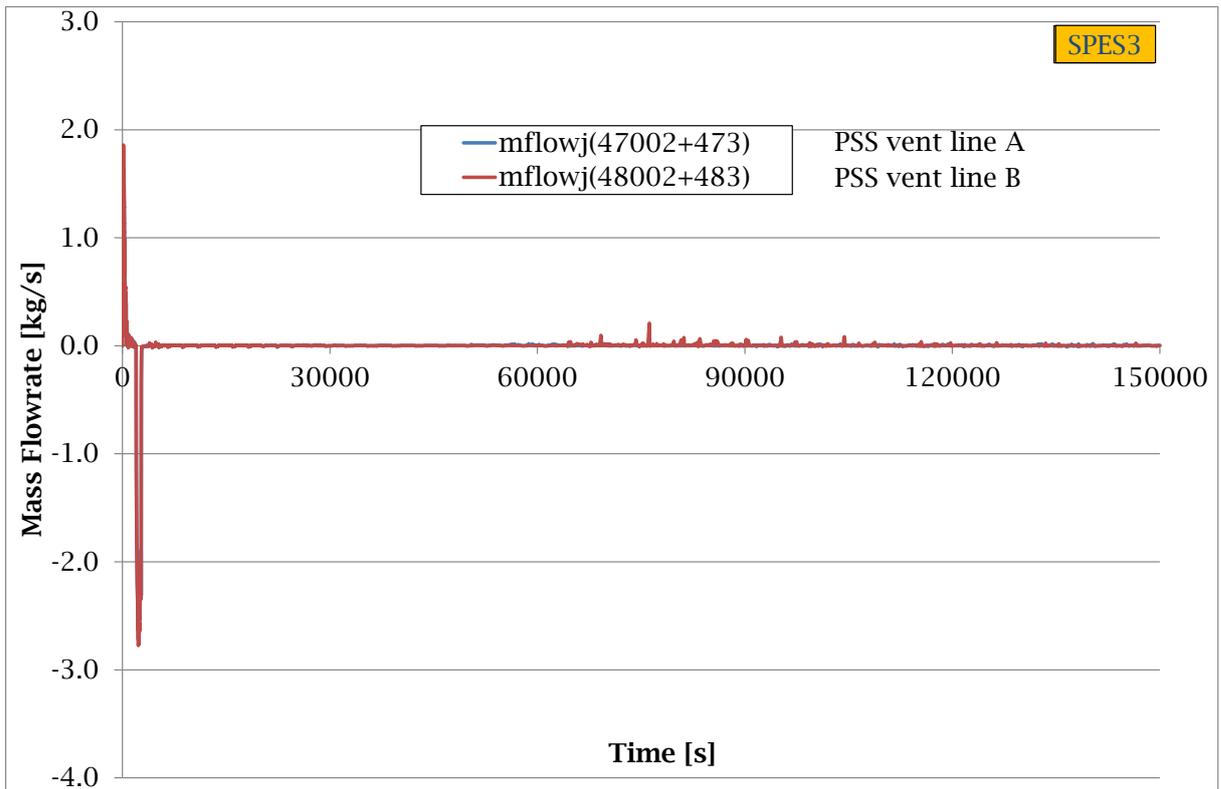


Fig. 6.87 – Portata attraverso la “vent line” A e B del PPS in SPES3.

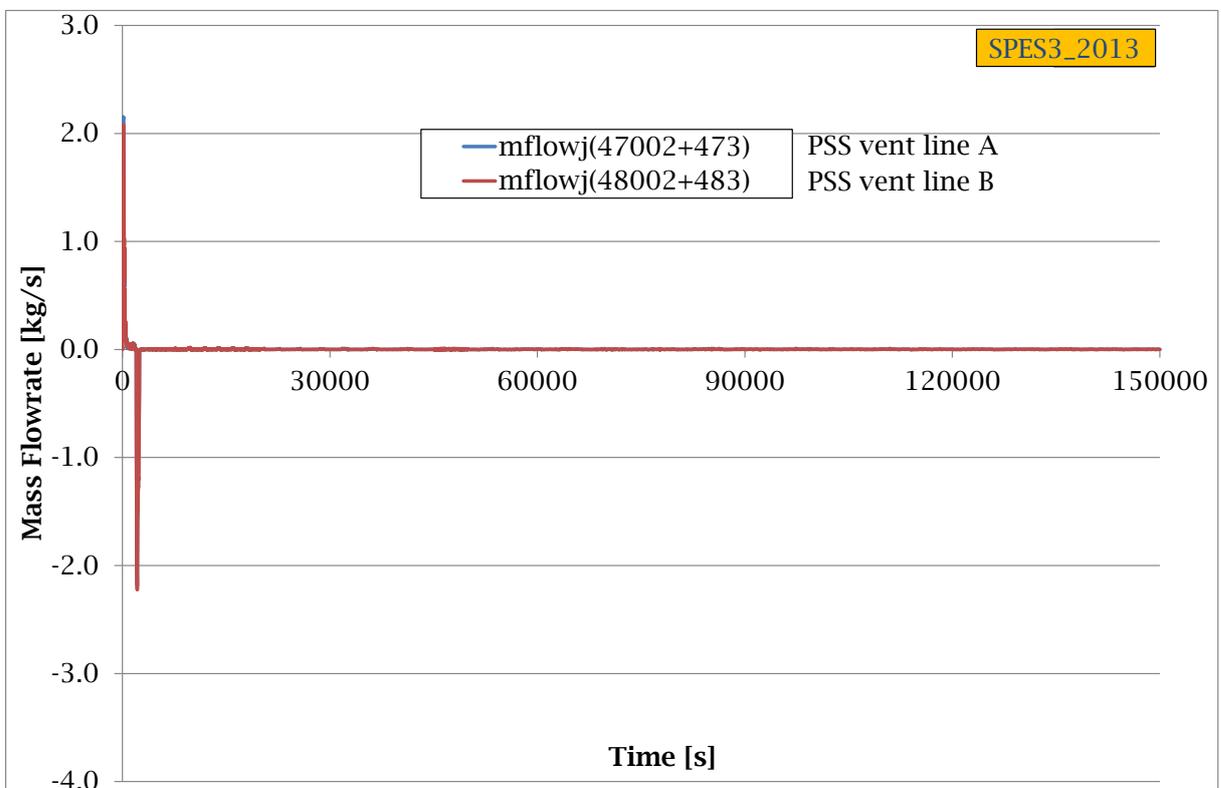


Fig. 6.88 – Portata attraverso la “vent line” A e B del PPS in SPES3_2013.

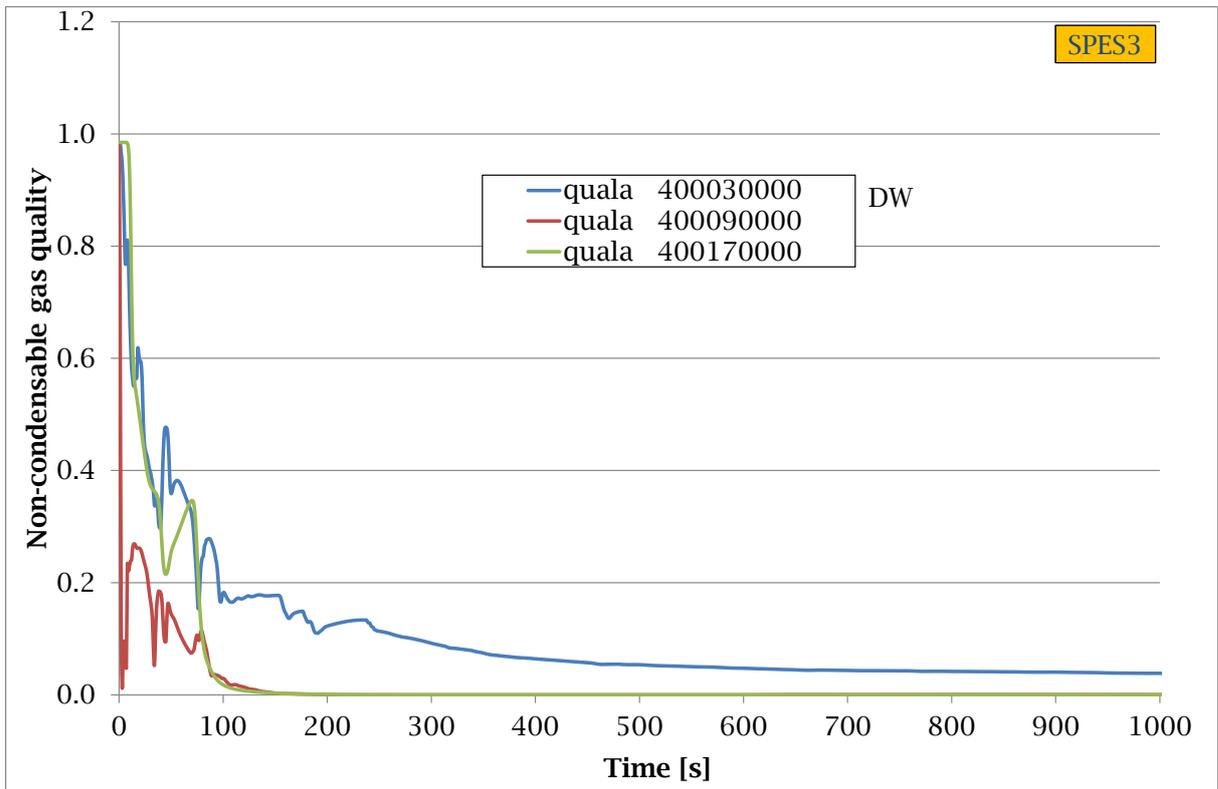


Fig. 6.89 – Quality della miscela in uscita dal DW in SPES3 (part.).

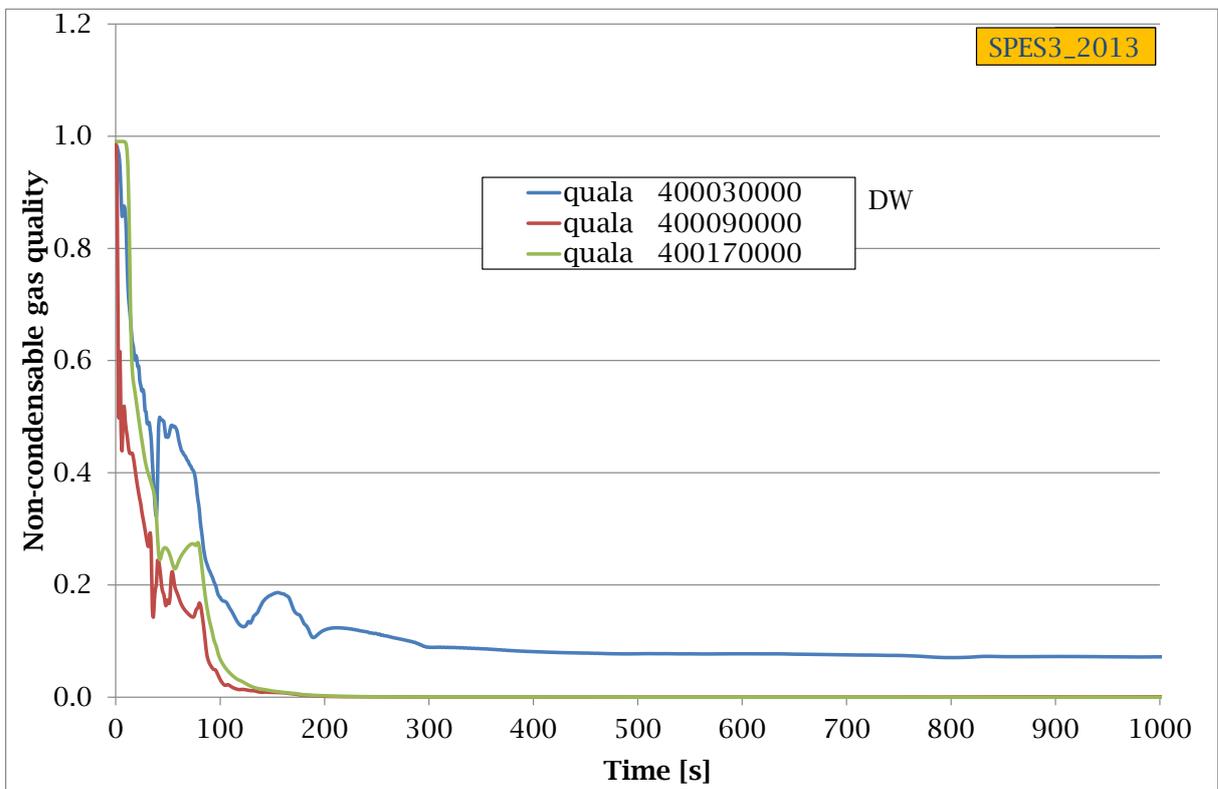


Fig. 6.90 – Quality della miscela in uscita dal DW in SPES3_2013 (part.).

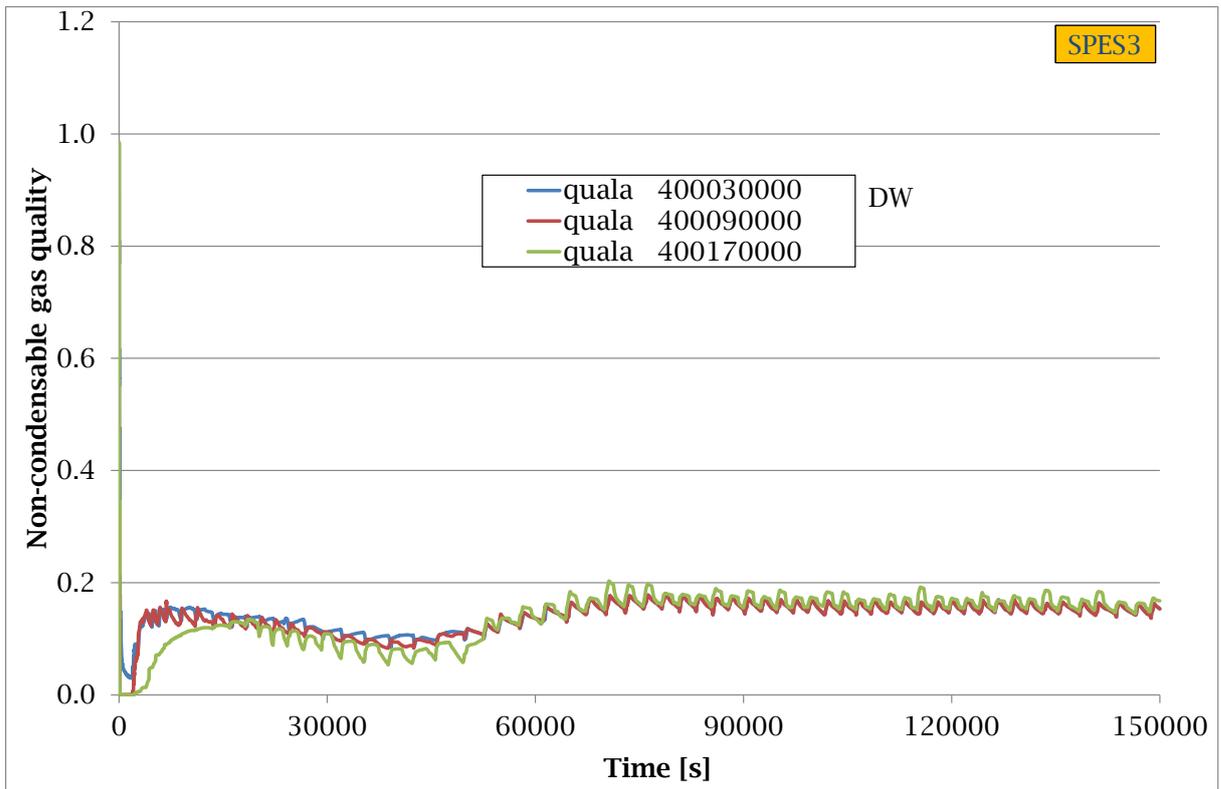


Fig. 6.91 – Quality della miscela in uscita dal DW in SPES3.

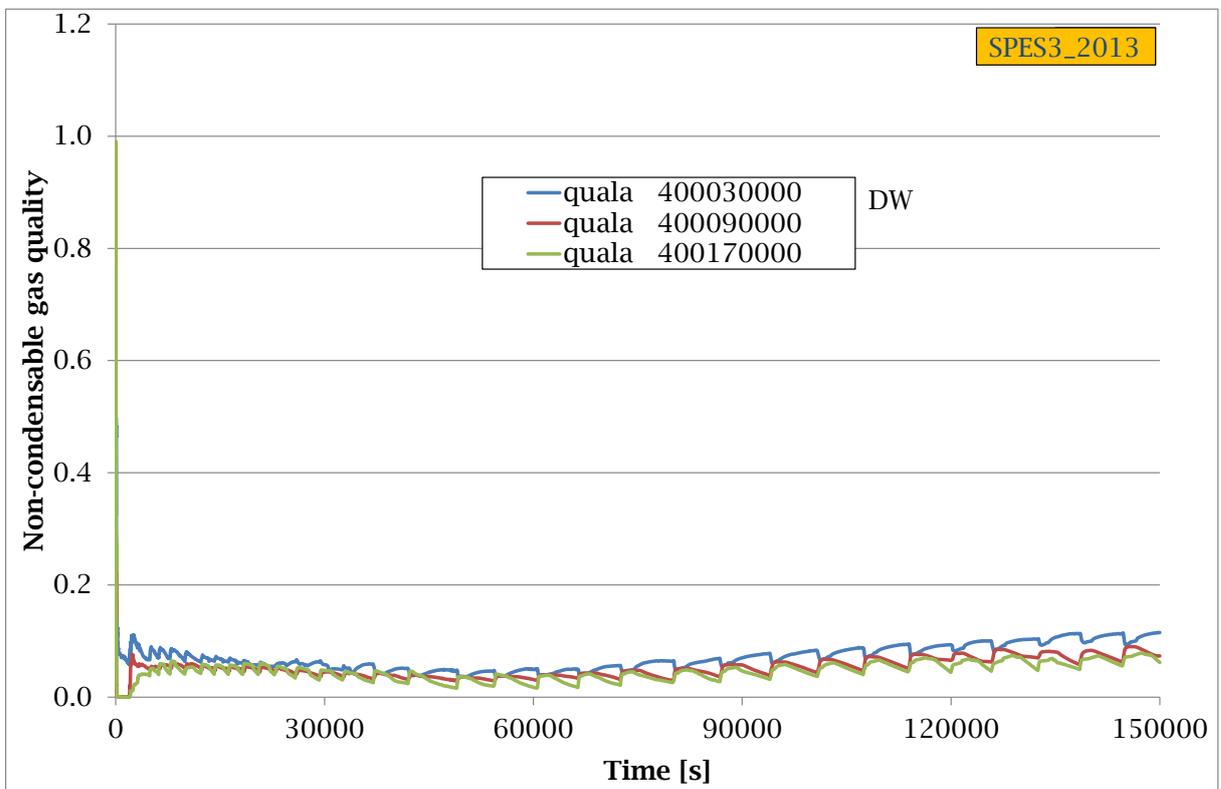


Fig. 6.92 – Quality della miscela in uscita dal DW in SPES3 (part.).

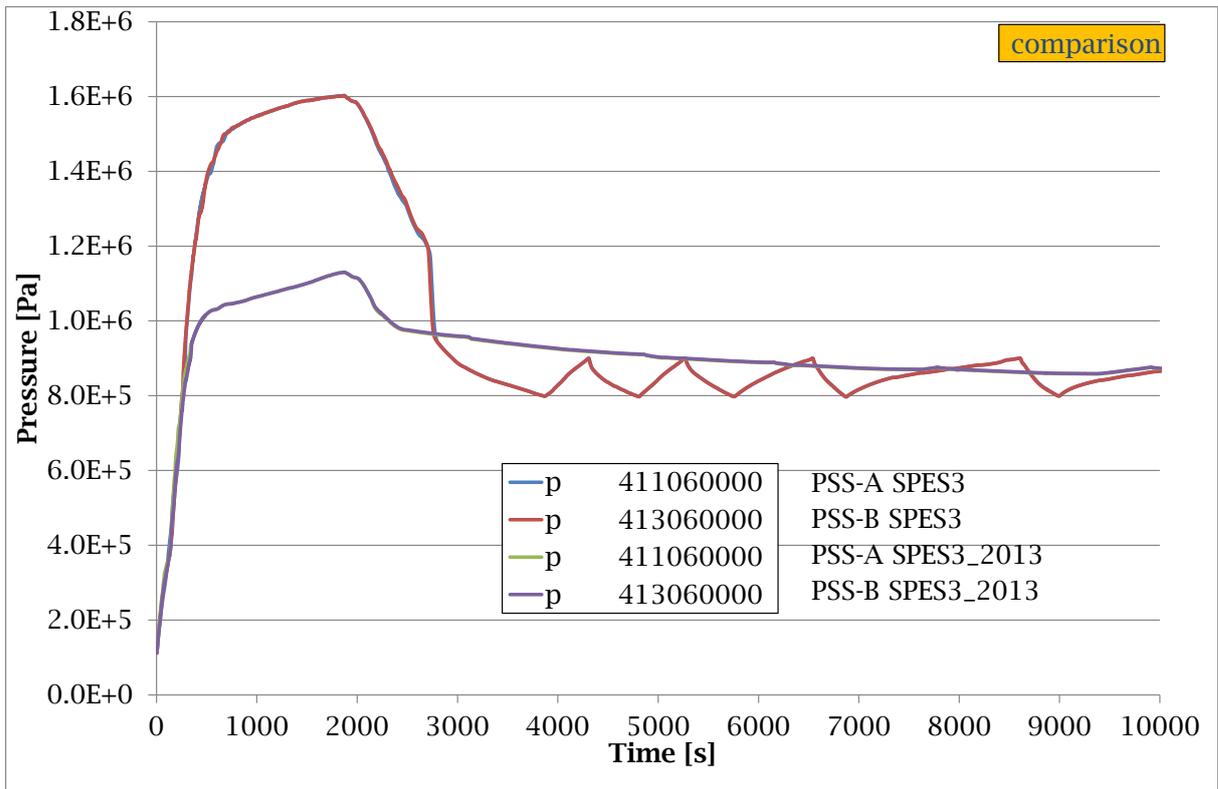


Fig. 6.93 – Pressione nel sistema PSS A e B (part.).

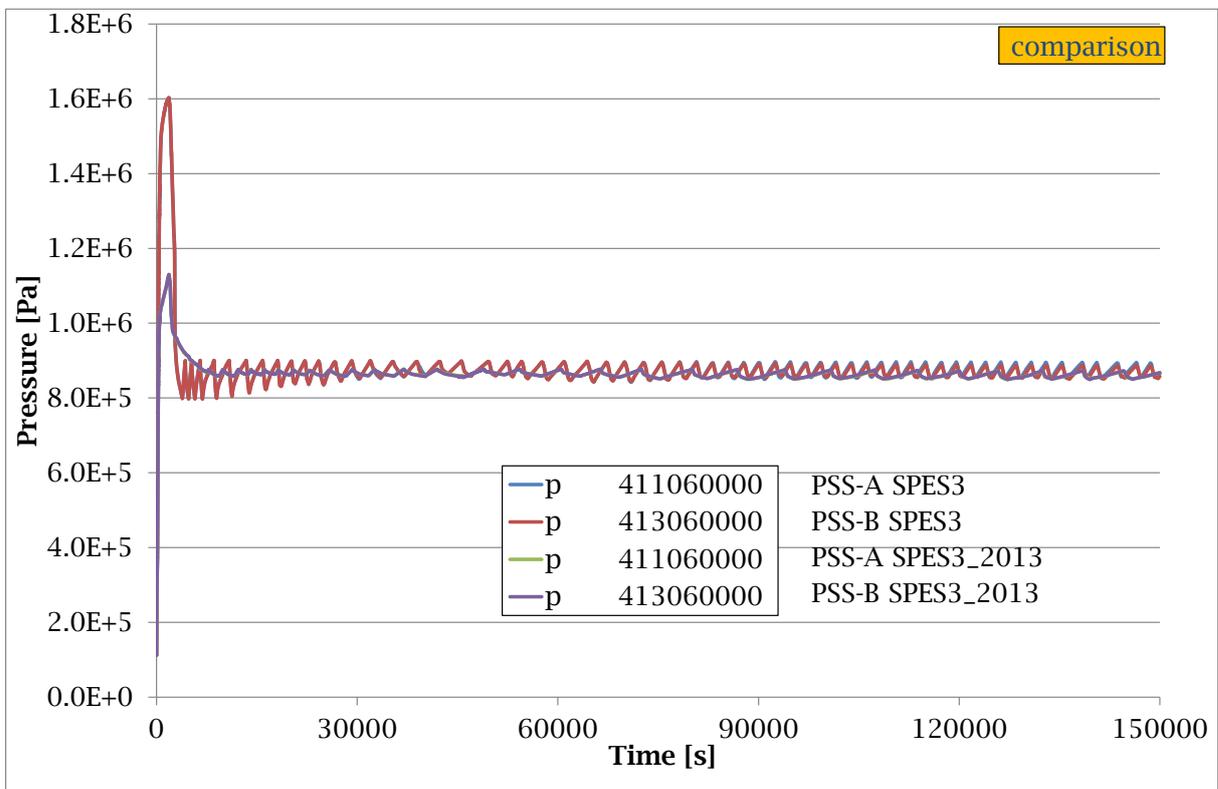


Fig. 6.94 – Pressione nel sistema PSS A e B.

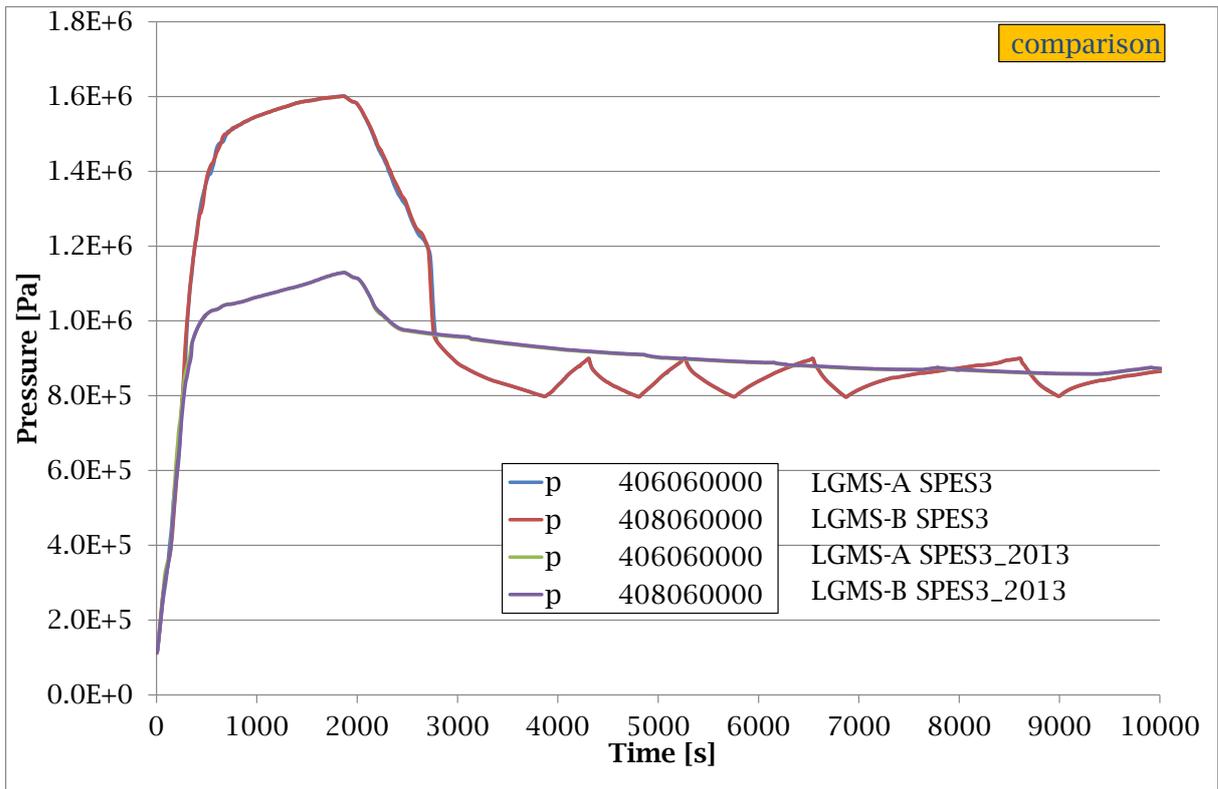


Fig. 6.95 – Pressione nel sistema LGMS PSS A e B (part.).

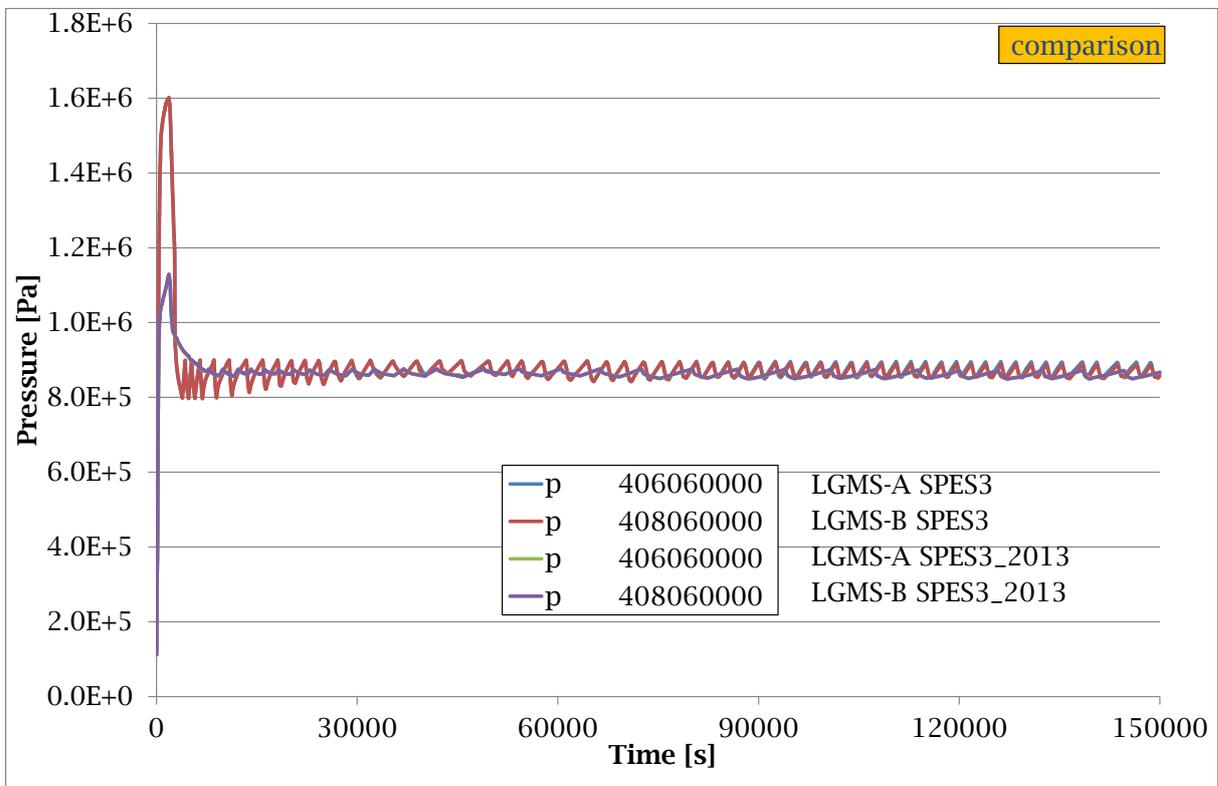


Fig. 6.96 – Pressione nel sistema LGMS PSS A e B.

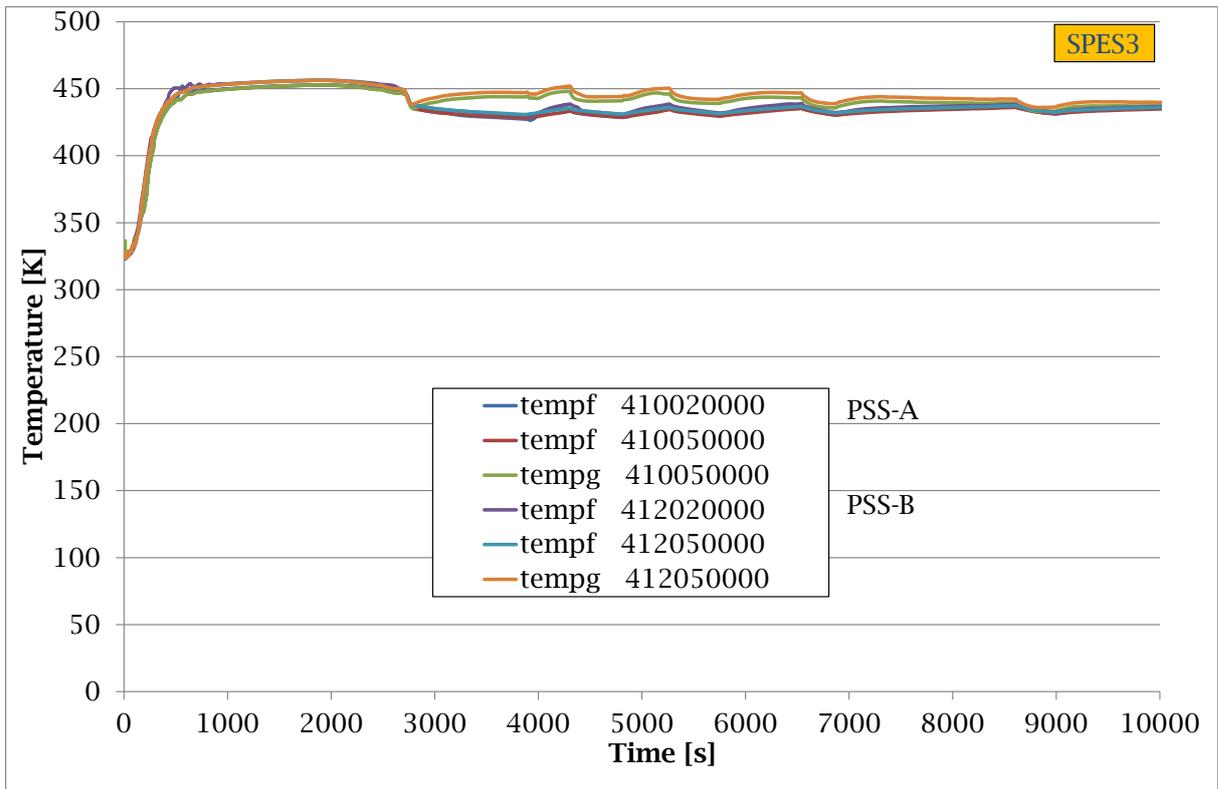


Fig. 6.97 – Temperatura del fluido del sistema PSS A e B in SPES3 (part.).

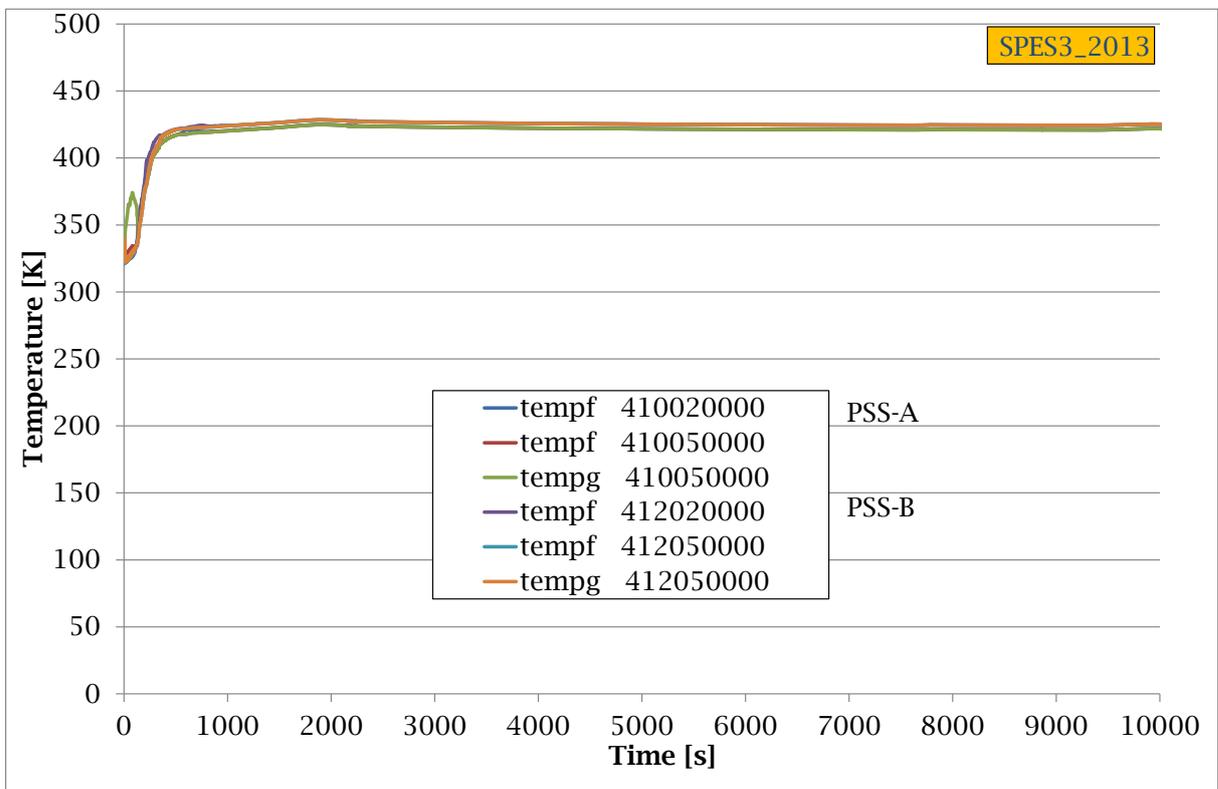


Fig. 6.98 – Temperatura del fluido del sistema PSS A e B in SPES3_2013 (part.).

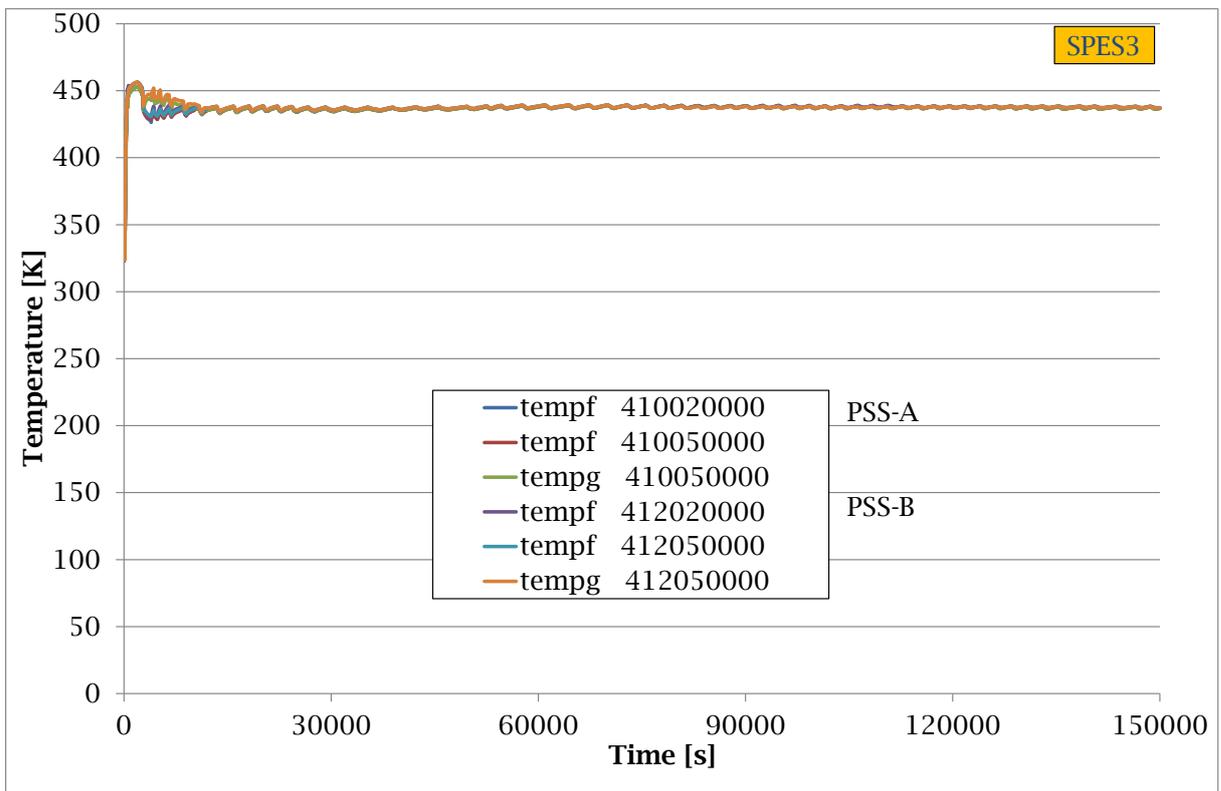


Fig. 6.99 – Temperatura del fluido del sistema PSS A e B in SPES3.

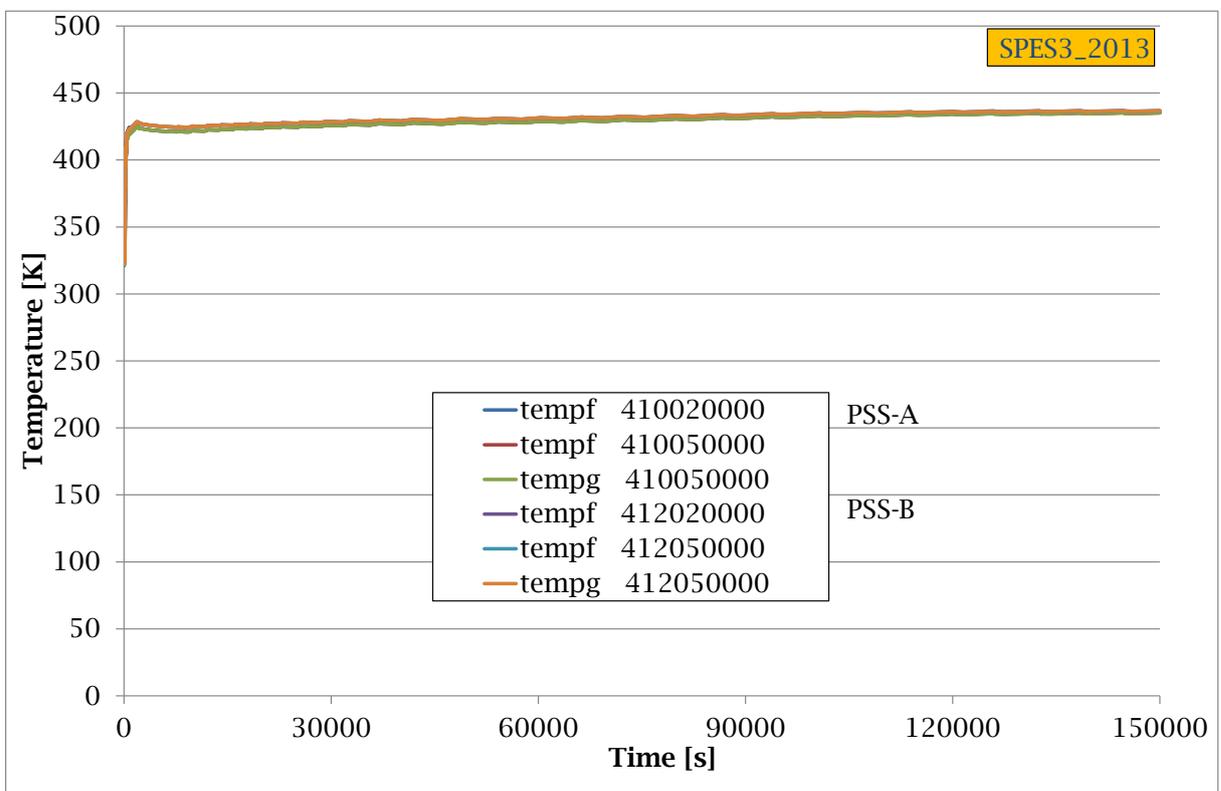


Fig. 6.100 – Temperatura del fluido del sistema PSS A e B in SPES3_2013.

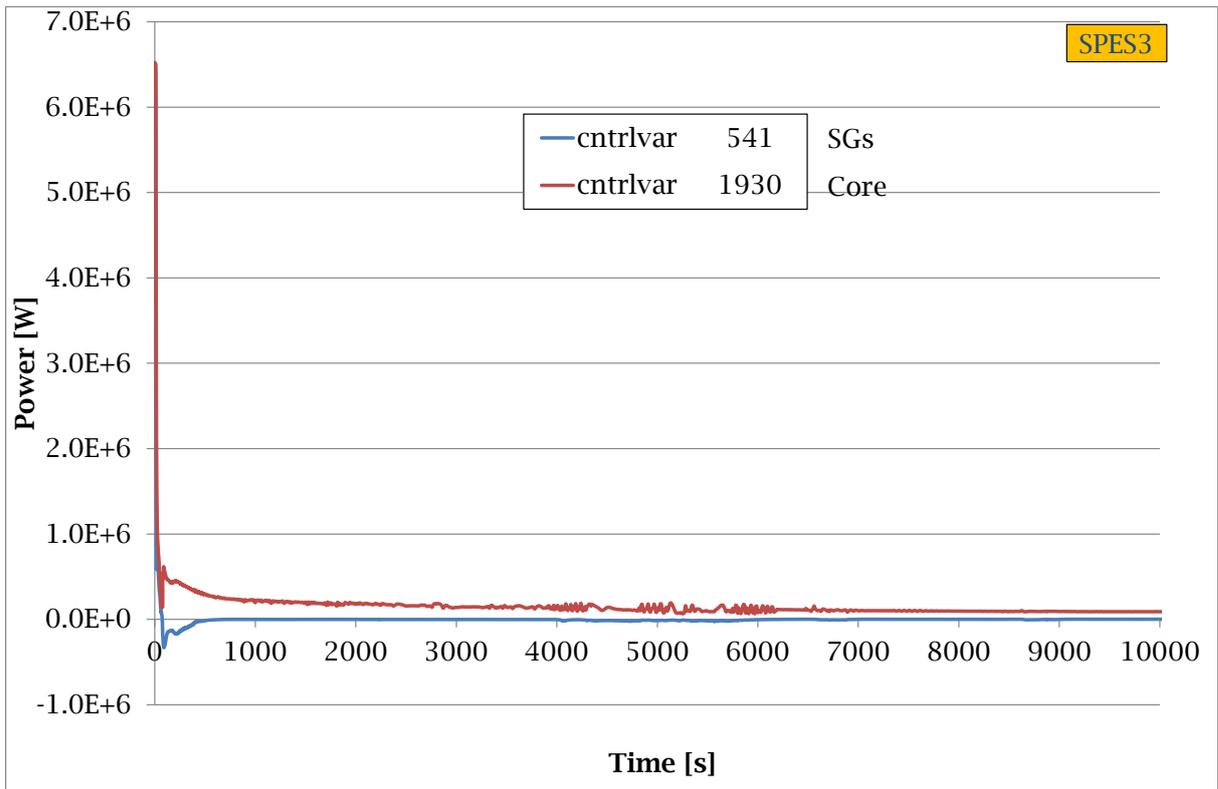


Fig. 6.101 – Potenza prodotta dal core e asportata dagli SGs in SPES3 (part.).

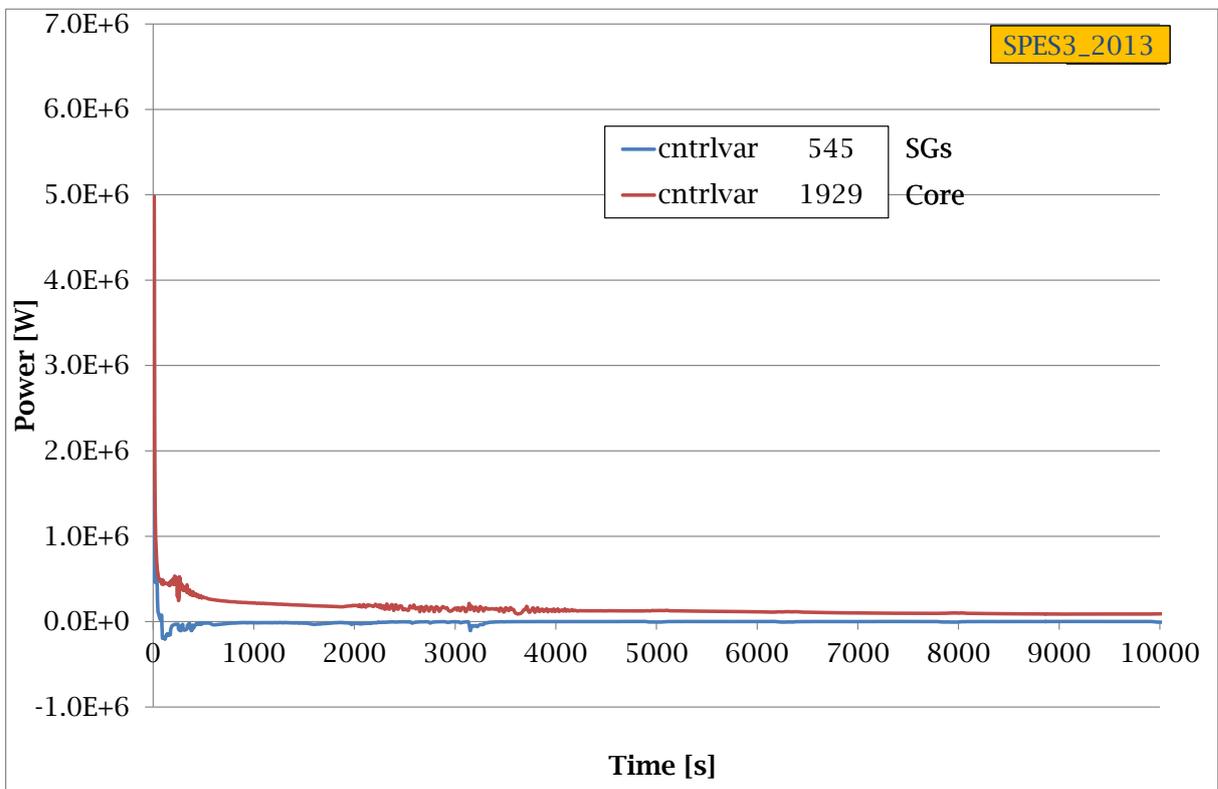


Fig. 6.102 – Potenza prodotta dal core e asportata dagli SGs in SPES3_2013 (part.).

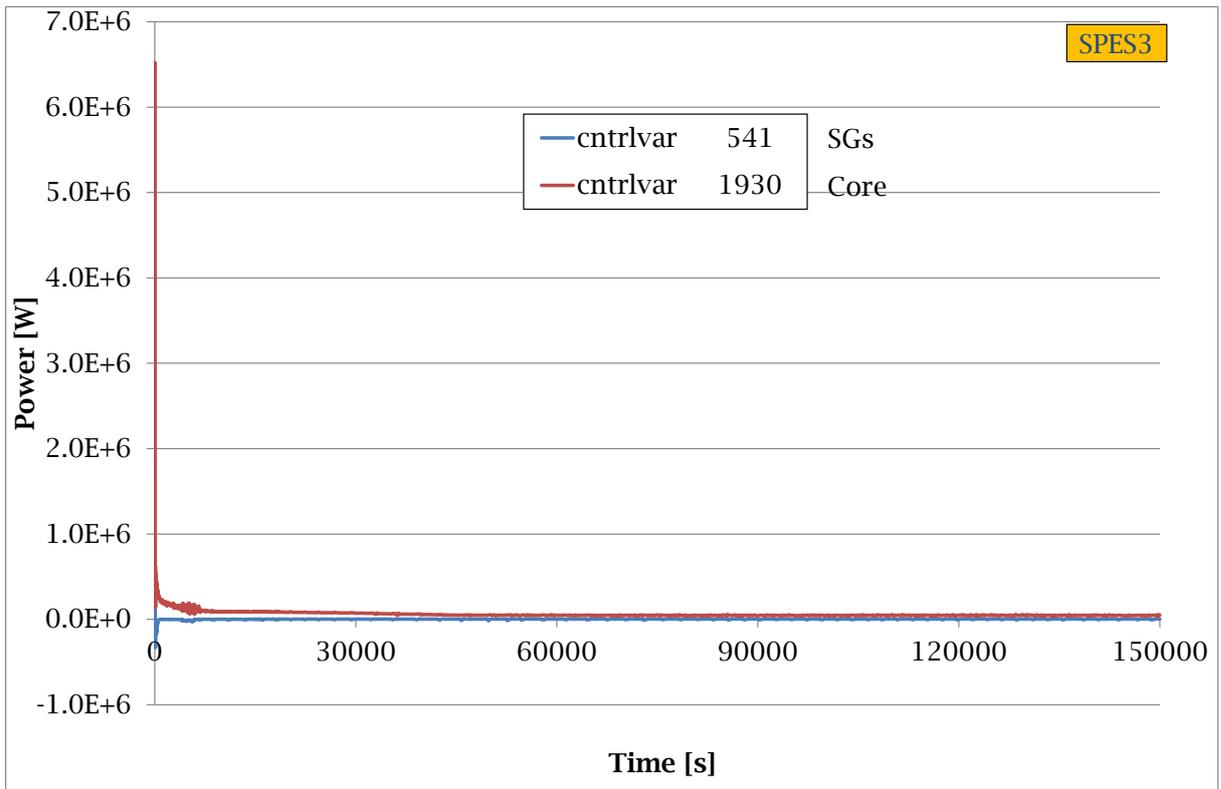


Fig. 6.103 – Potenza prodotta dal core e asportata dagli SGs in SPES3.

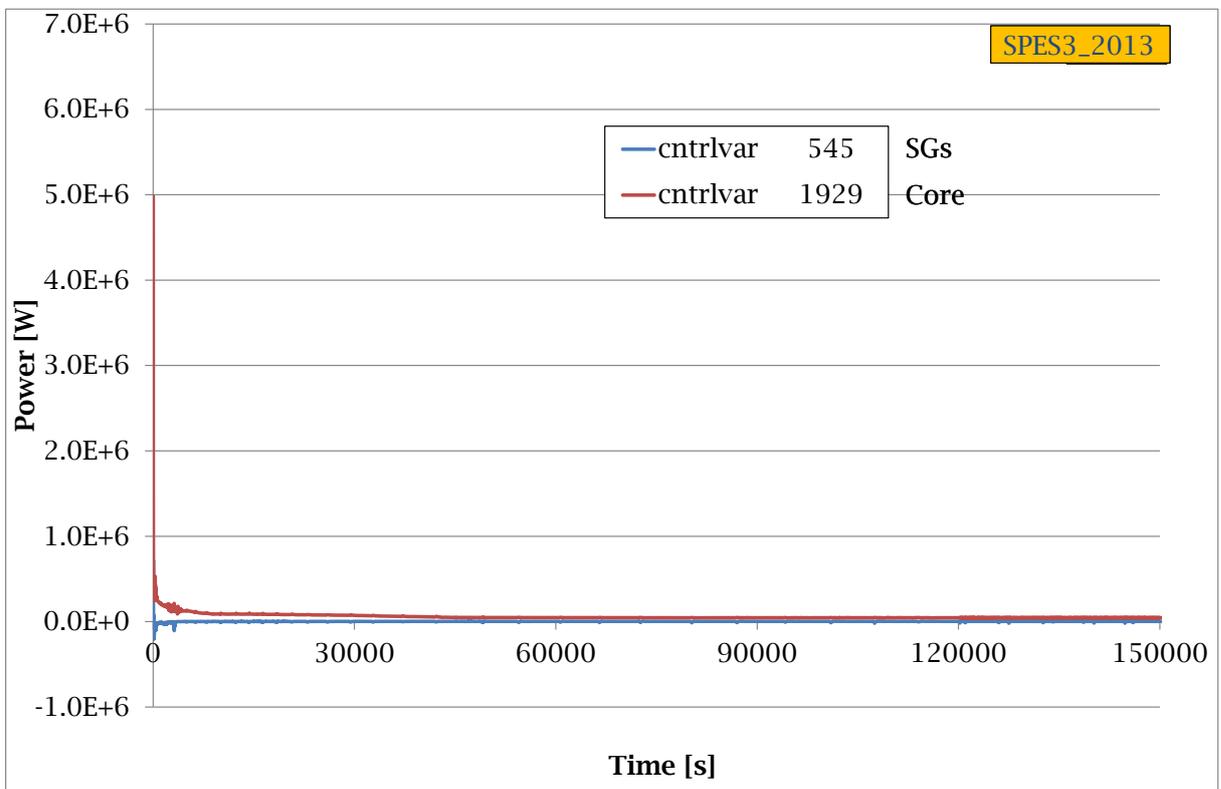


Fig. 6.104 – Potenza prodotta dal core e asportata dagli SGs in SPES3_2013.

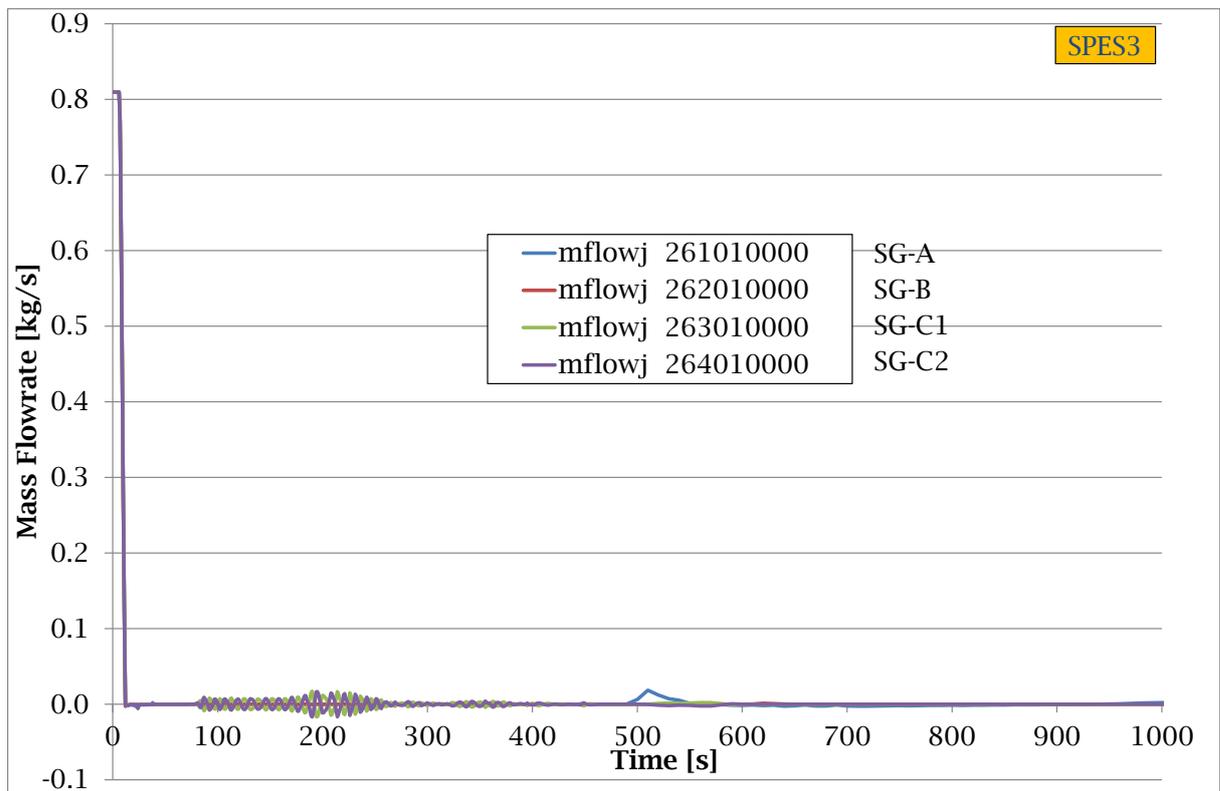


Fig. 6.105 – Portata lato secondario dei SGs in SPES3.

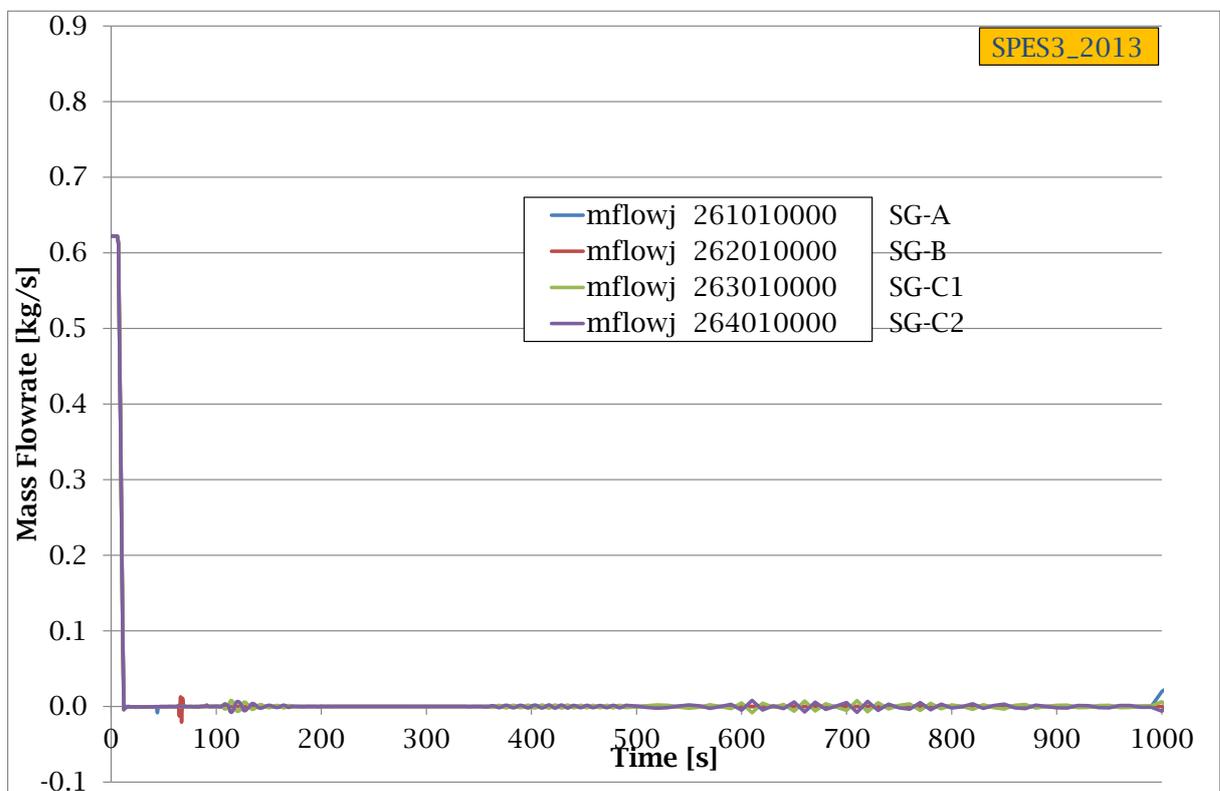


Fig. 6.106 – Portata lato secondario dei SGs in SPES3_2013.

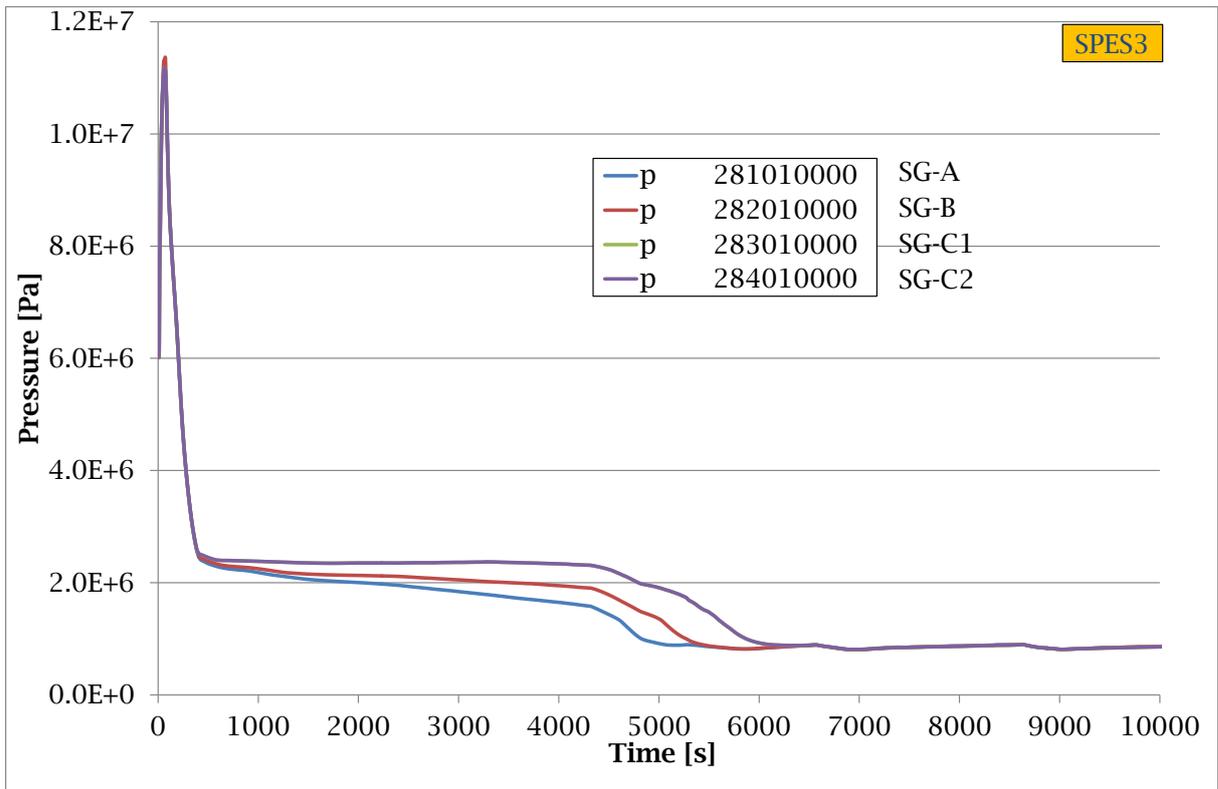


Fig. 6.107 – Pressione lato secondario dei SGs in SPES3 (part.).

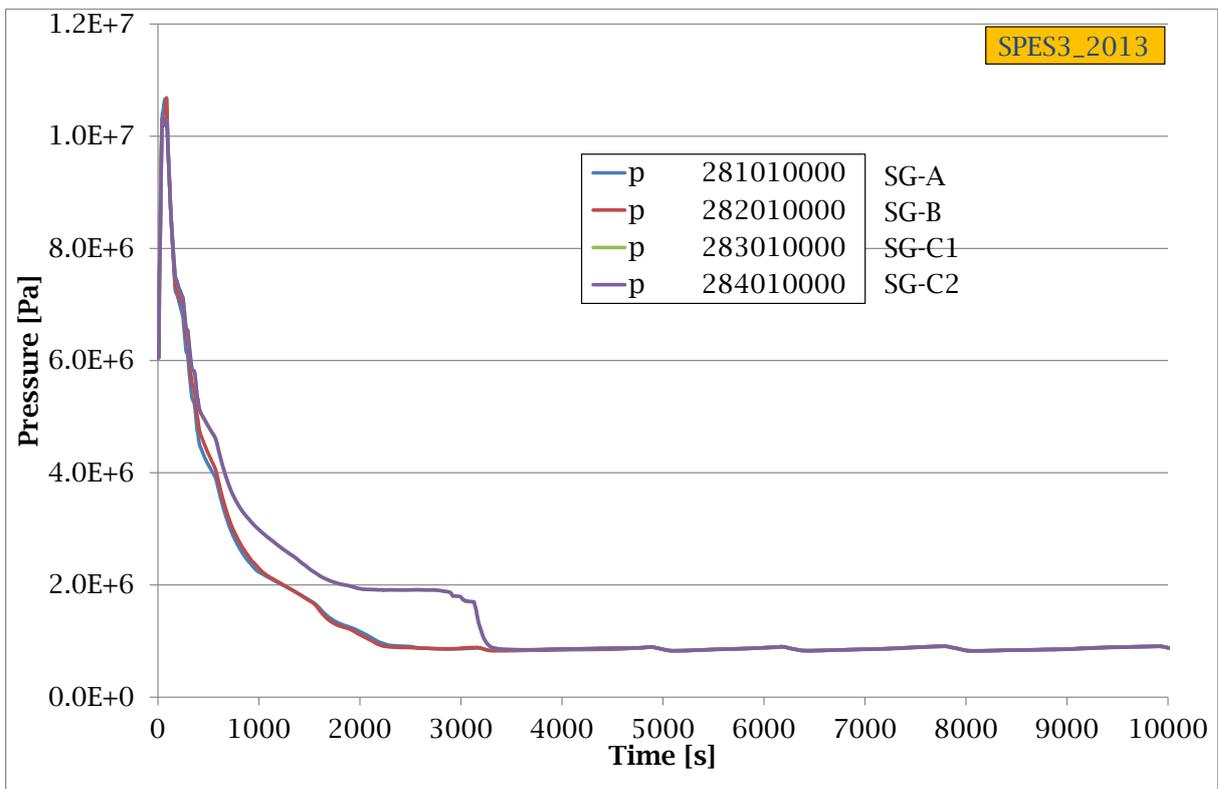


Fig. 6.108 – Pressione lato secondario dei SGs in SPES3_2013 (part.).

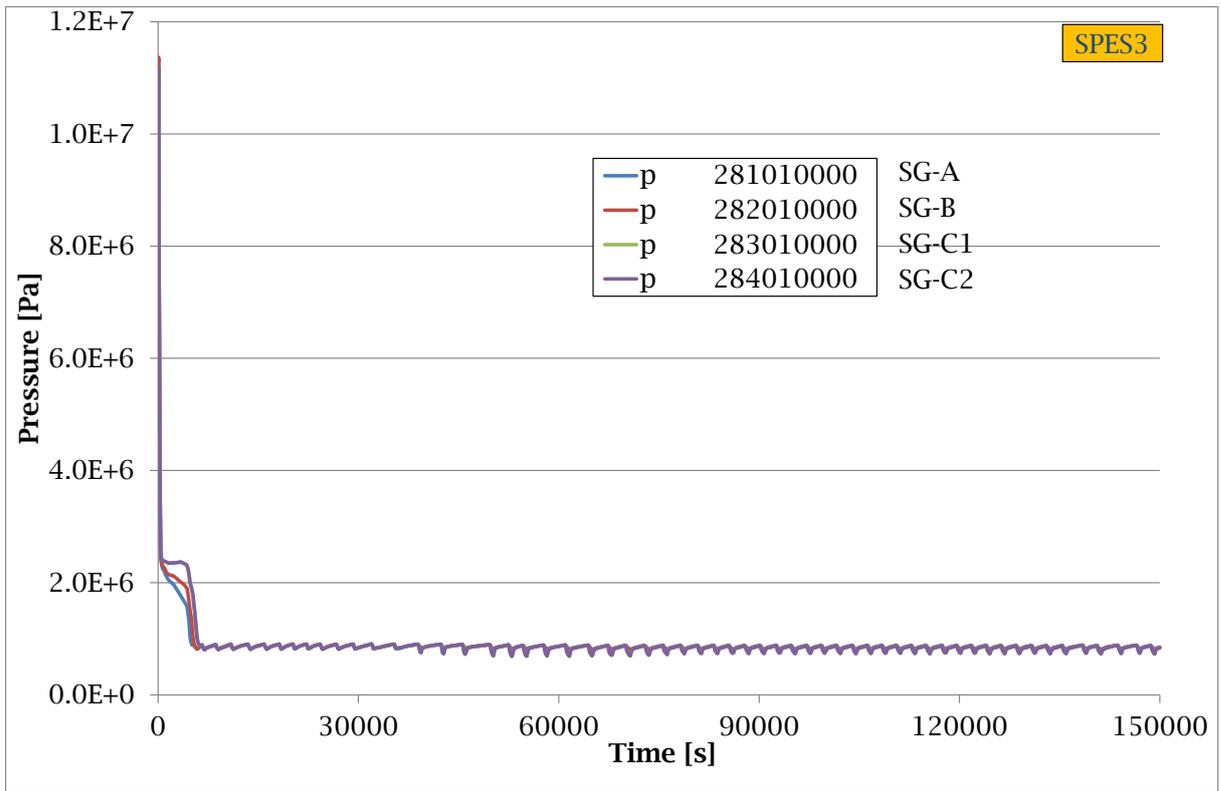


Fig. 6.109 – Pressione lato secondario dei SGs in SPES3 (part.).

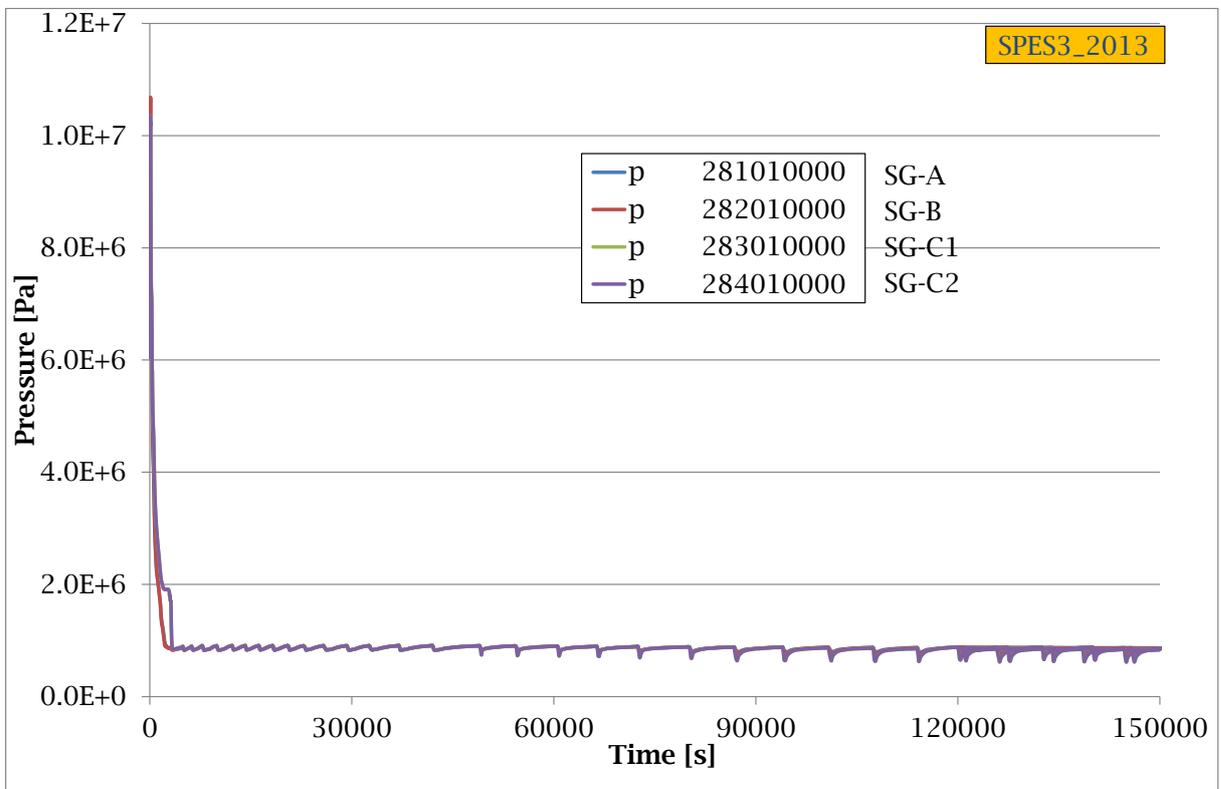


Fig. 6.110 – Pressione lato secondario dei SGs in SPES3_2013 (part.).

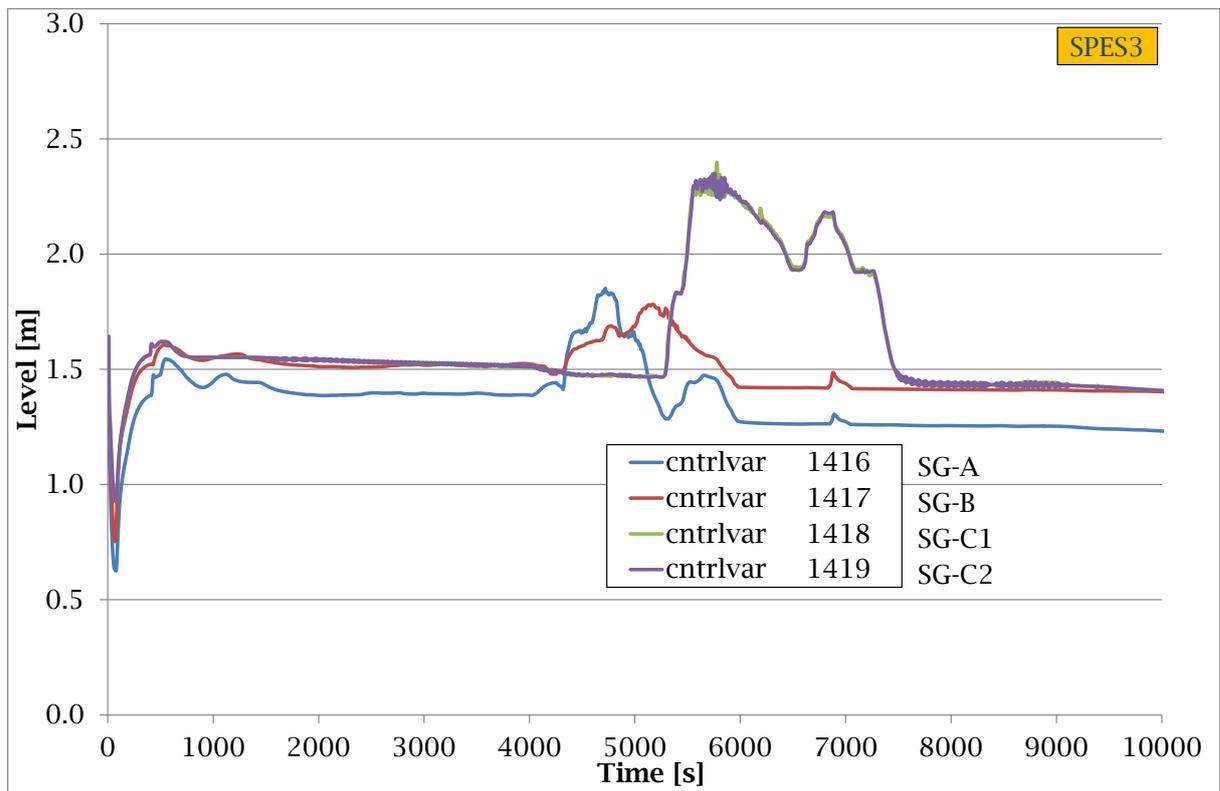


Fig. 6.111 – Livello nel secondario dei SGs in SPES3 (part.).

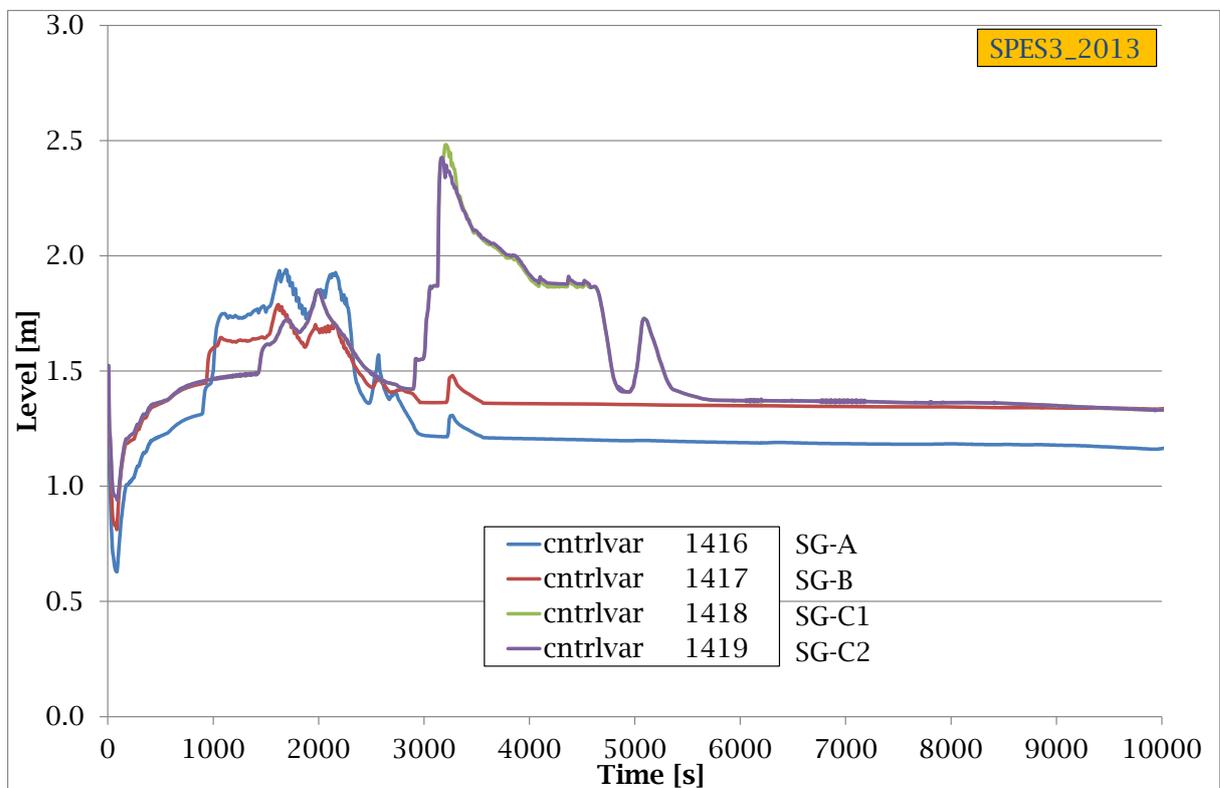


Fig. 6.112 – Livello nel secondario dei SGs in SPES3_2013 (part.).

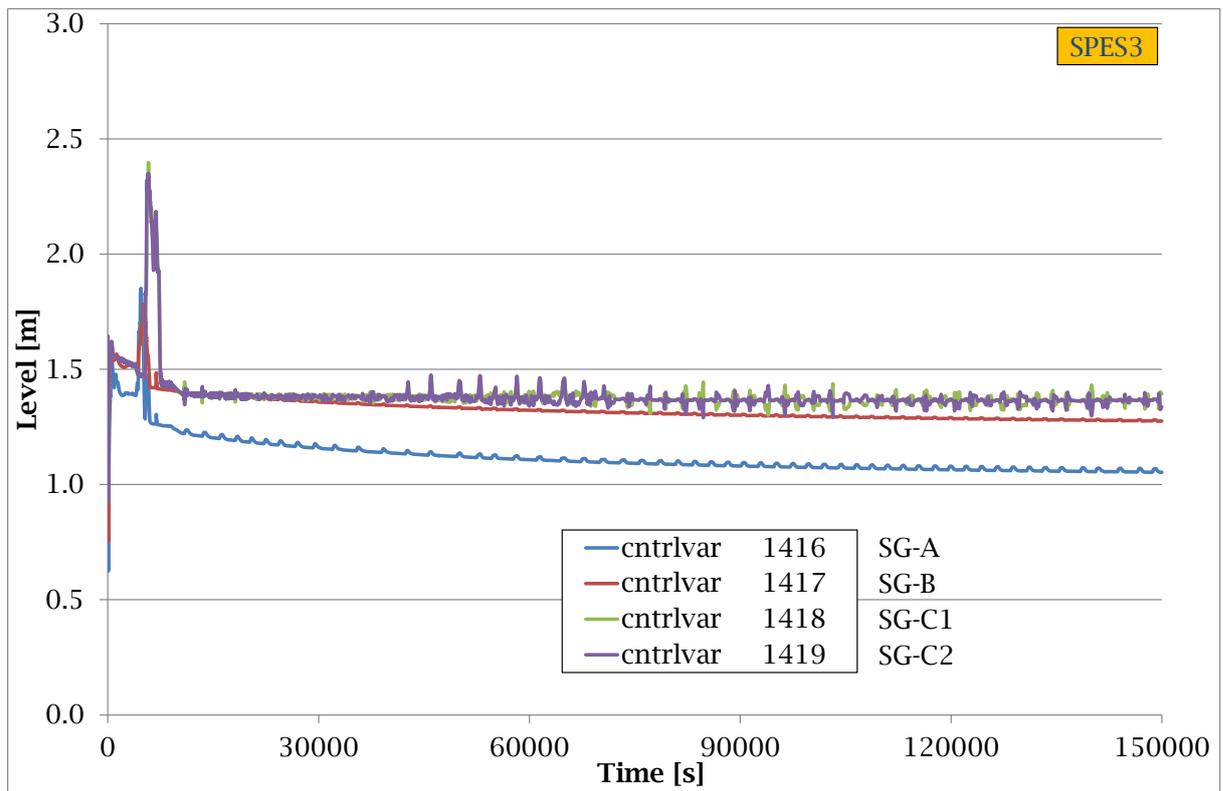


Fig. 6.113 – Livello nel secondario dei SGs in SPES3.

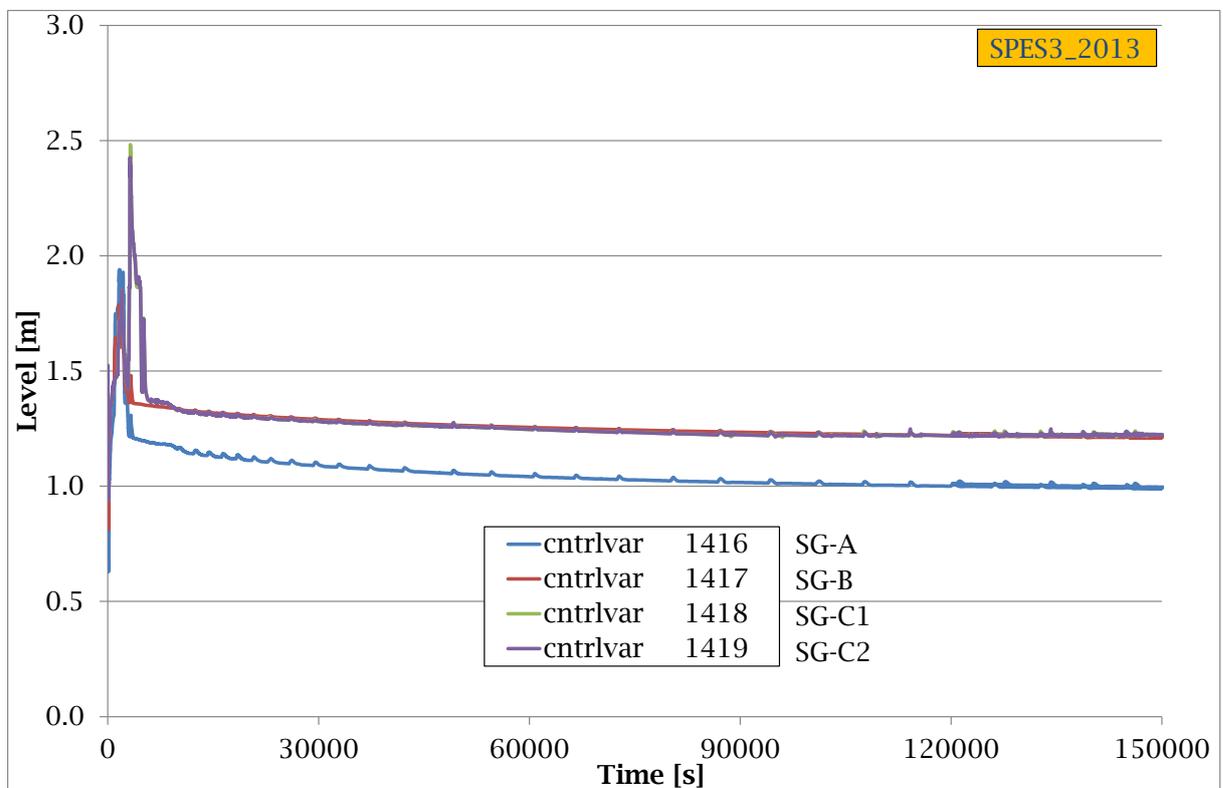


Fig. 6.114 – Livello nel secondario dei SGs in SPES3_2013.

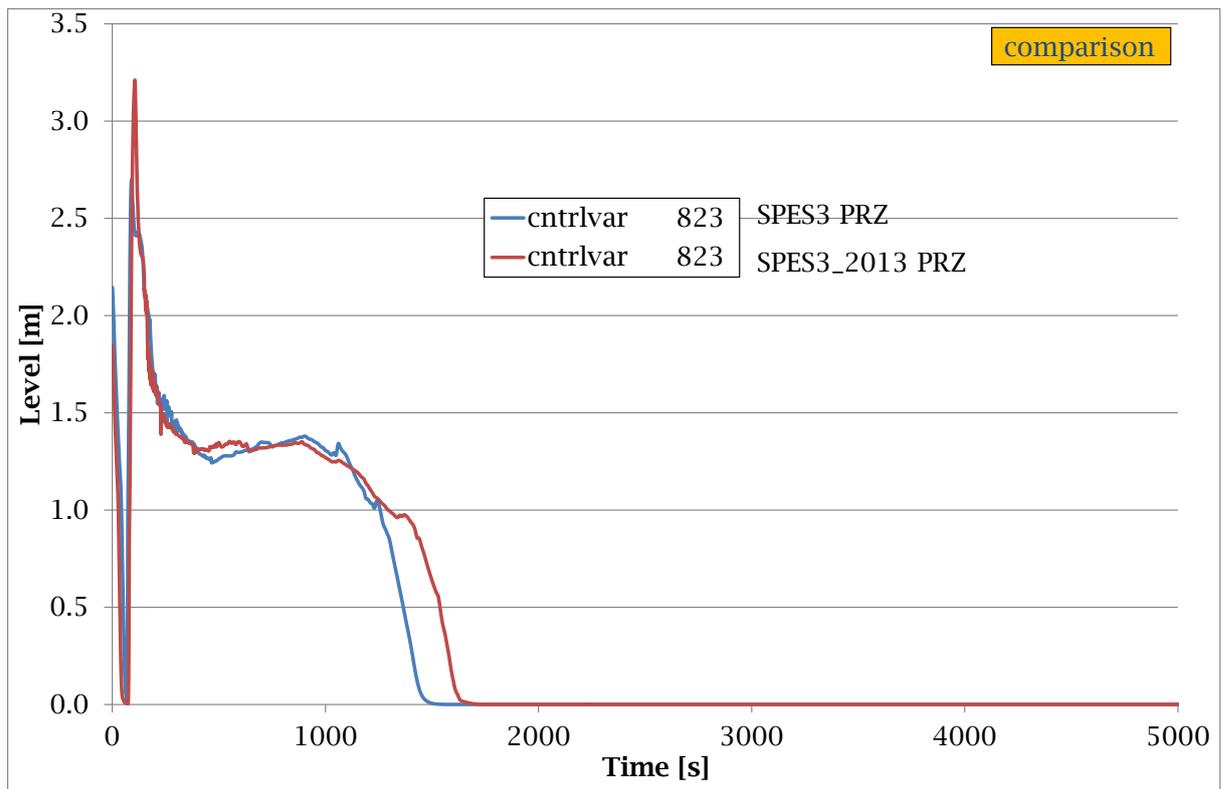


Fig. 6.115 – Livello di liquido nel PRZ.

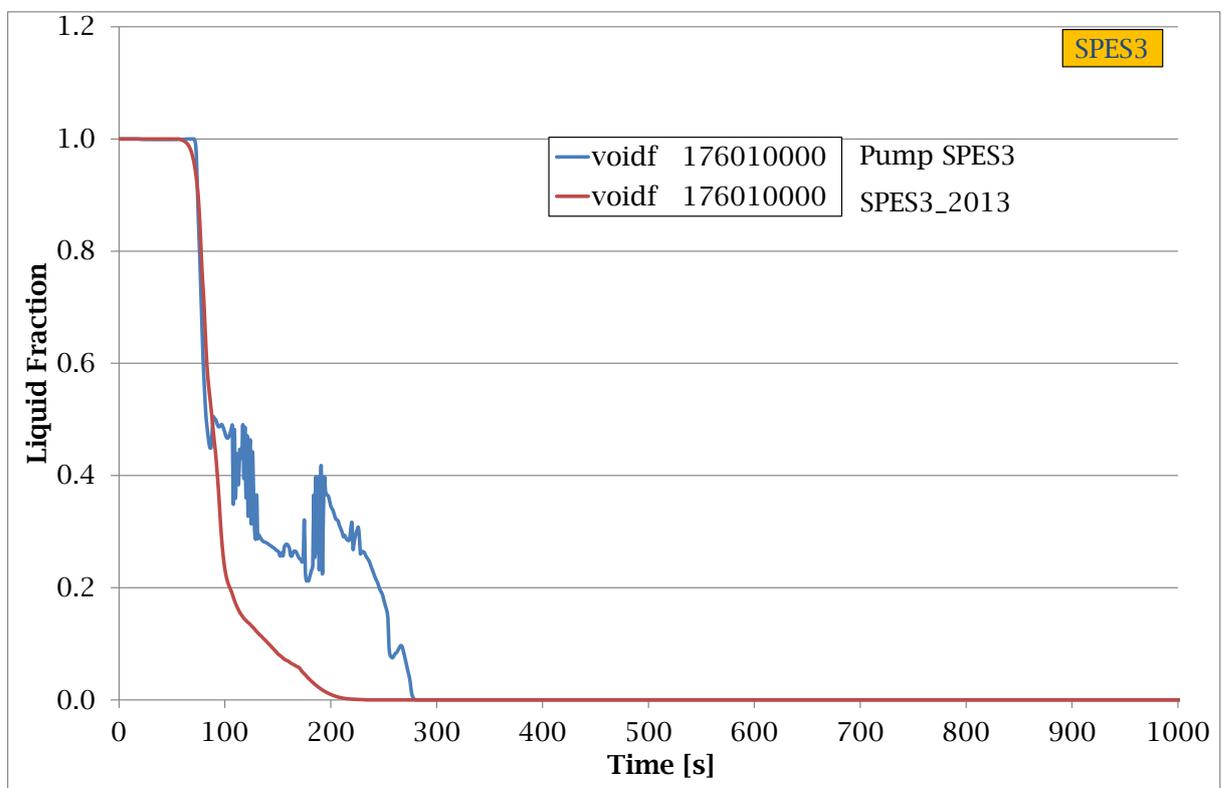


Fig. 6.116 – Grado di vuoto all'ingresso della pompa del primario.

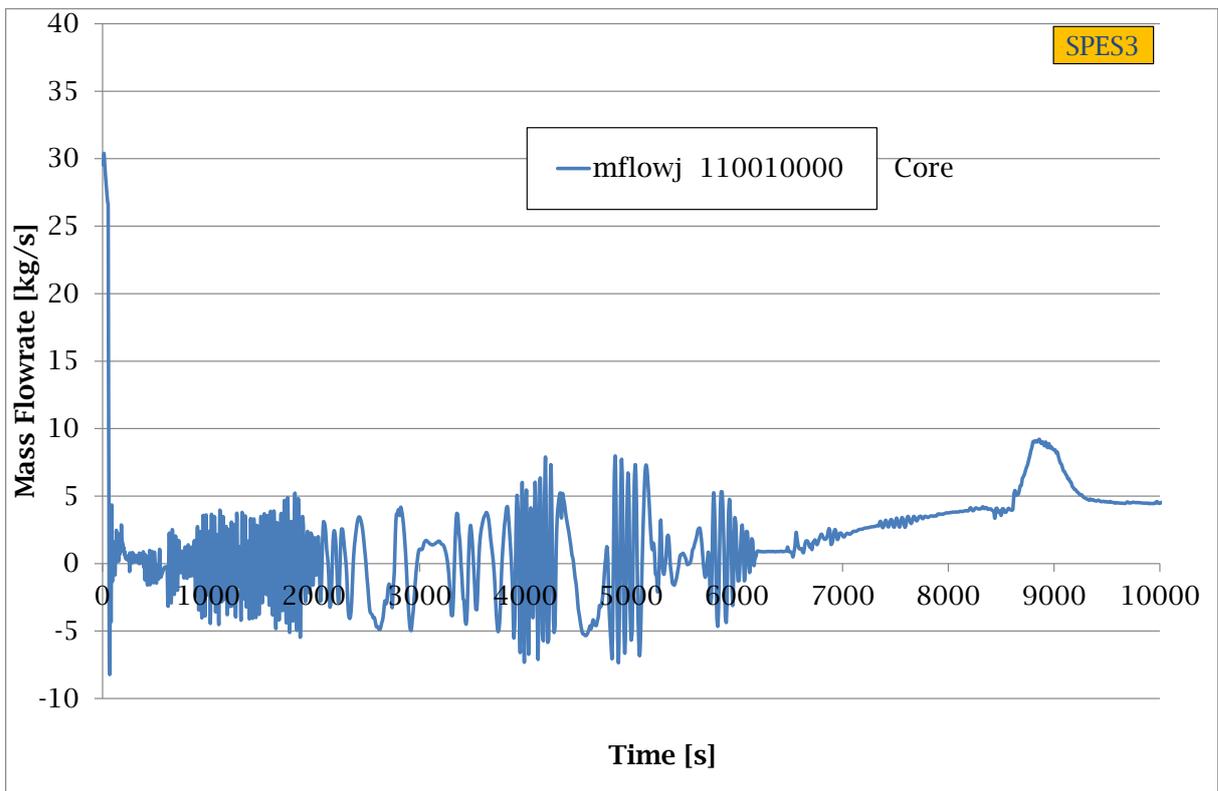


Fig. 6.117 – Portata attraverso il core in SPES3 (part.).

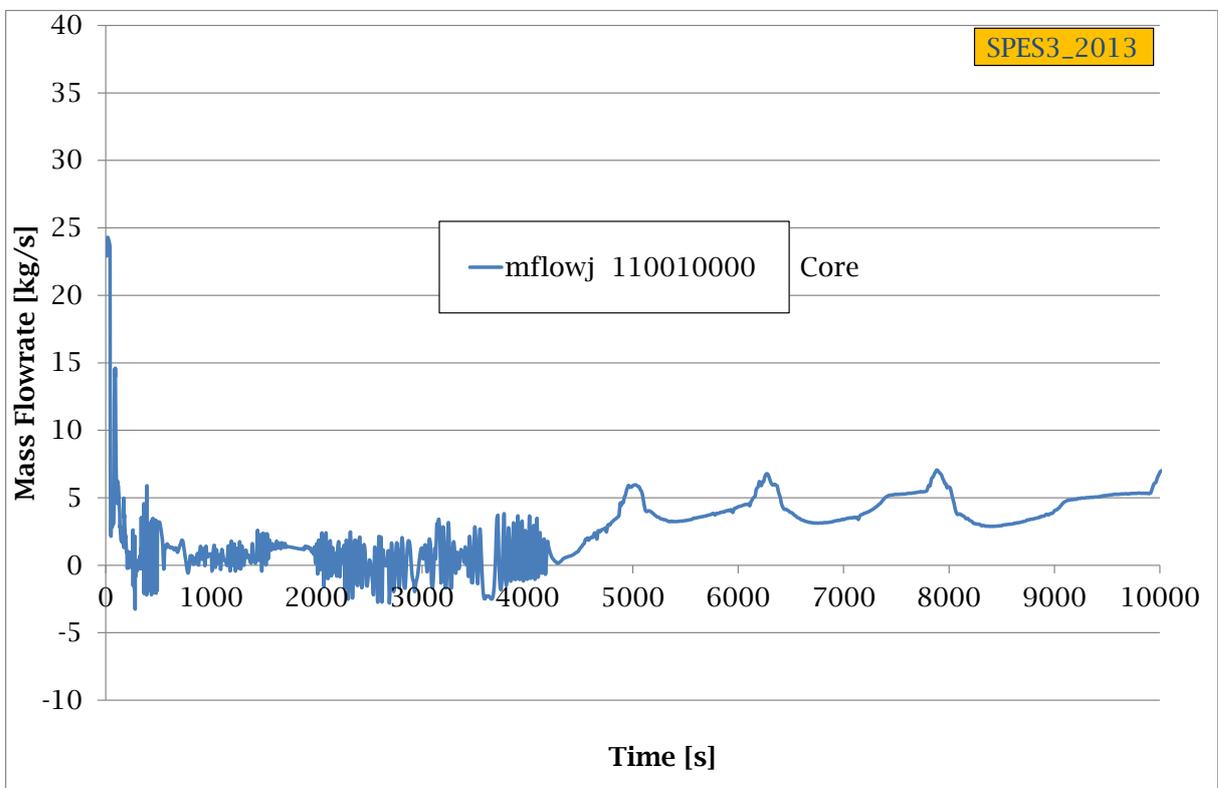


Fig. 6.118 – Portata attraverso il core in SPES3_2013 (part.).

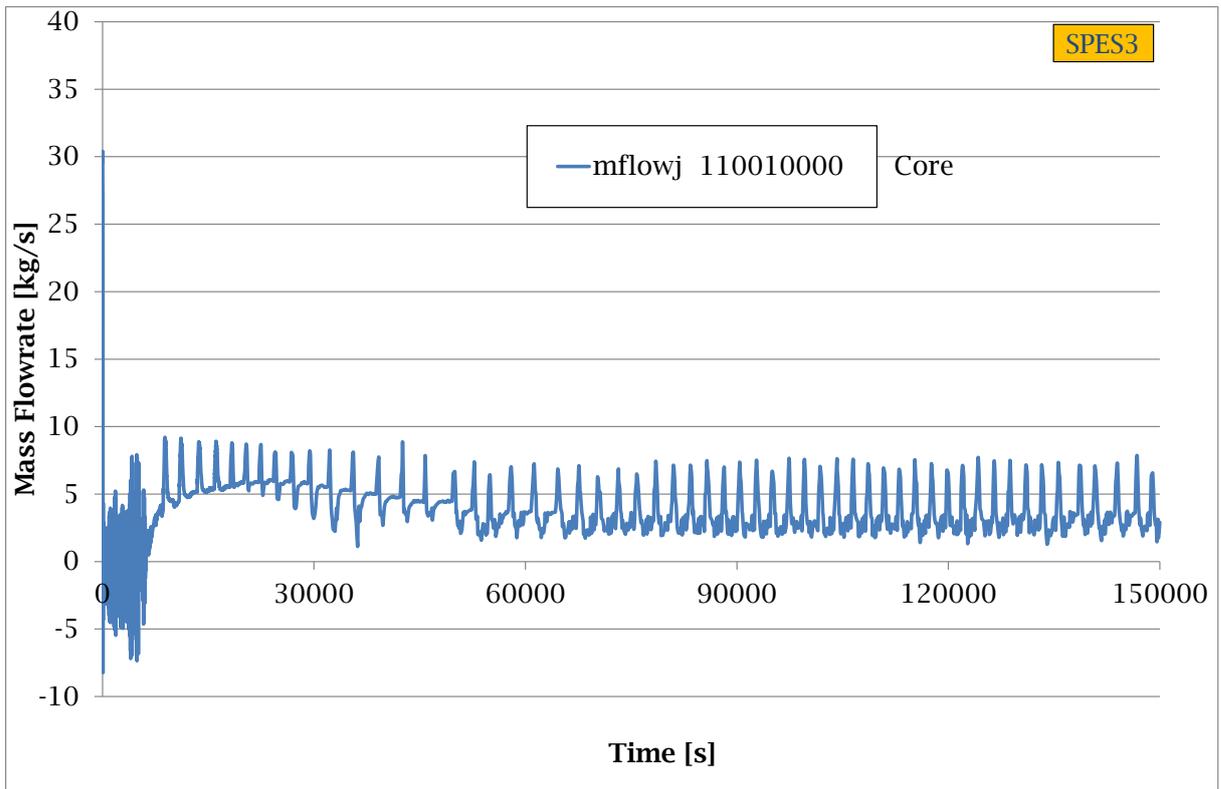


Fig. 6.119 – Portata attraverso il core in SPES3.

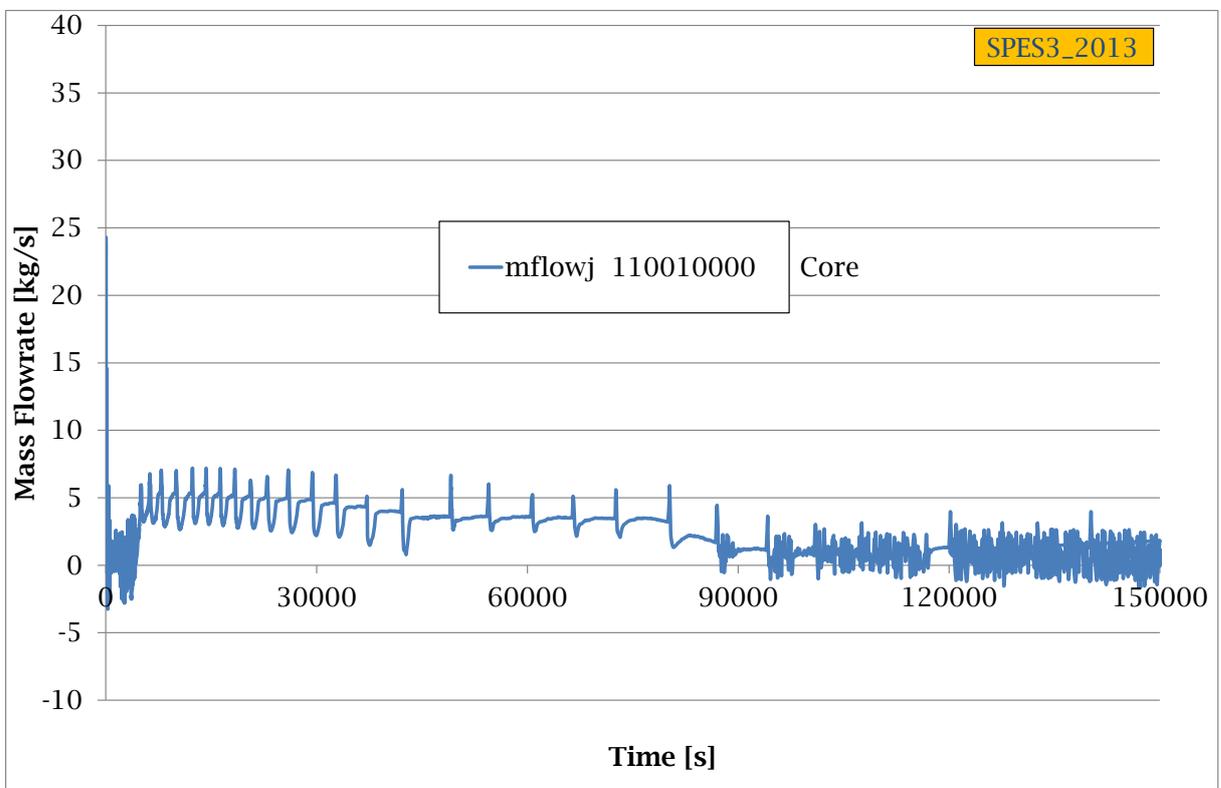


Fig. 6.120 – Portata attraverso il core in SPES3_2013.

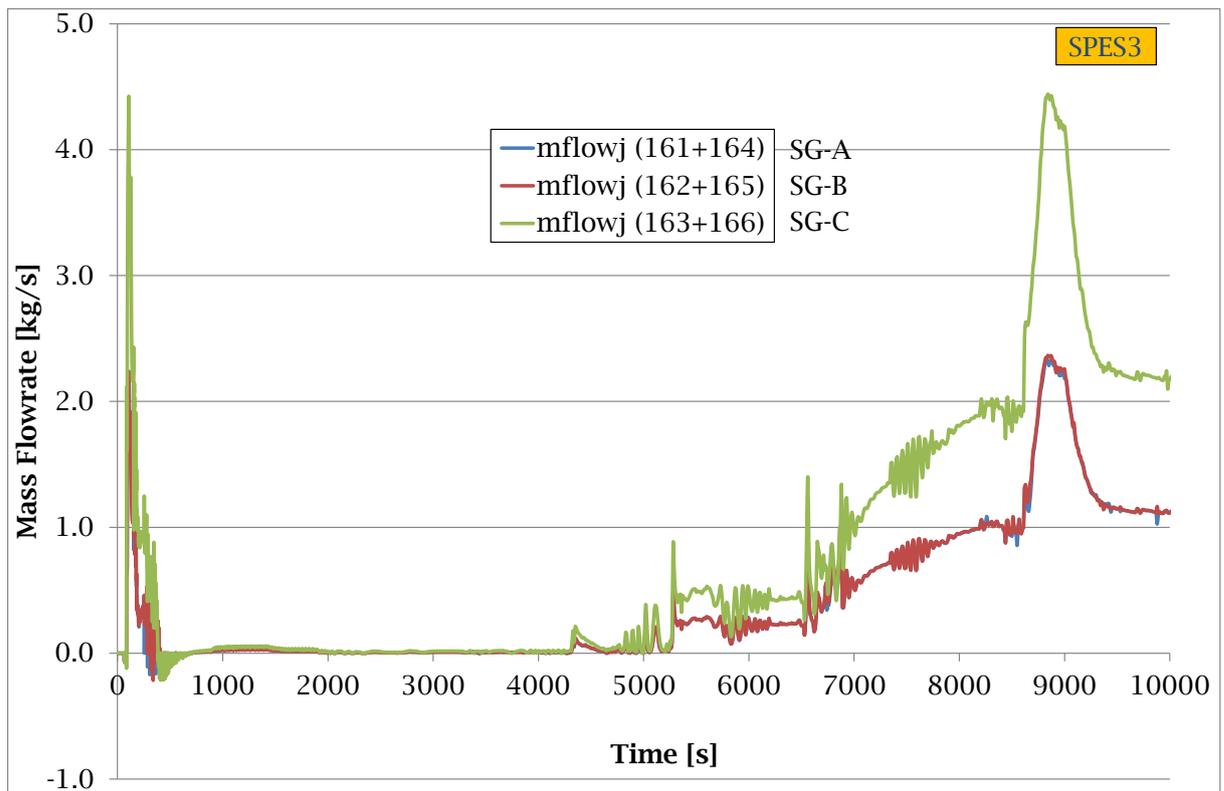


Fig. 6.121 – Portata tra RI e DC in SPES3 (part.).

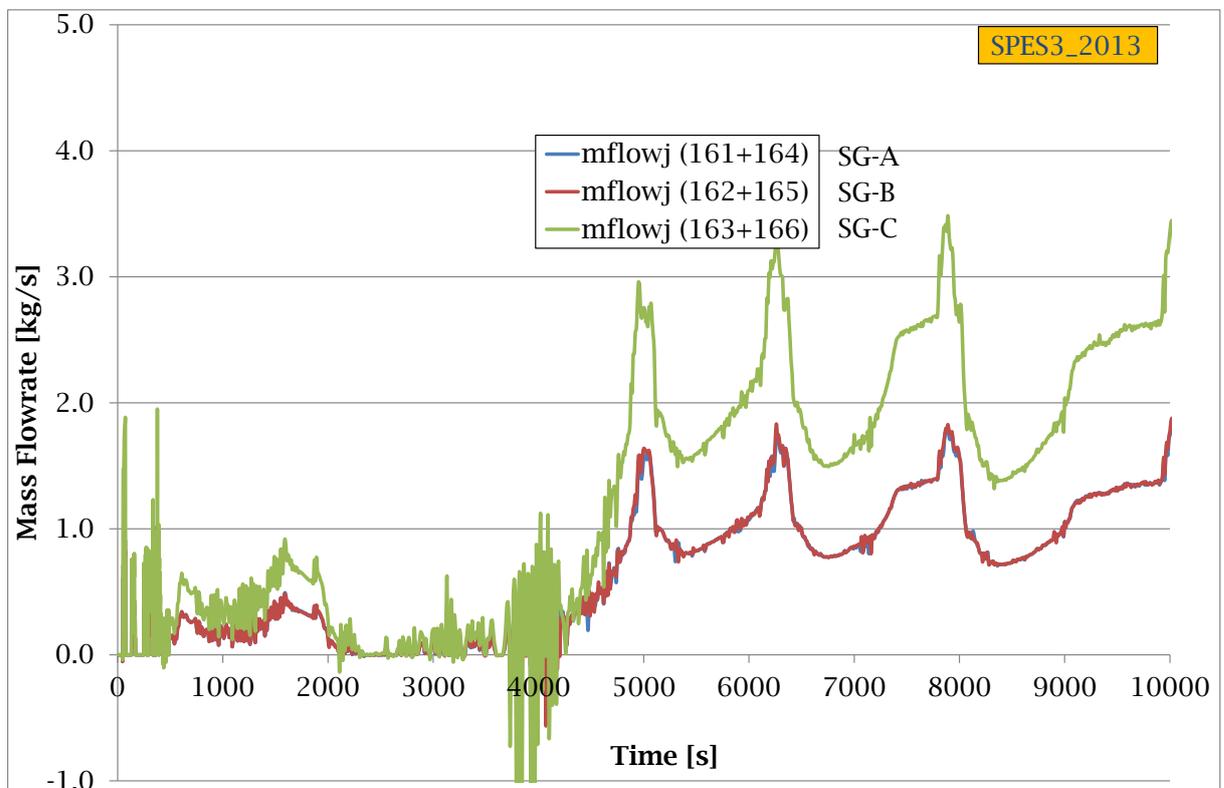


Fig. 6.122 – Portata tra RI e DC in SPES3_2013 (part.).

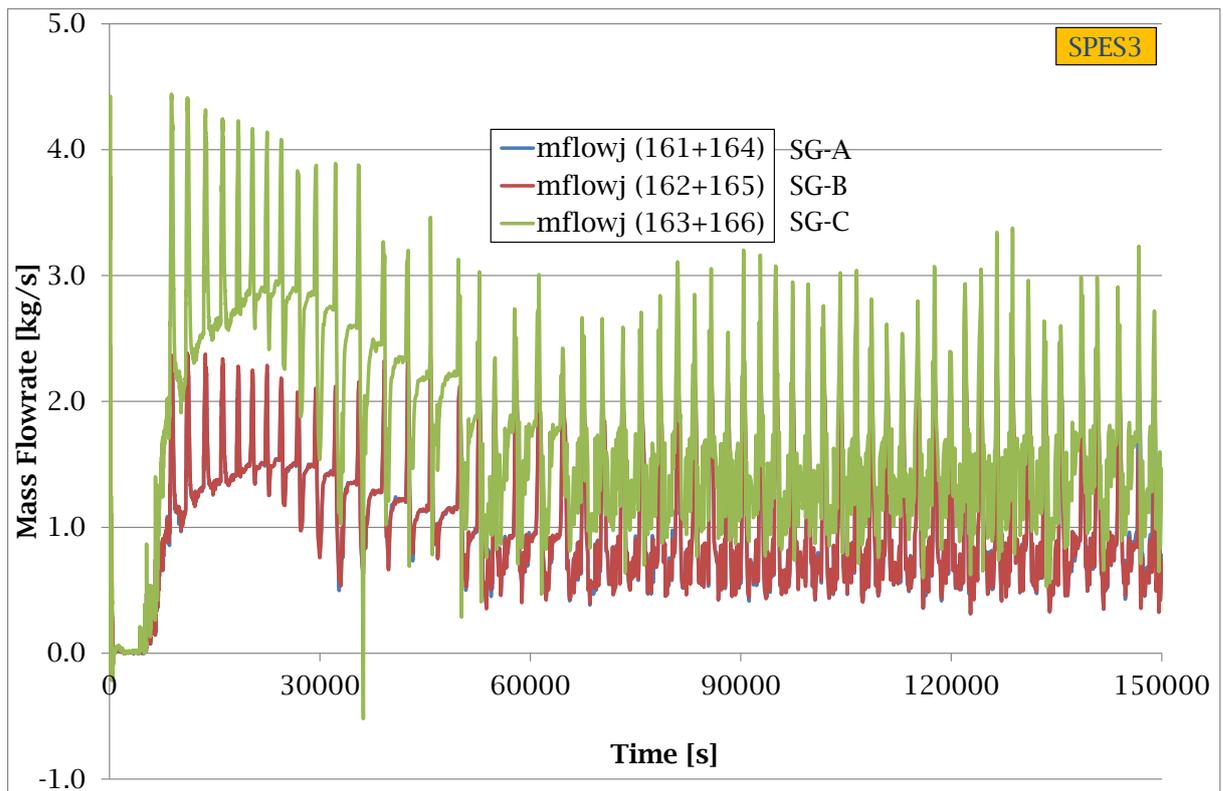


Fig. 6.123 – Portata tra RI e DC in SPES3.

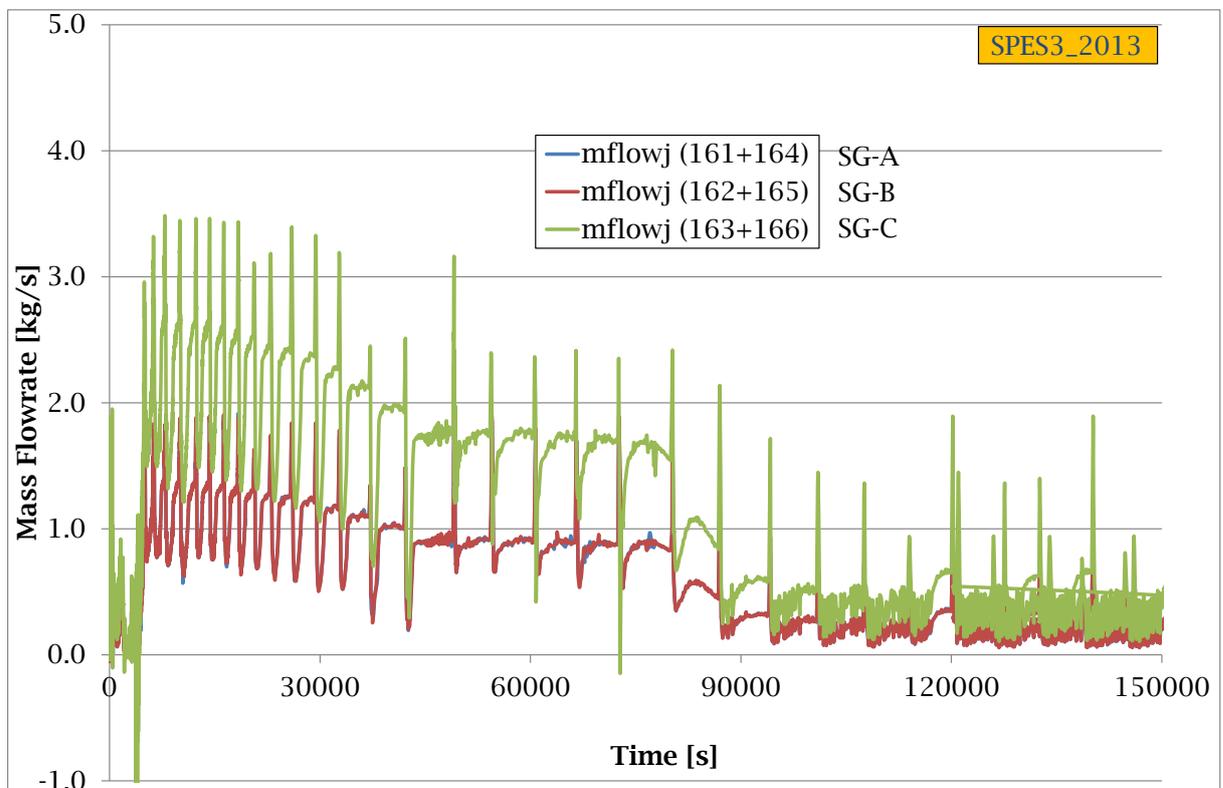


Fig. 6.124 – Portata tra RI e DC in SPES3_2013.

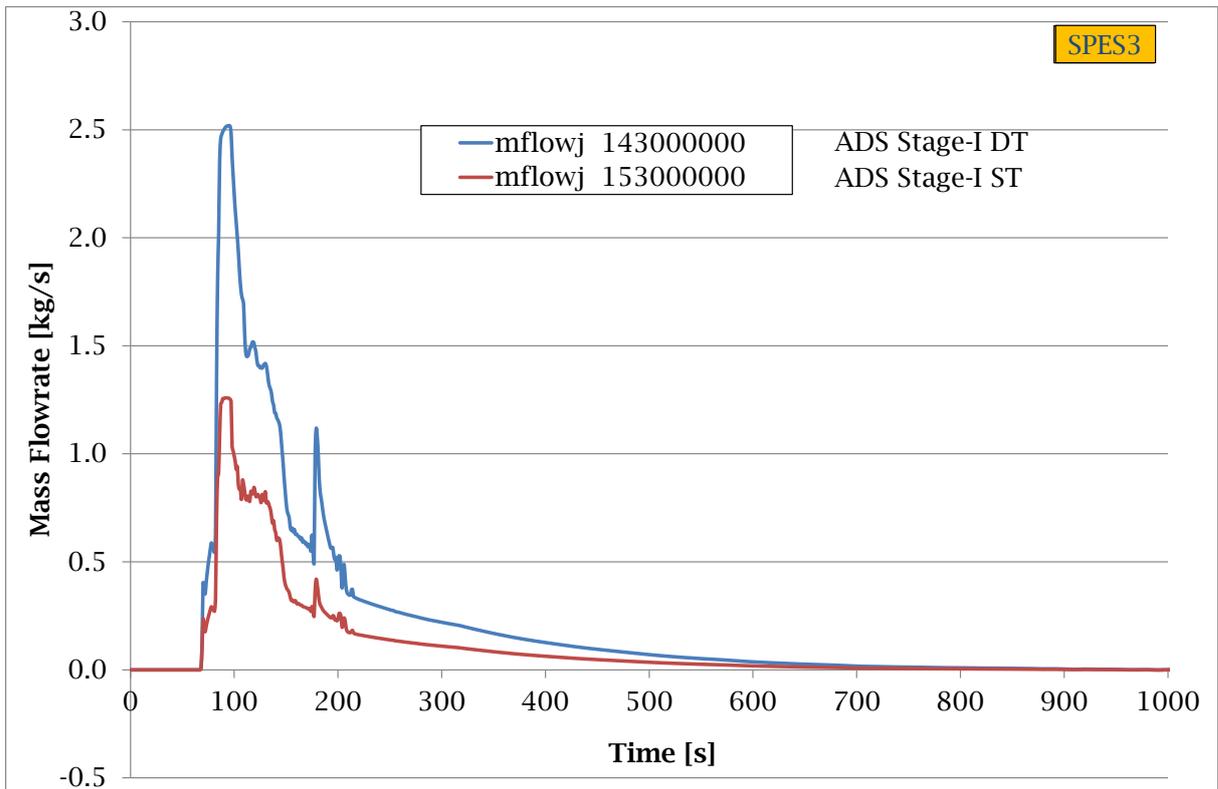


Fig. 6.125 – Portata ADS I stadio in SPES3 (part.).

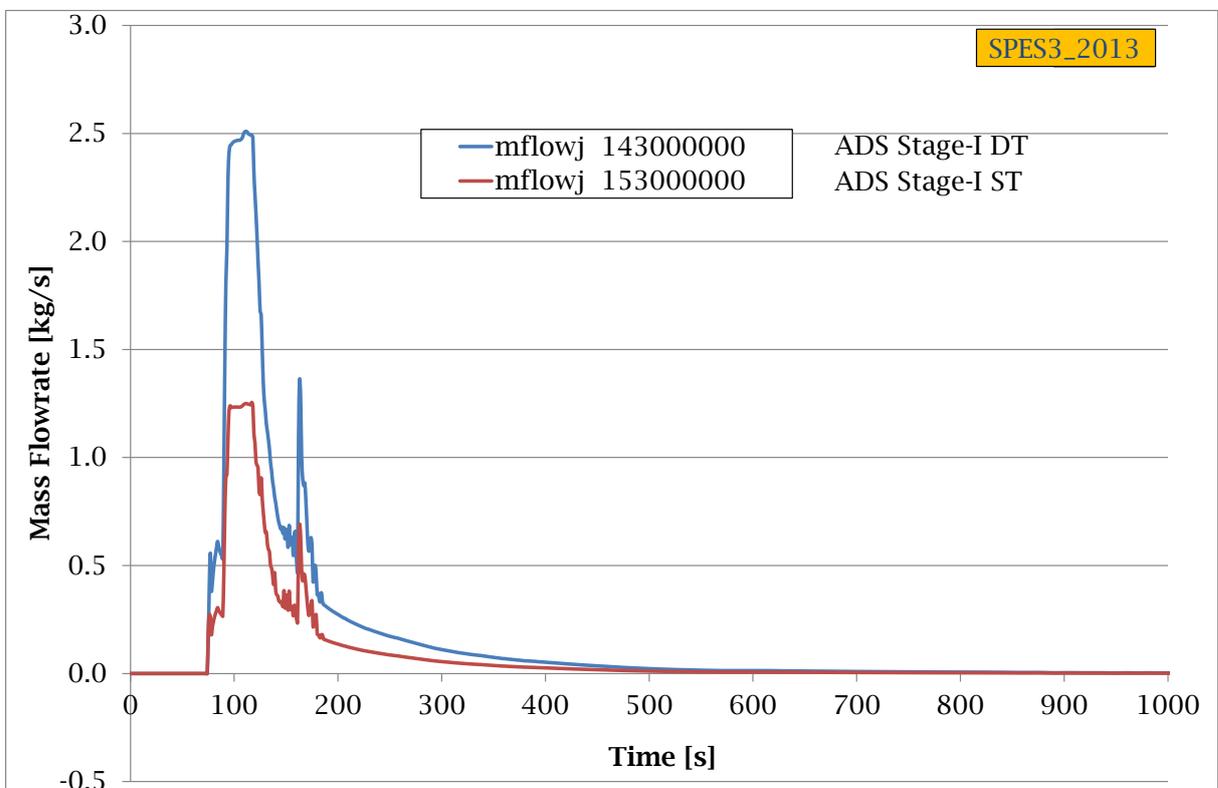


Fig. 6.126 – Portata ADS I stadio in SPES3_2013 (part.).

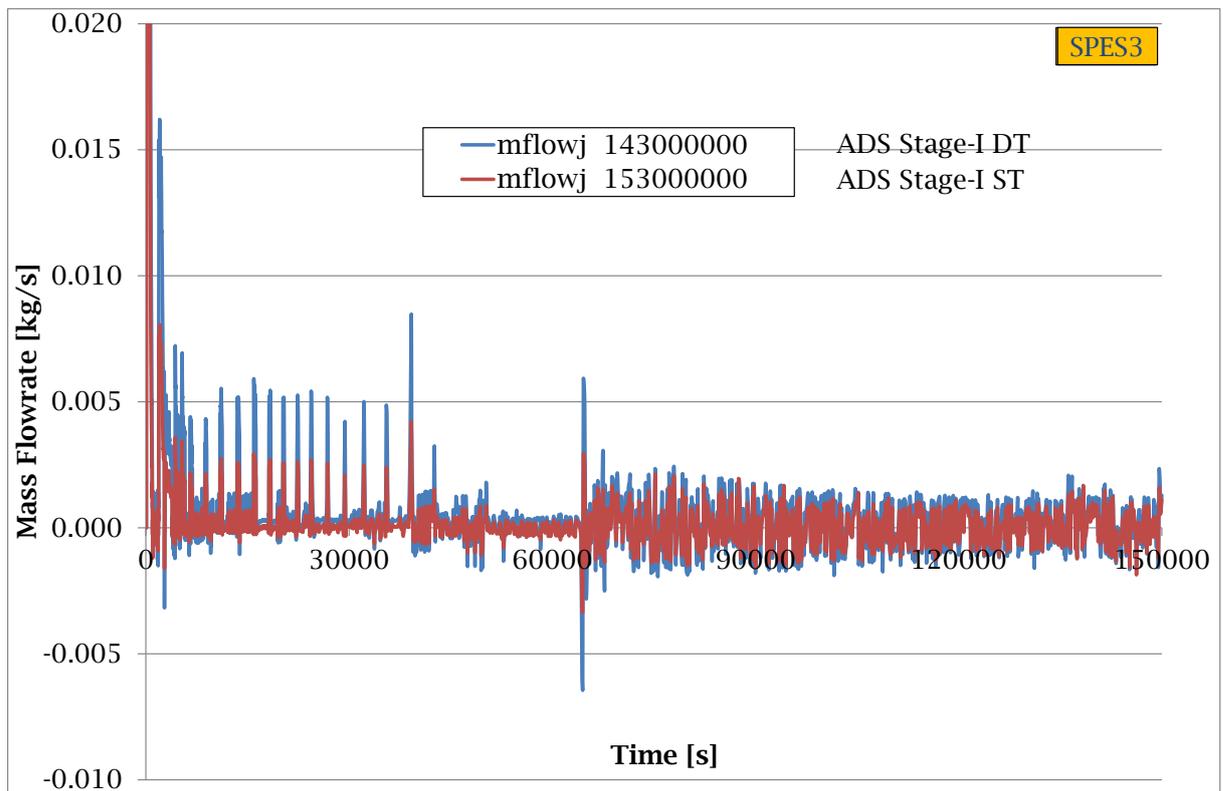


Fig. 6.127 – Portata ADS I stadio in SPES3.

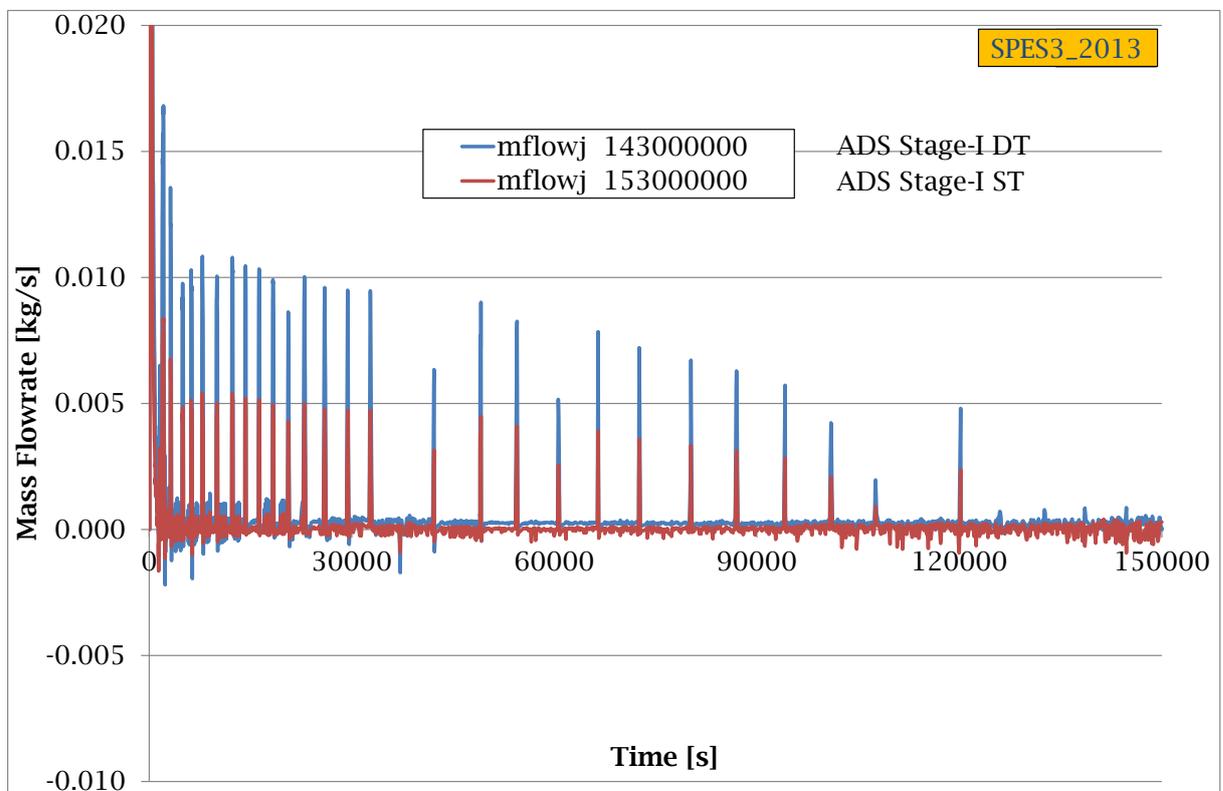


Fig. 6.128 – Portata ADS I stadio in SPES3_2013.

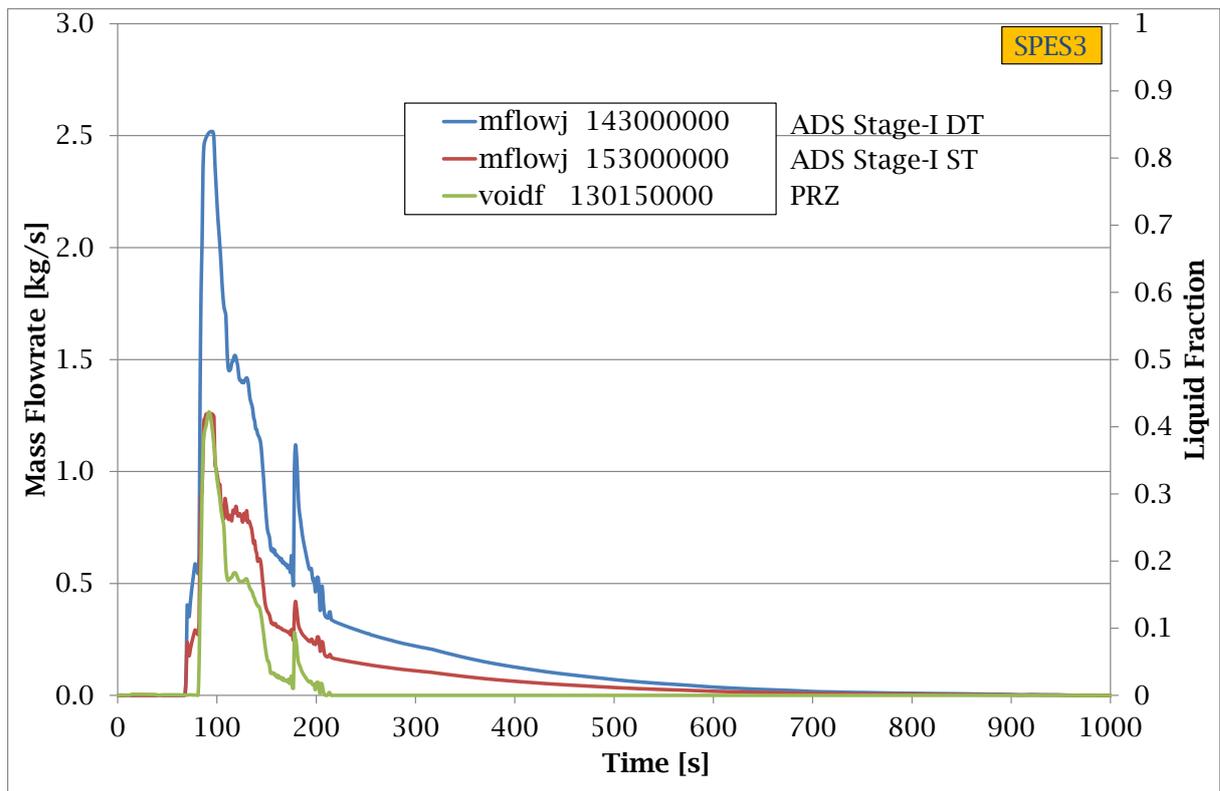


Fig. 6.129 – Portata ADS I stadio e grado di vuoto nel PRZ in SPES3.

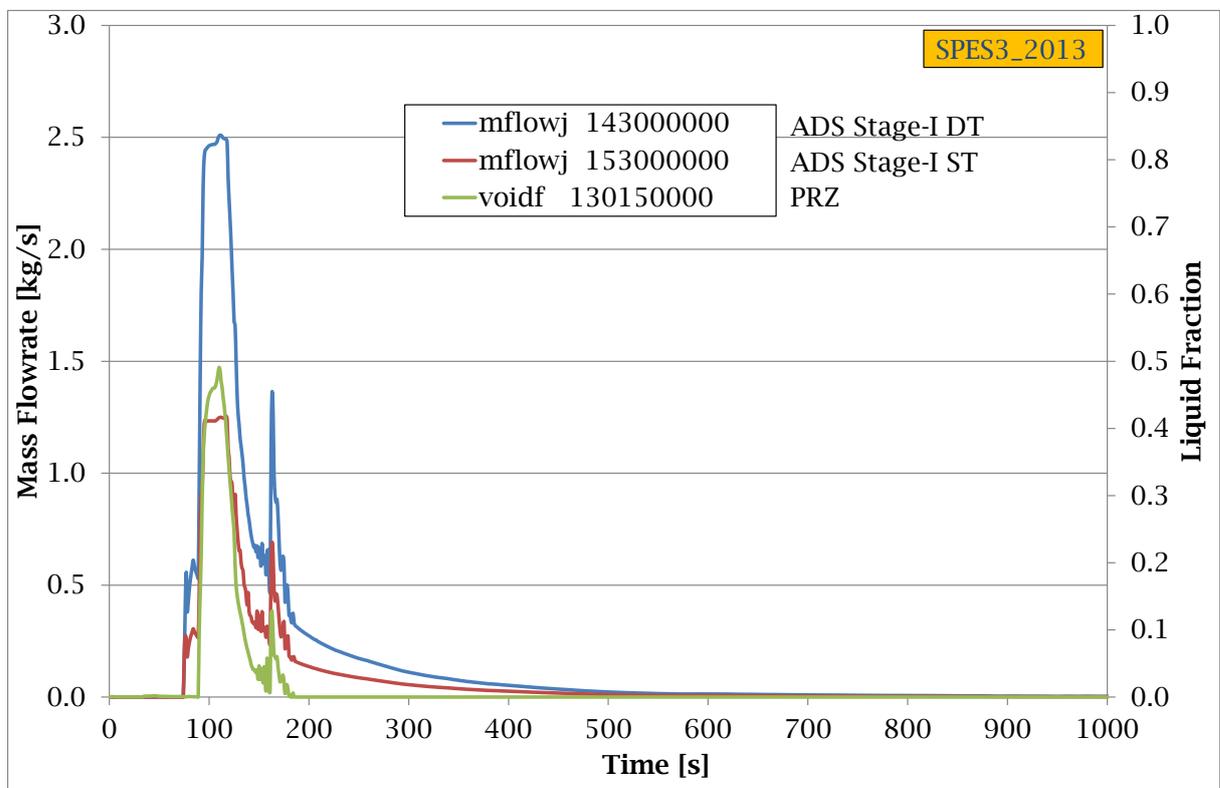


Fig. 6.130 – Portata ADS I stadio e grado di vuoto nel PRZ in SPES3_2013.

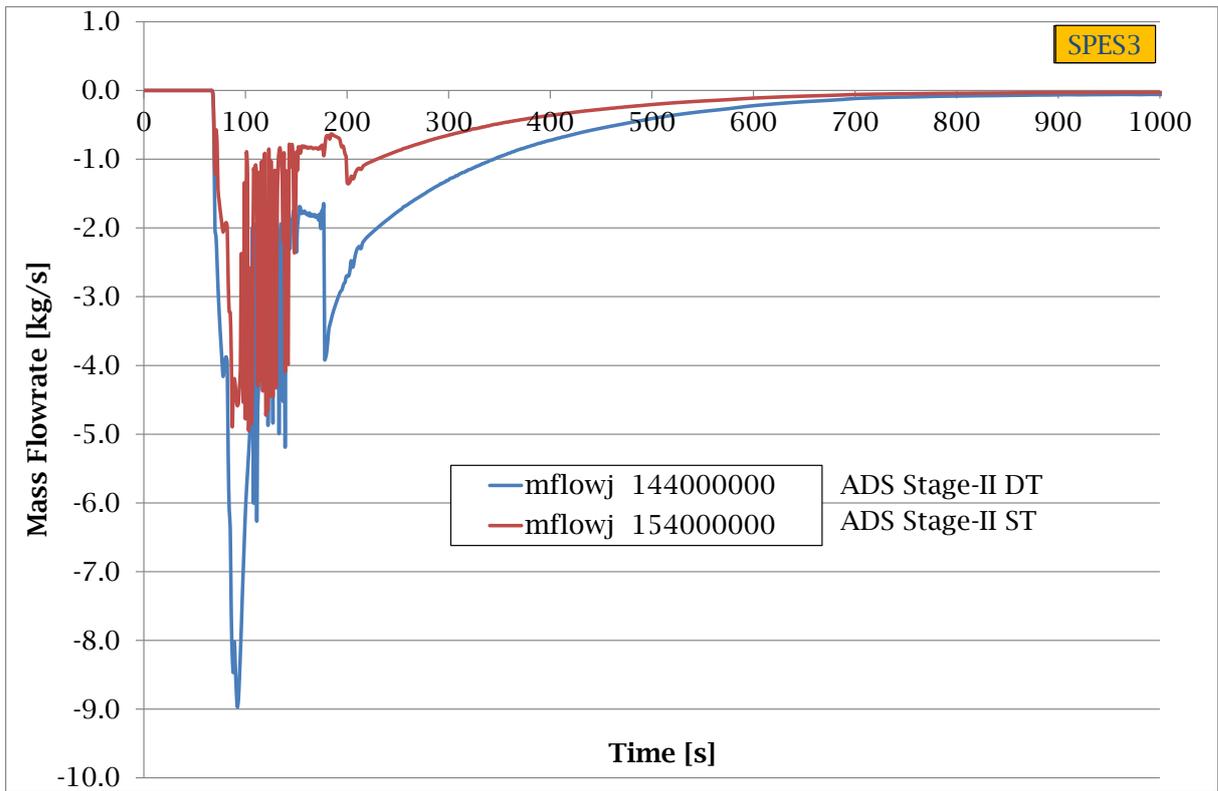


Fig. 6.131 – Portata ADS II stadio in SPES3 (part.).

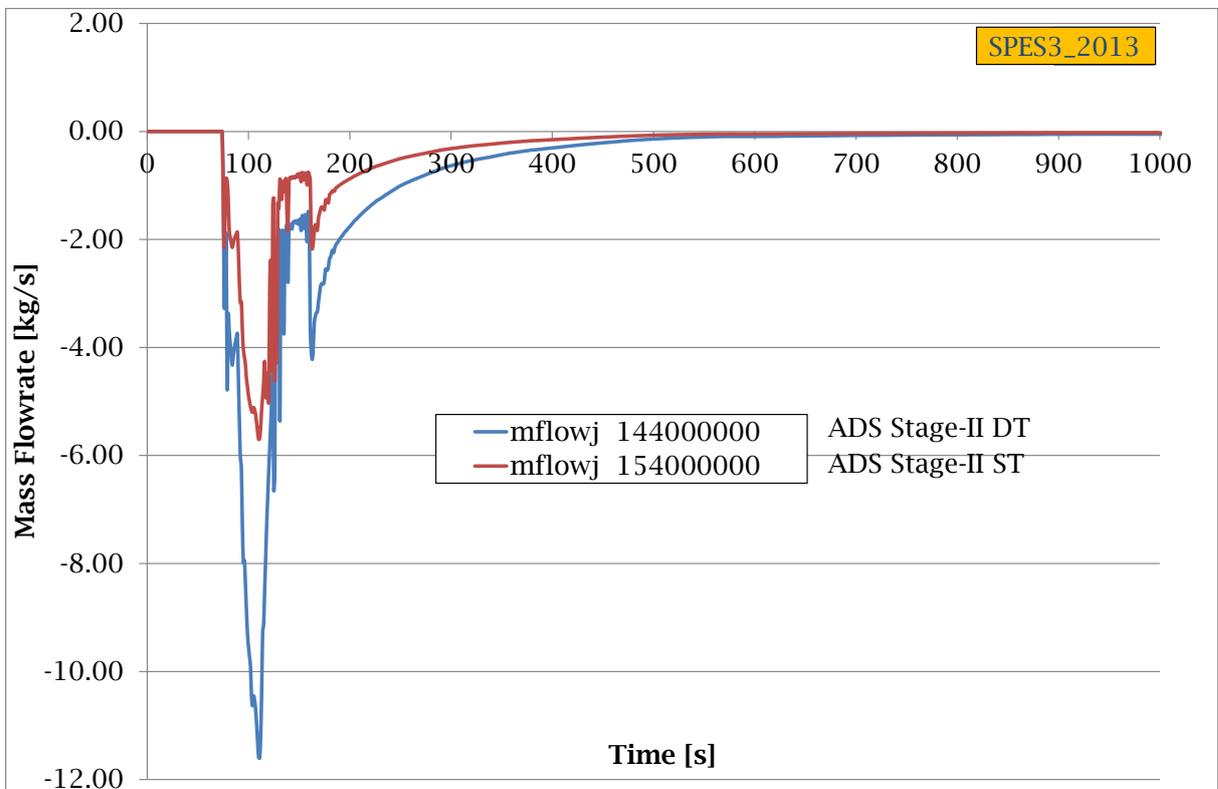


Fig. 6.132 – Portata ADS II stadio in SPES3_2013 (part.).

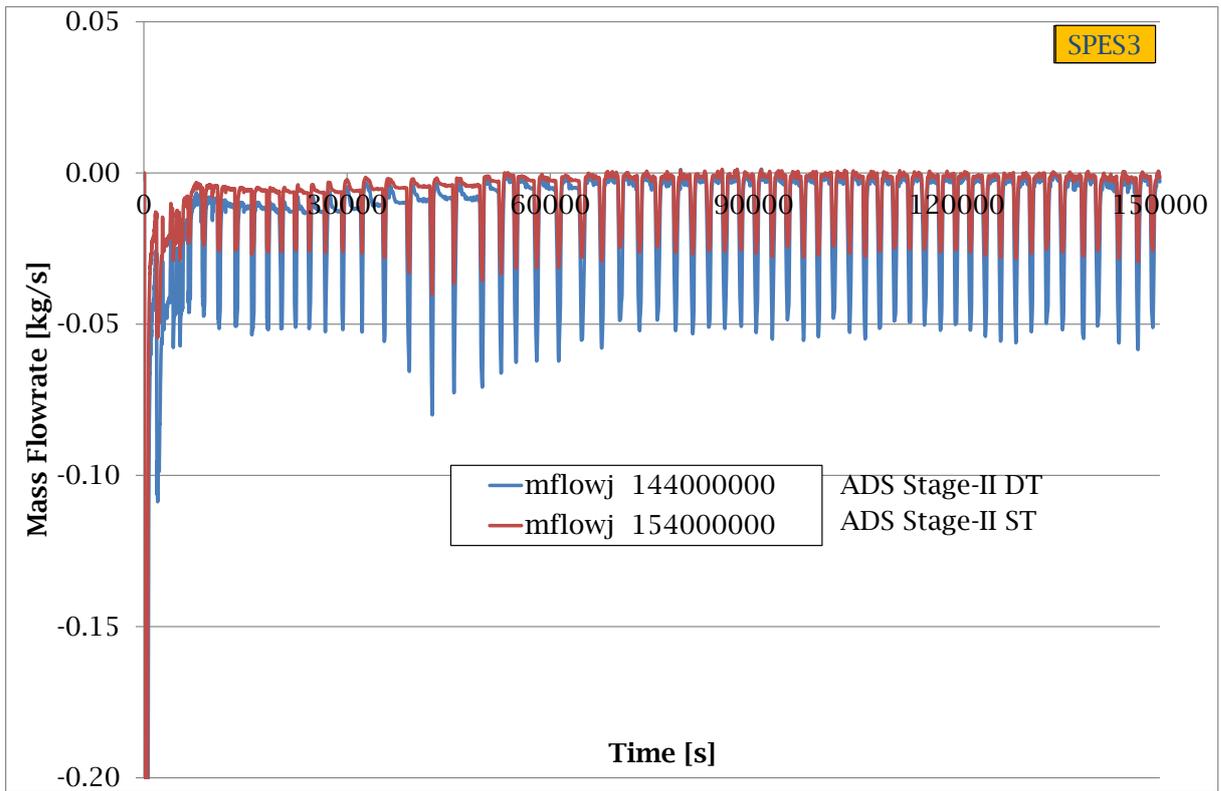


Fig. 6.133 – Portata ADS II stadio in SPES3.

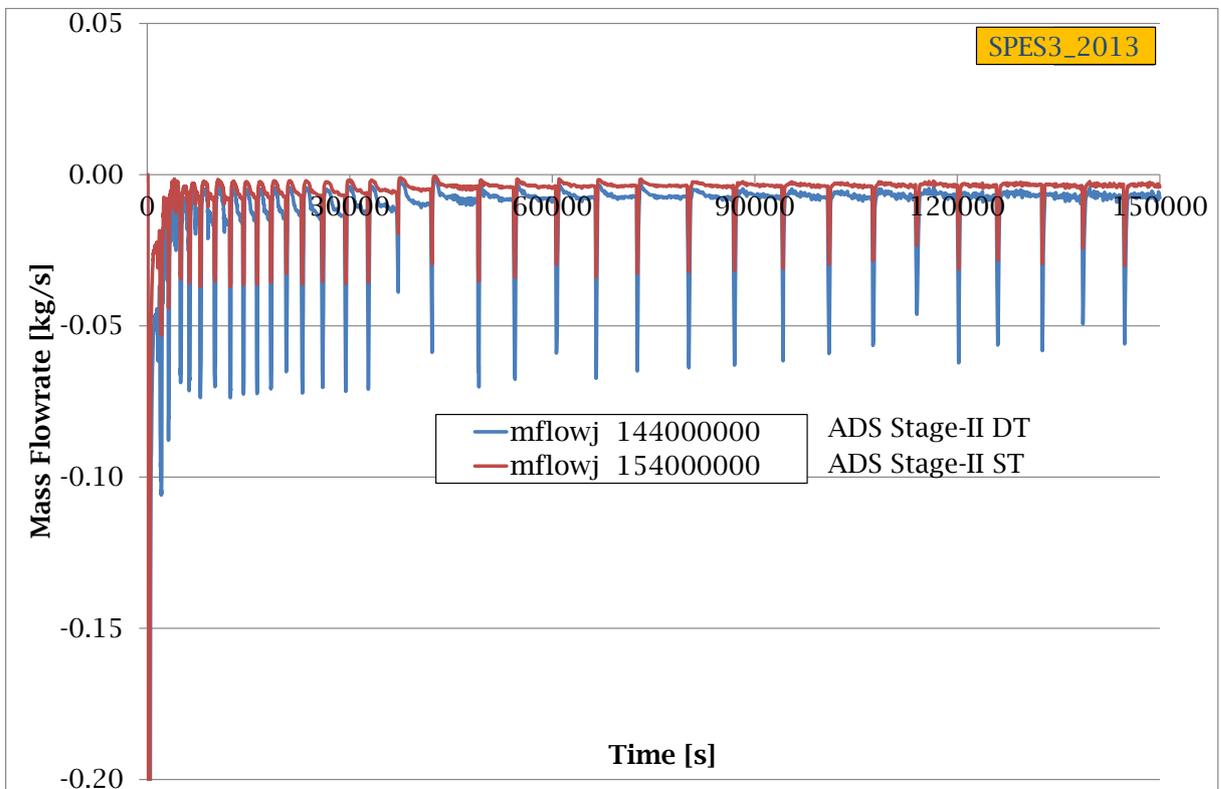


Fig. 6.134 – Portata ADS II stadio in SPES3_2013.

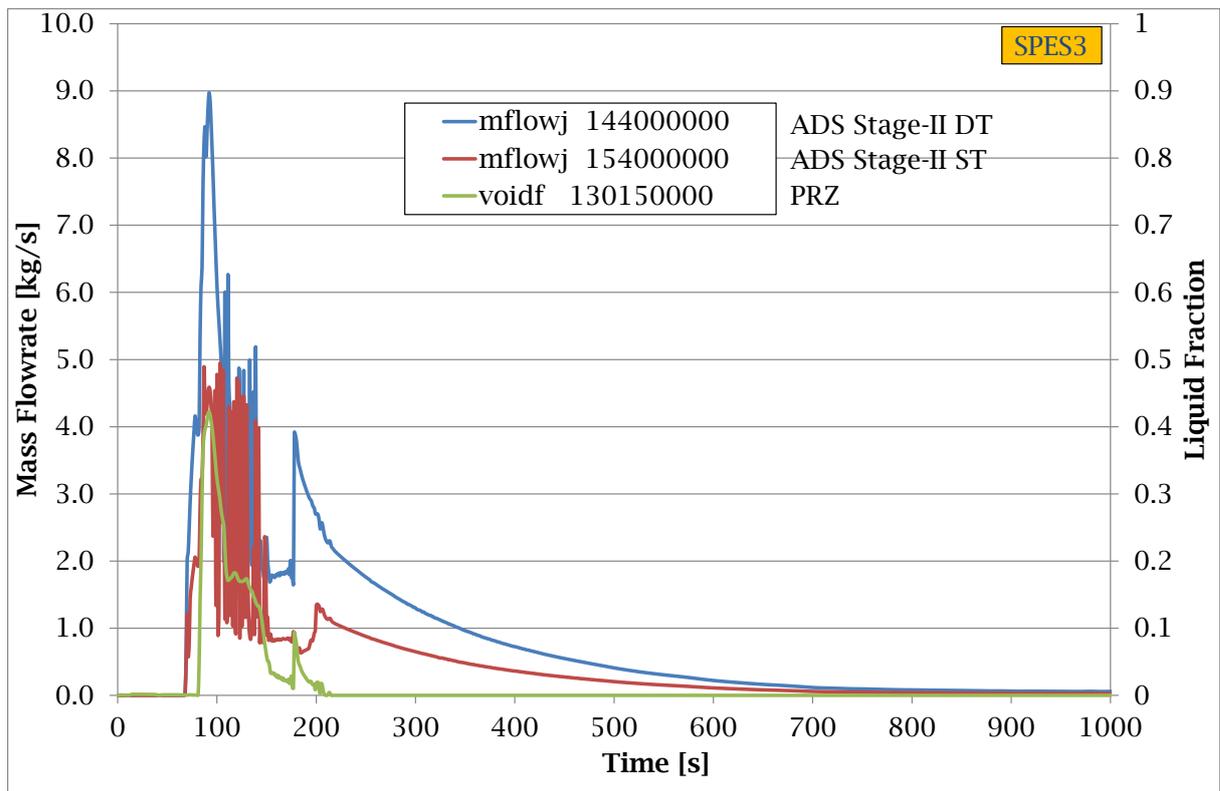


Fig. 6.135 – Portata ADS II stadio e grado di vuoto nel PRZ in SPES3.

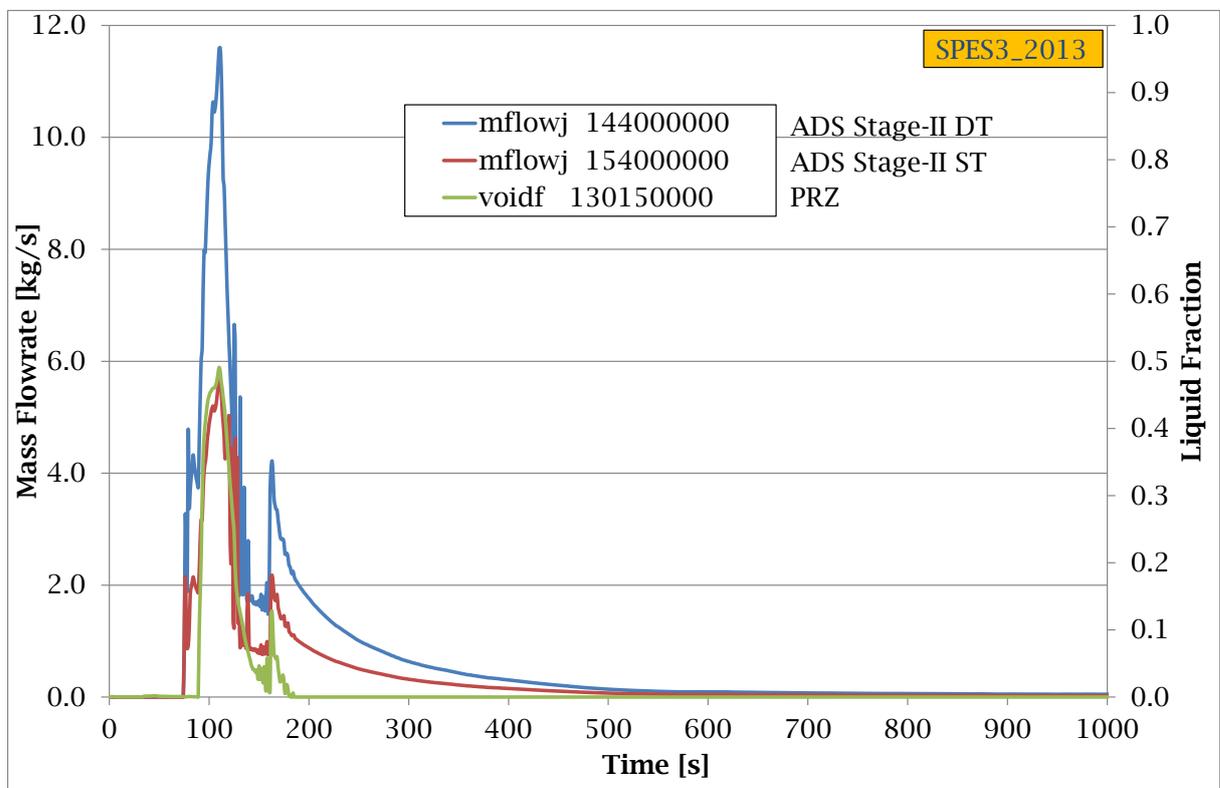


Fig. 6.136 – Portata ADS II stadio e grado di vuoto nel PRZ in SPES3_2013.

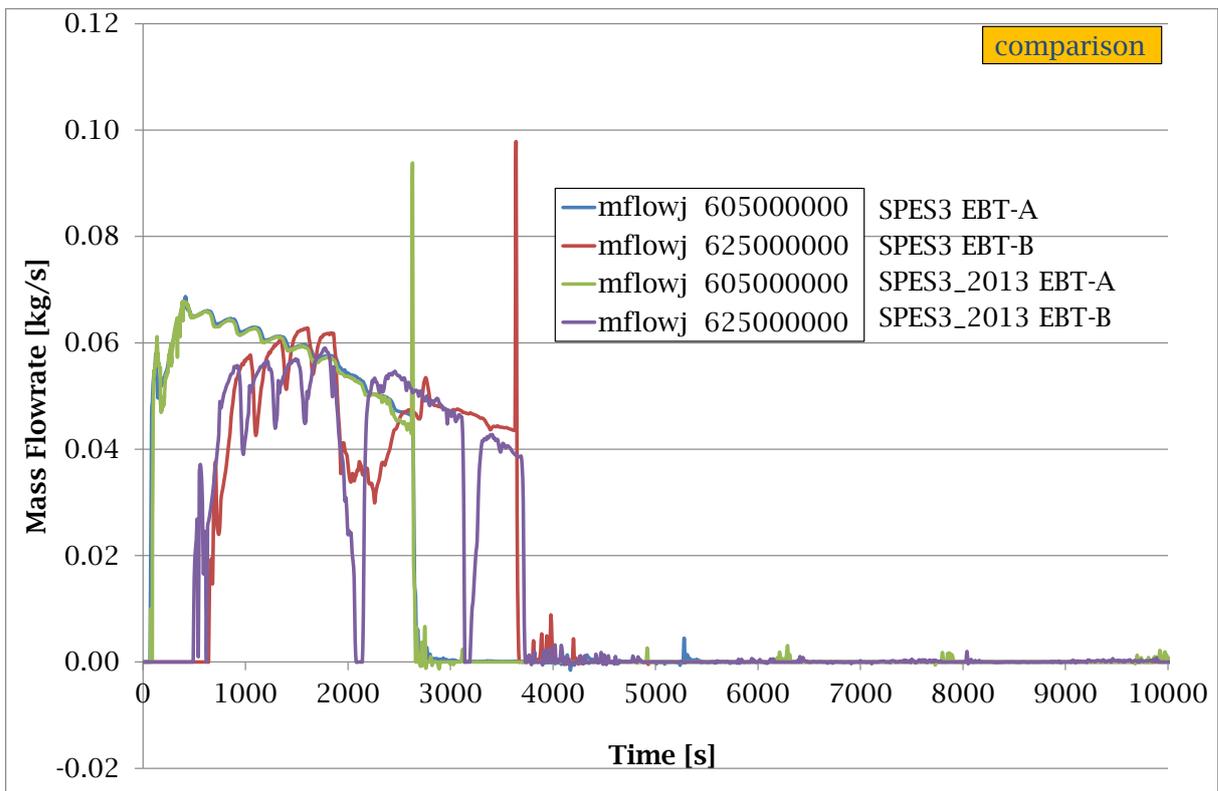


Fig. 6.137 – Portata iniettata dal sistema EBT A e B.

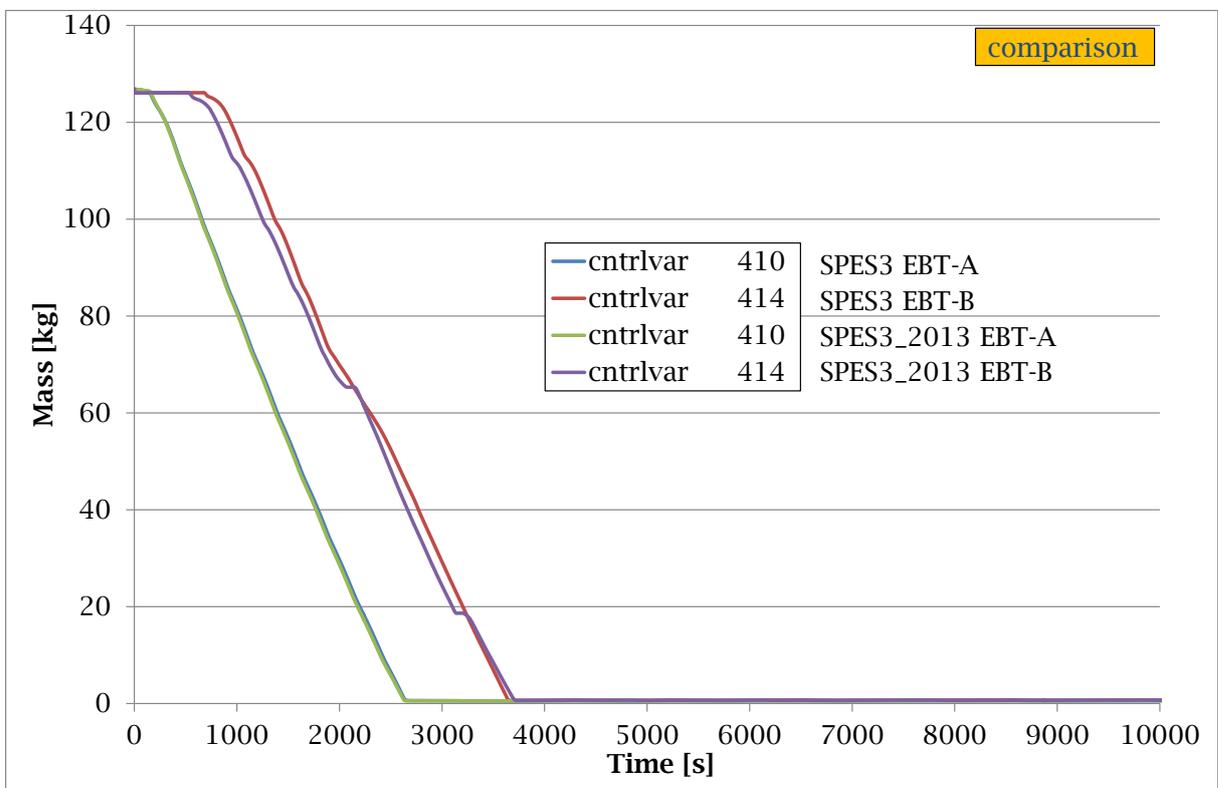


Fig. 6.138 – Inventario di massa del sistema EBT A e B.

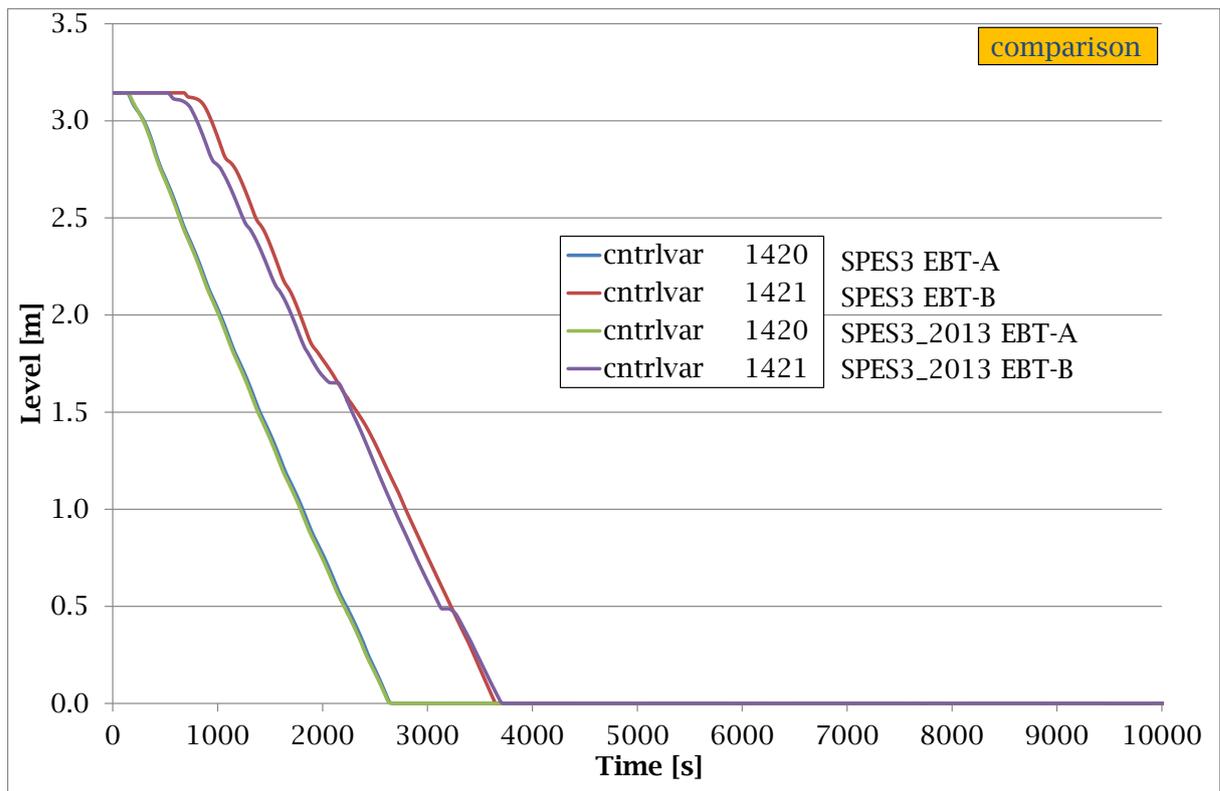


Fig. 6.139 – Livello di liquido nel sistema EBT A e B.

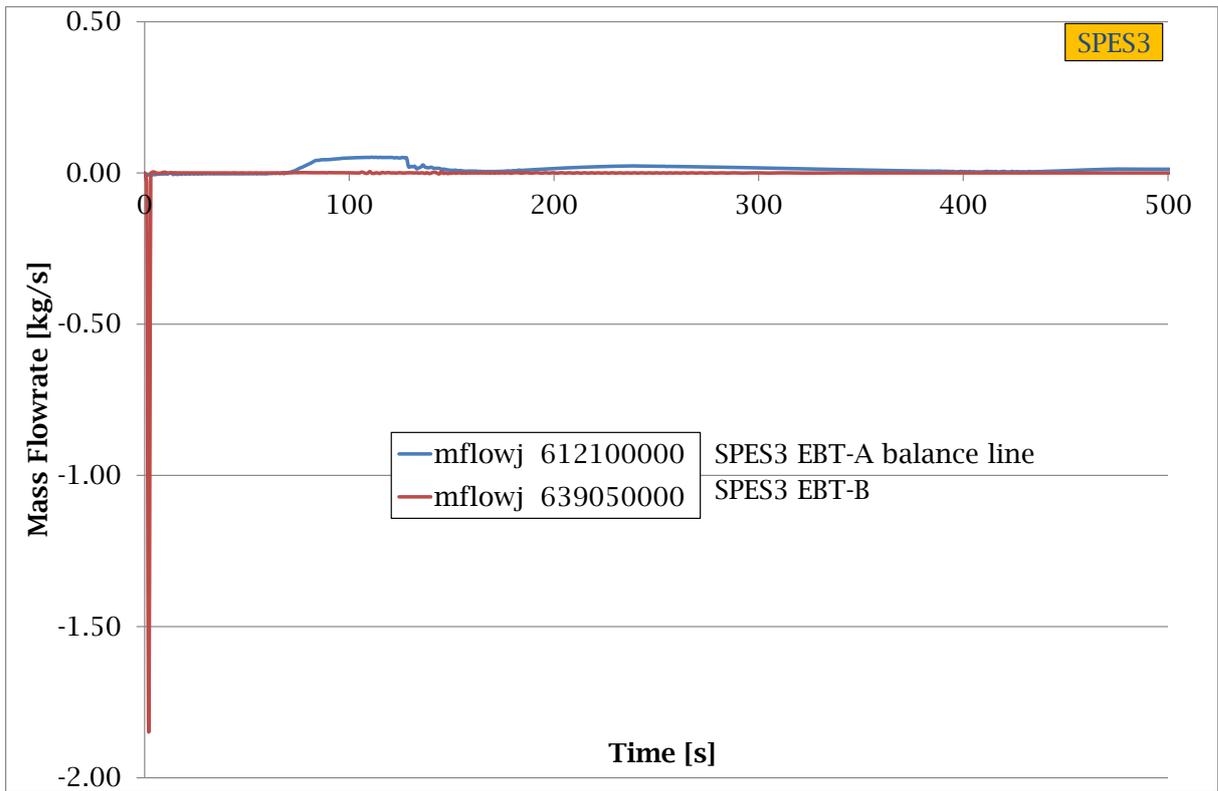


Fig. 6.140 – Portata nella “balance line” del sistema EBT A e B in SPES3 (part.).

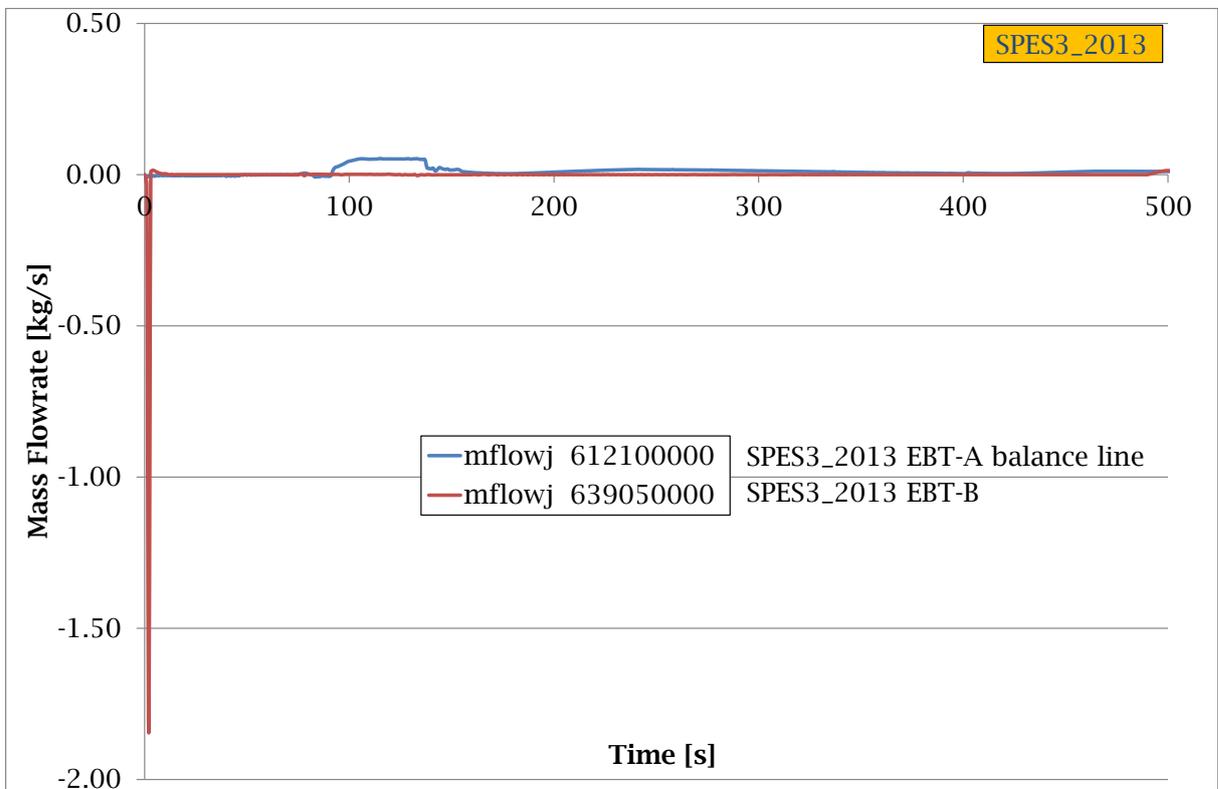


Fig. 6.141 – Portata nella “balance line” del sistema EBT A e B in SPES3_2013 (part.).

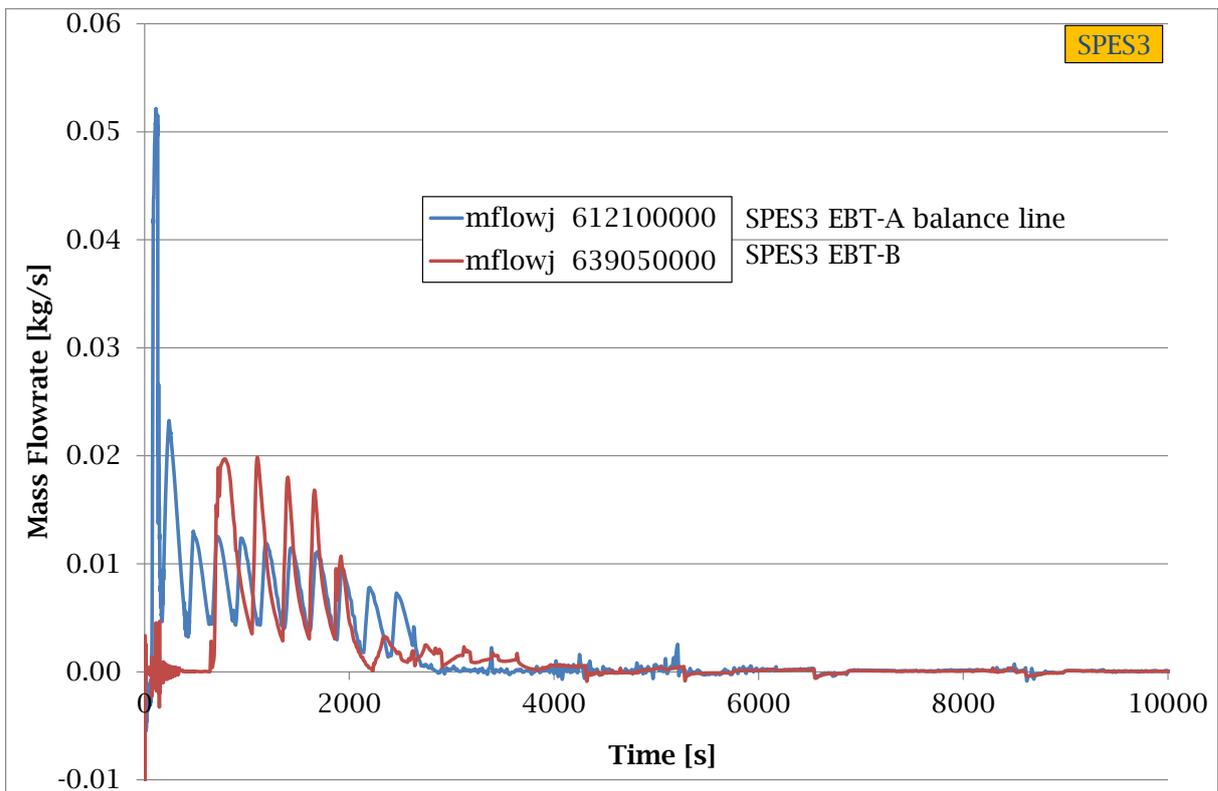


Fig. 6.142 – Portata nella “balance line” del sistema EBT A e B in SPES3.

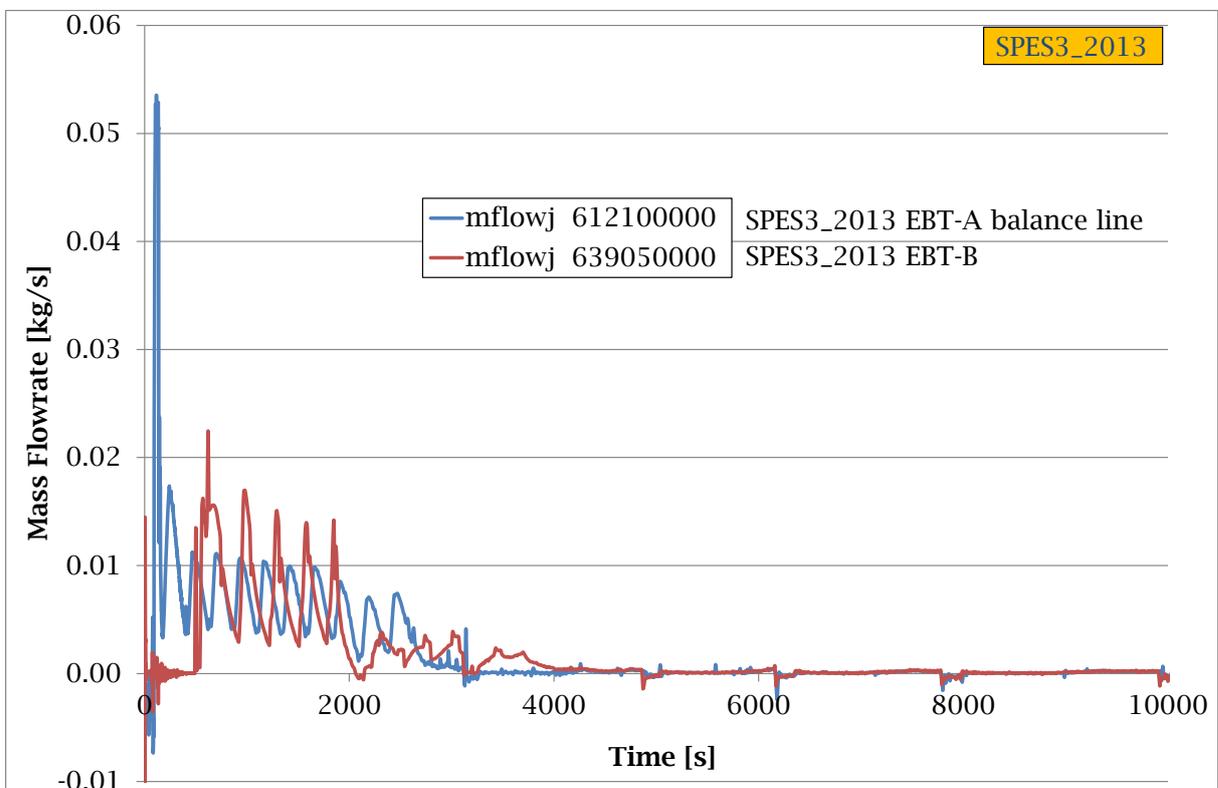


Fig. 6.143 – Portata nella “balance line” del sistema EBT A e B in SPES3_2013.

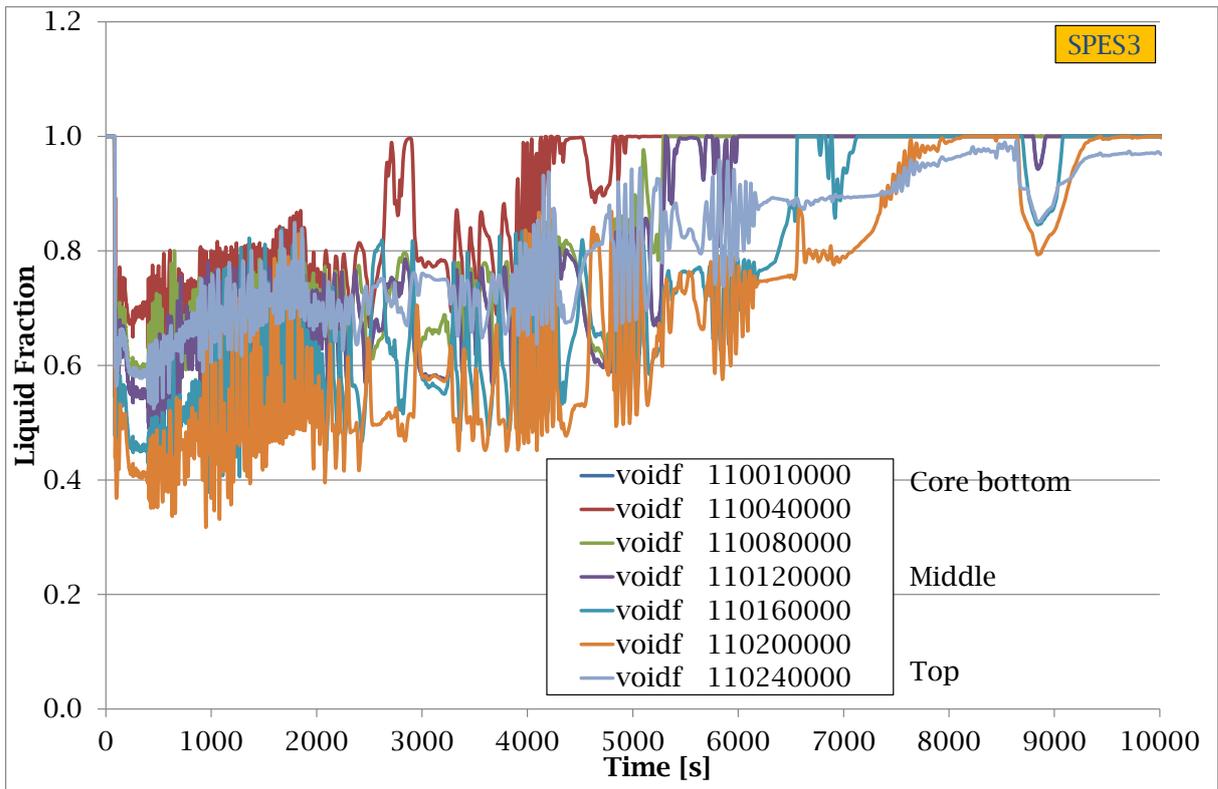


Fig. 6.144 – Grado di vuoto nel core in SPES3 (part.).

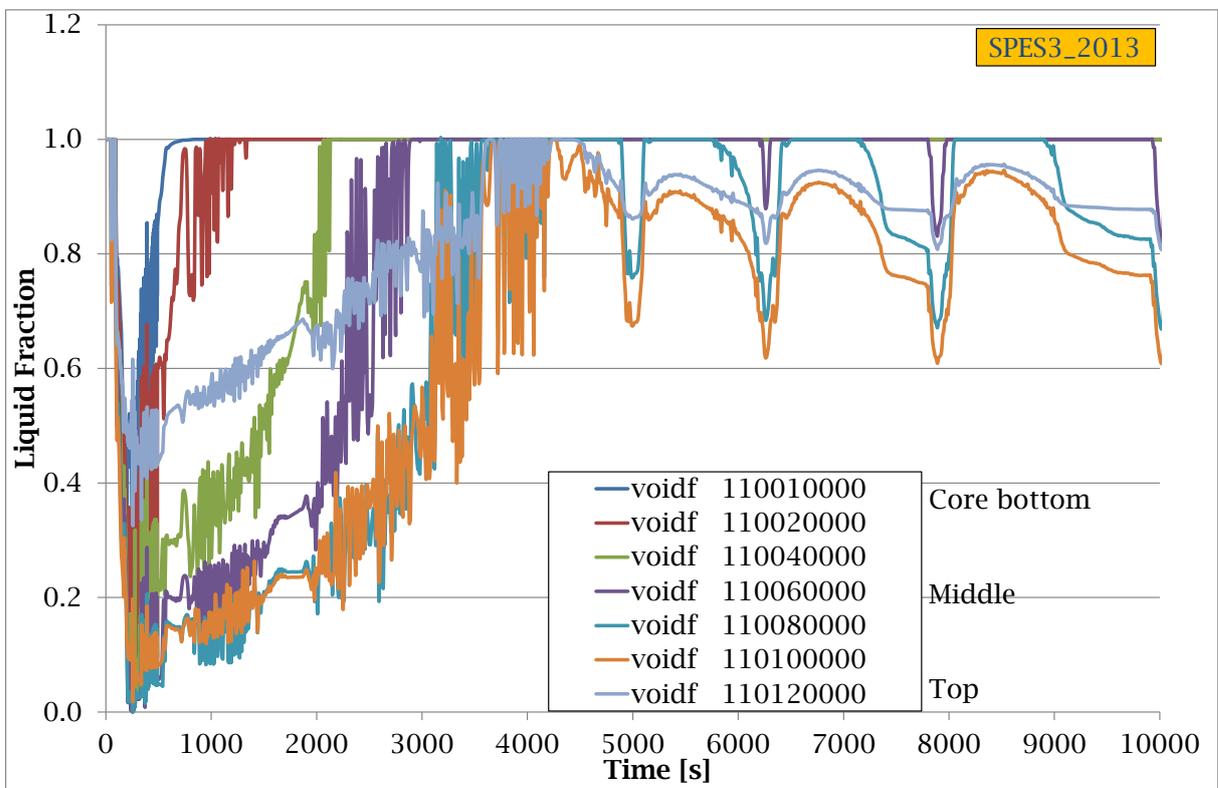


Fig. 6.145 – Grado di vuoto nel core in SPES3_2013 (part.).

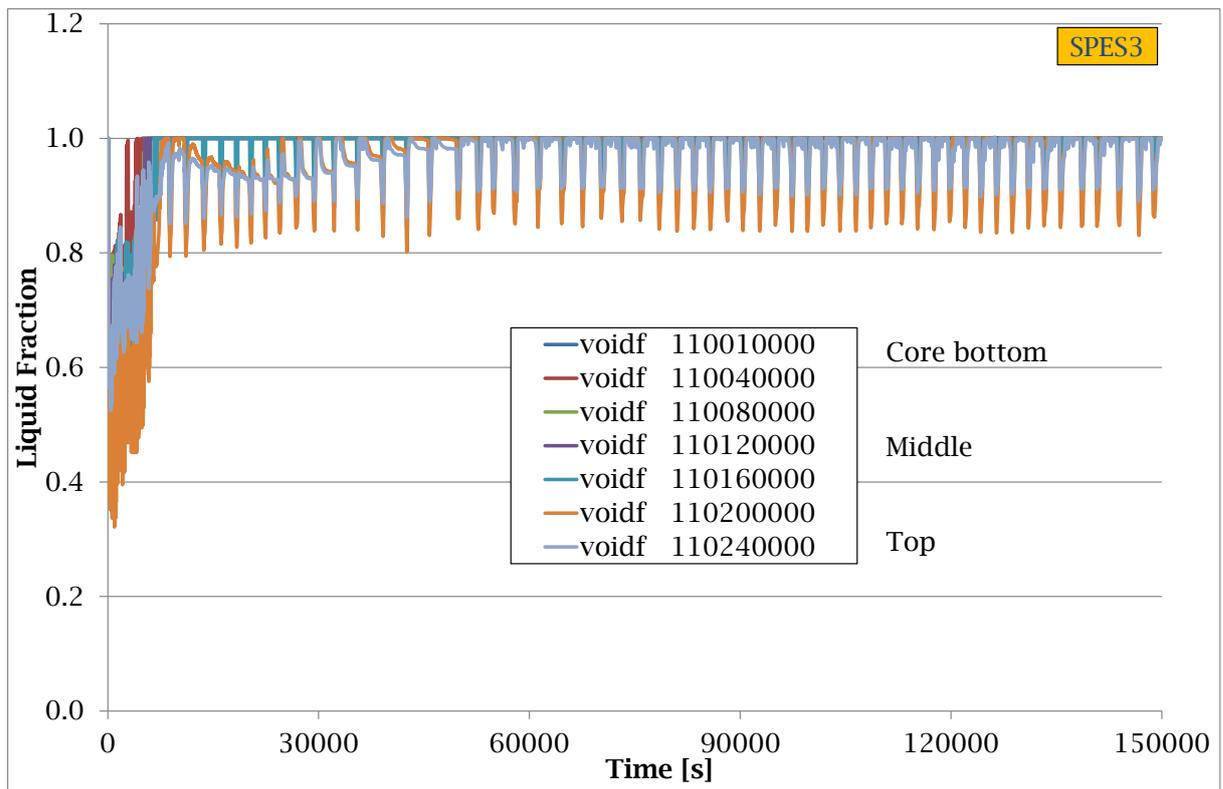


Fig. 6.146 – Grado di vuoto nel core in SPES3.

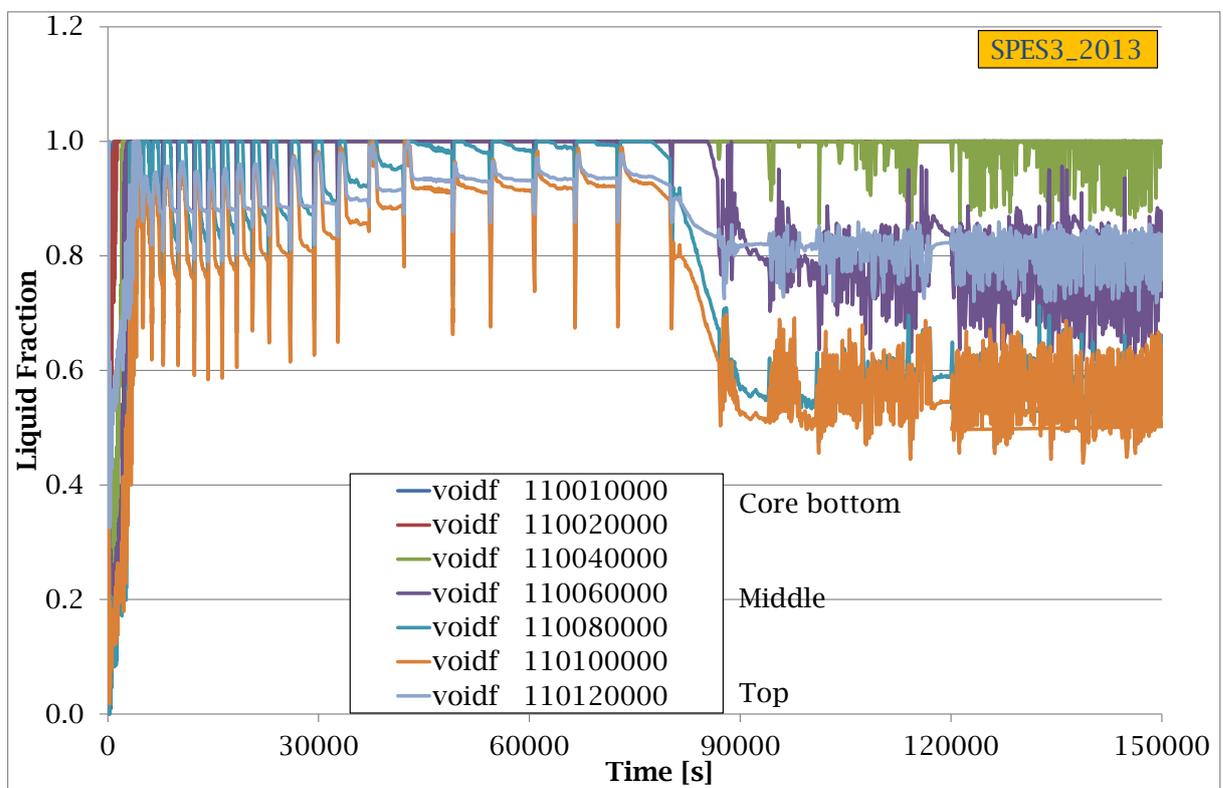


Fig. 6.147 – Grado di vuoto nel core in SPES3_2013.

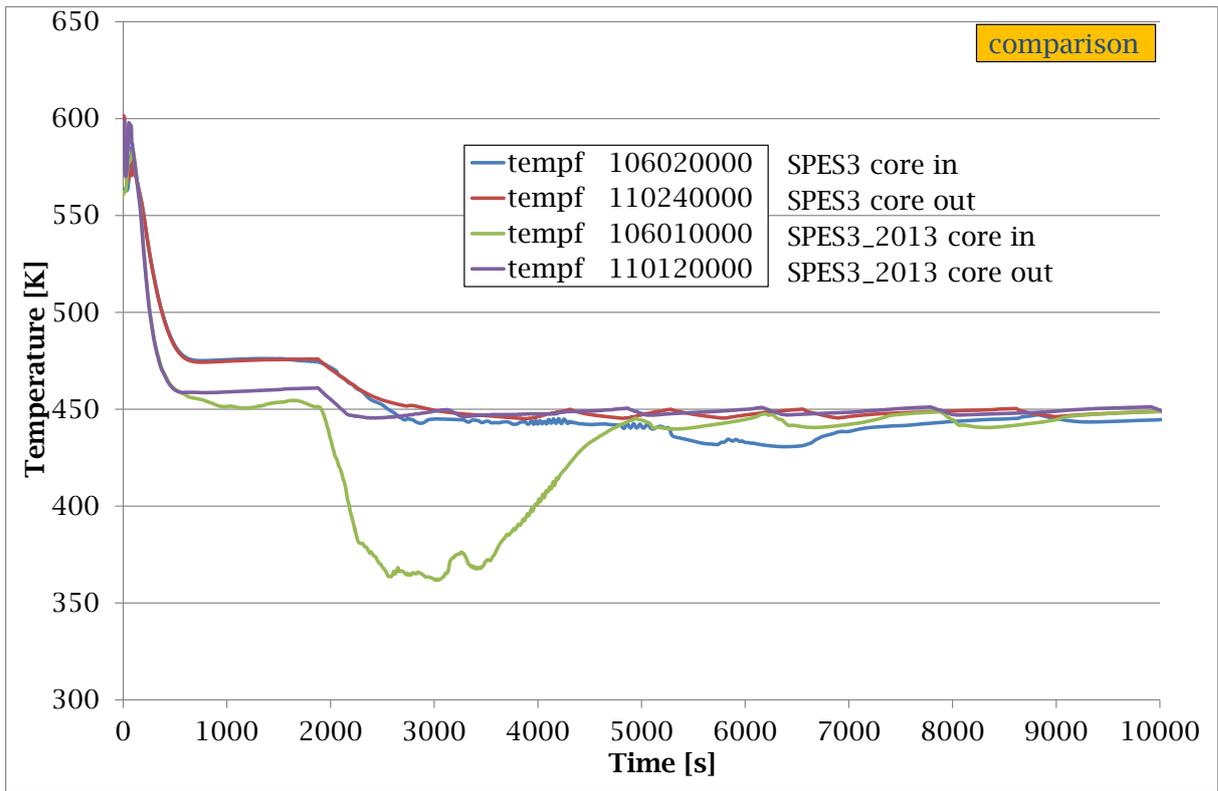


Fig. 6.148 – Temperatura del fluido ingresso uscita core (part.).

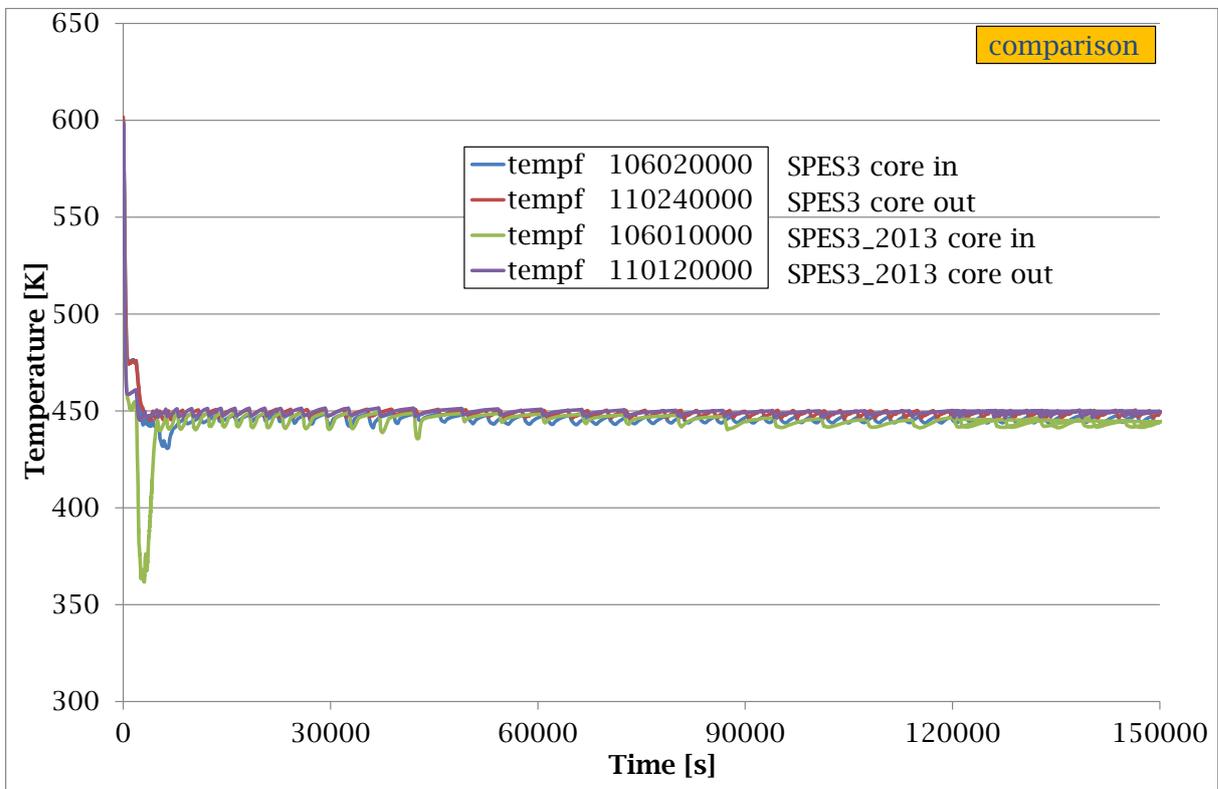


Fig. 6.149 – Temperatura del fluido ingresso uscita core.

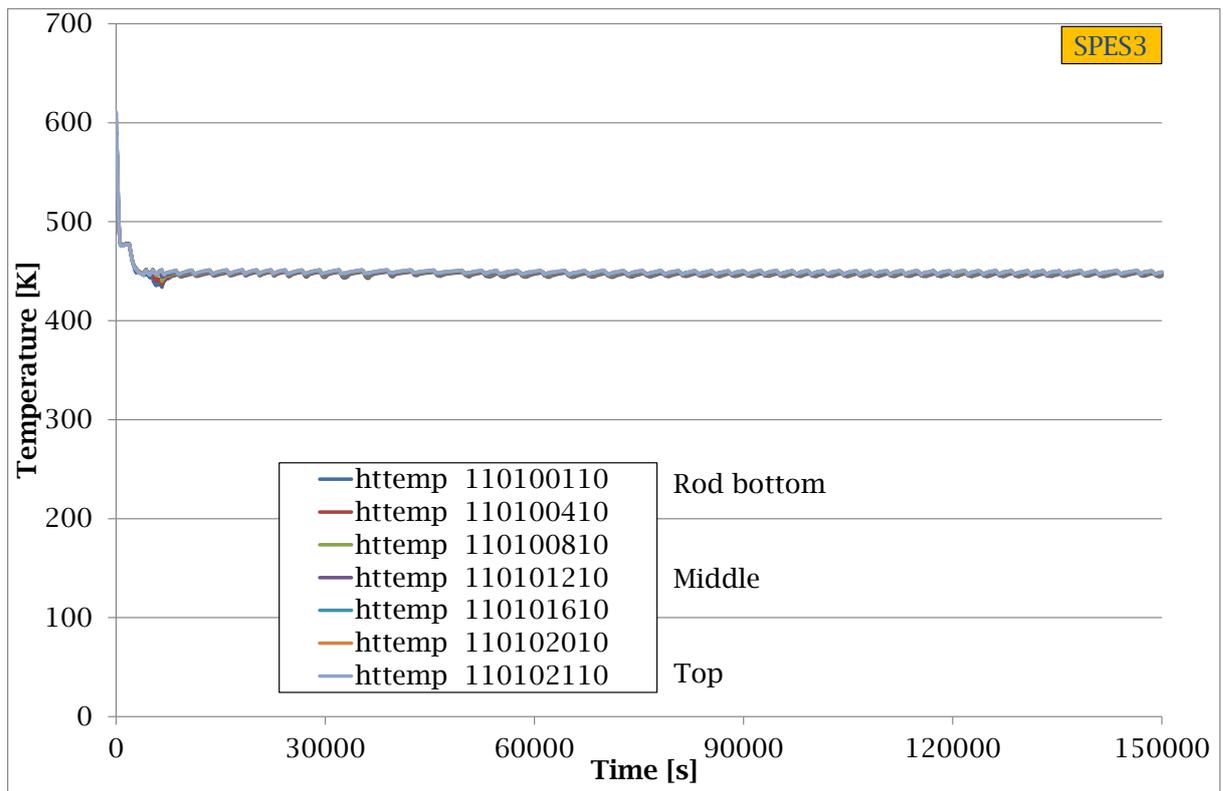


Fig. 6.150 – Temperatura del canale di potenza in SPES3.

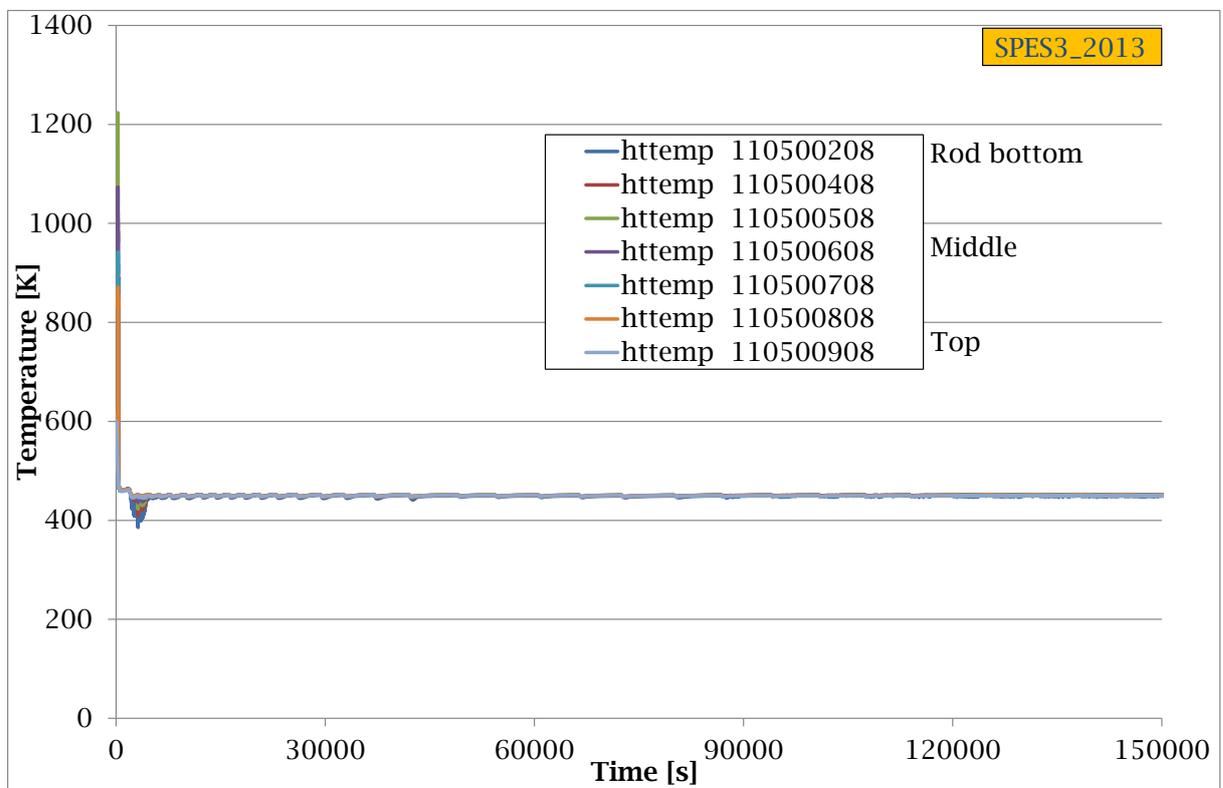


Fig. 6.151 – Temperatura del canale di potenza in SPES3_2013.

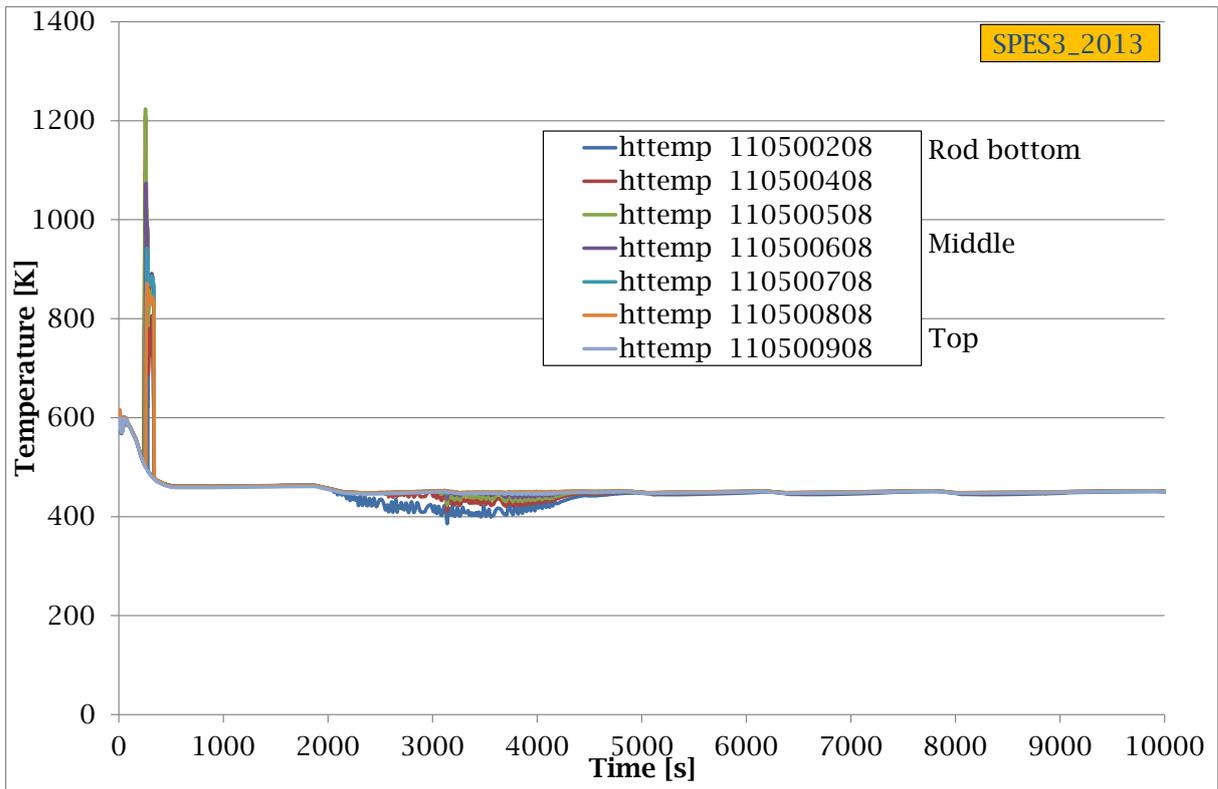


Fig. 6.152 – Temperatura del canale di potenza in SPES3_2013 (part.).

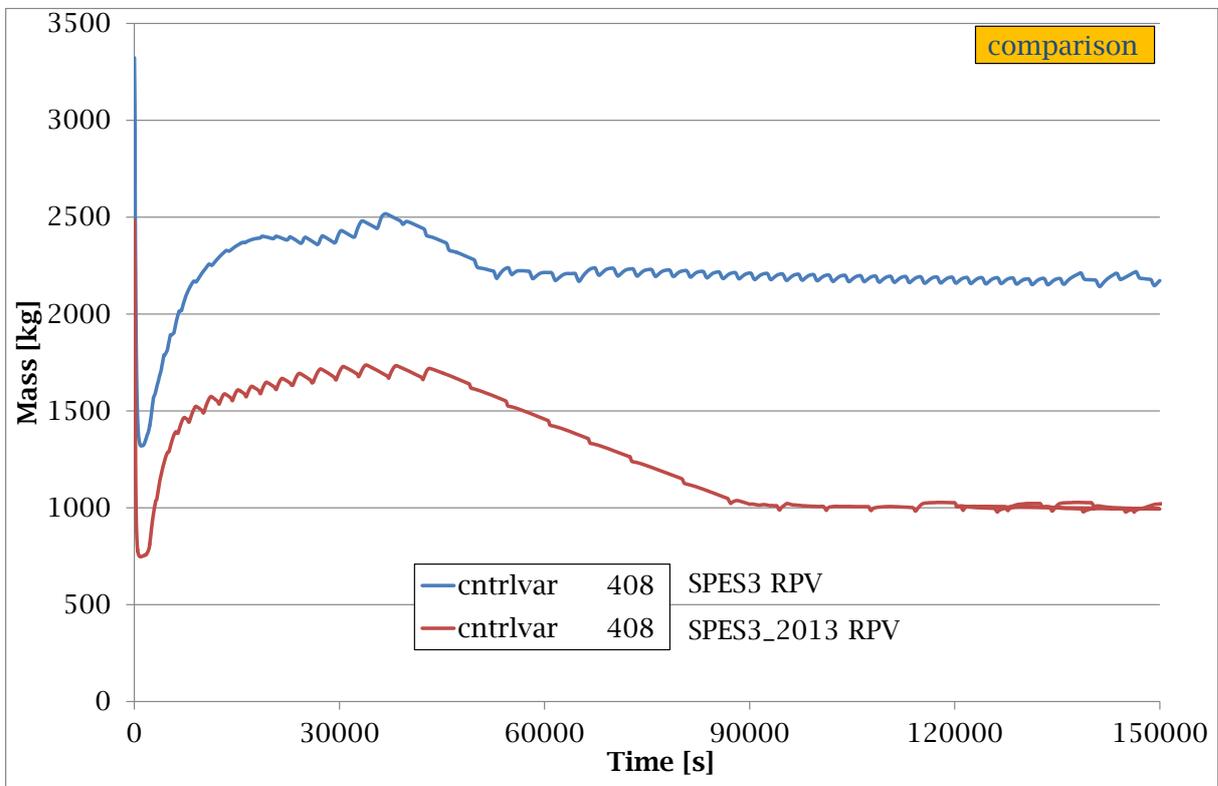


Fig. 6.153 – Inventario di massa nel RPV.

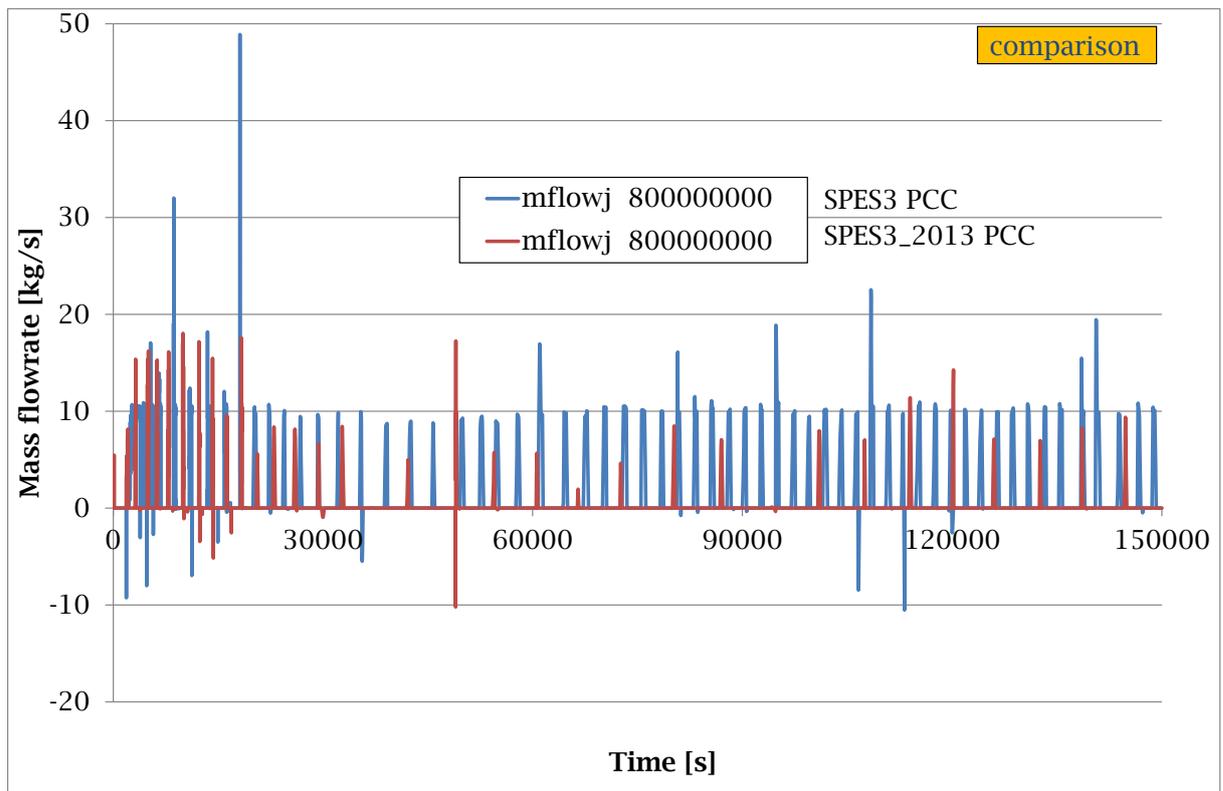


Fig. 6.154 – Portata attraverso il sistema PCC.

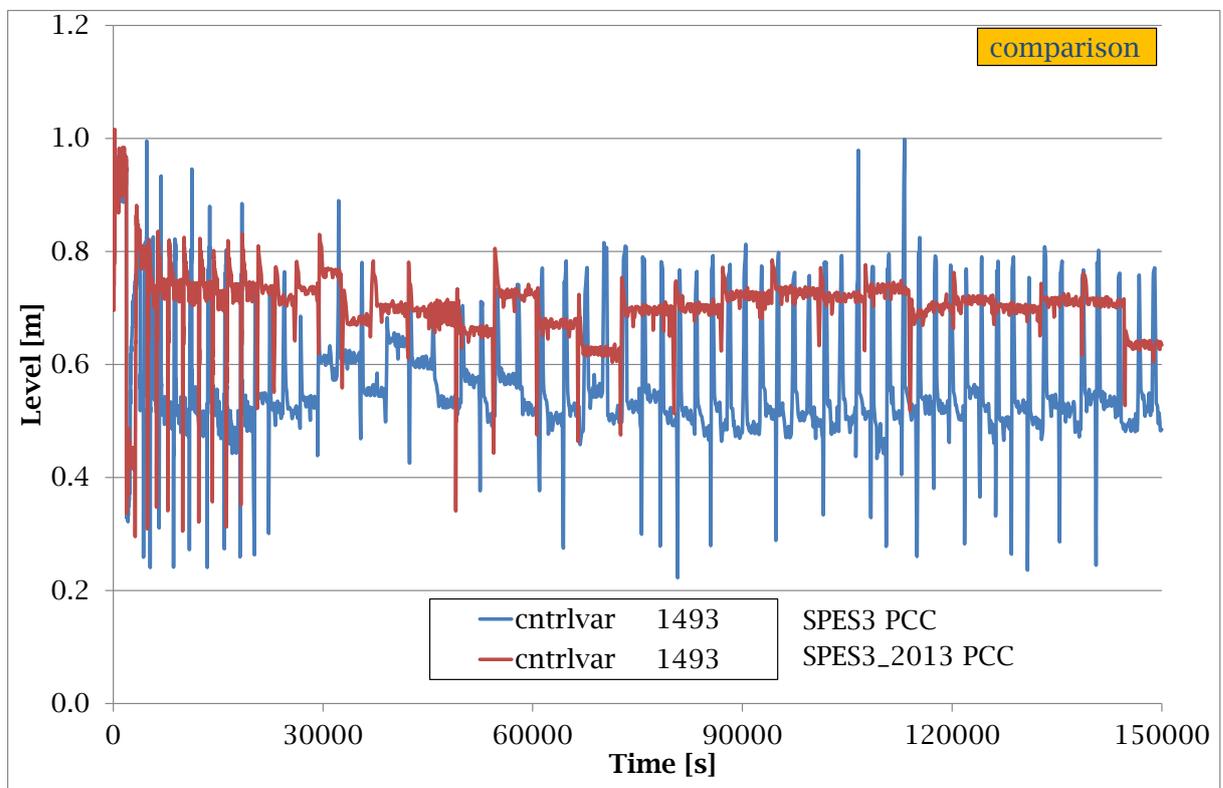


Fig. 6.155 – Livello di liquido nel sistema PCC.

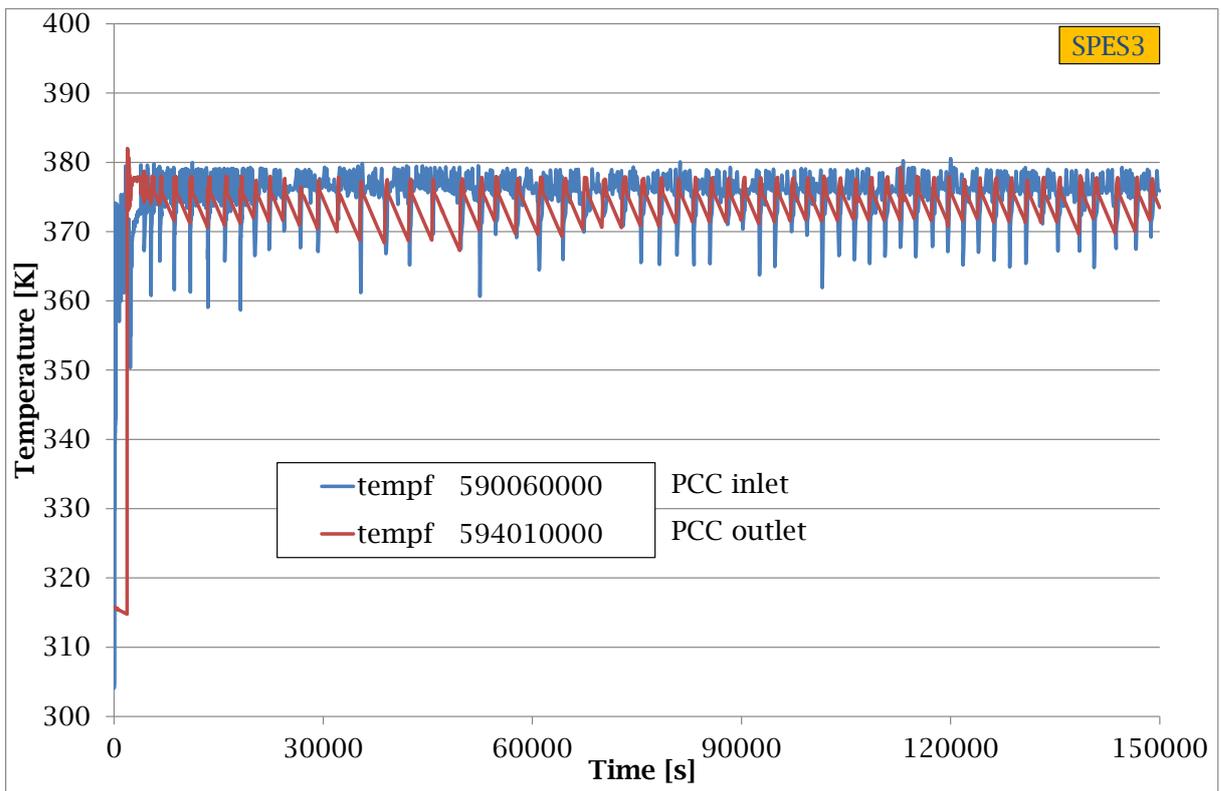


Fig. 6.156 – Temperatura fluido ingresso uscita dal sistema PCC in SPES3.

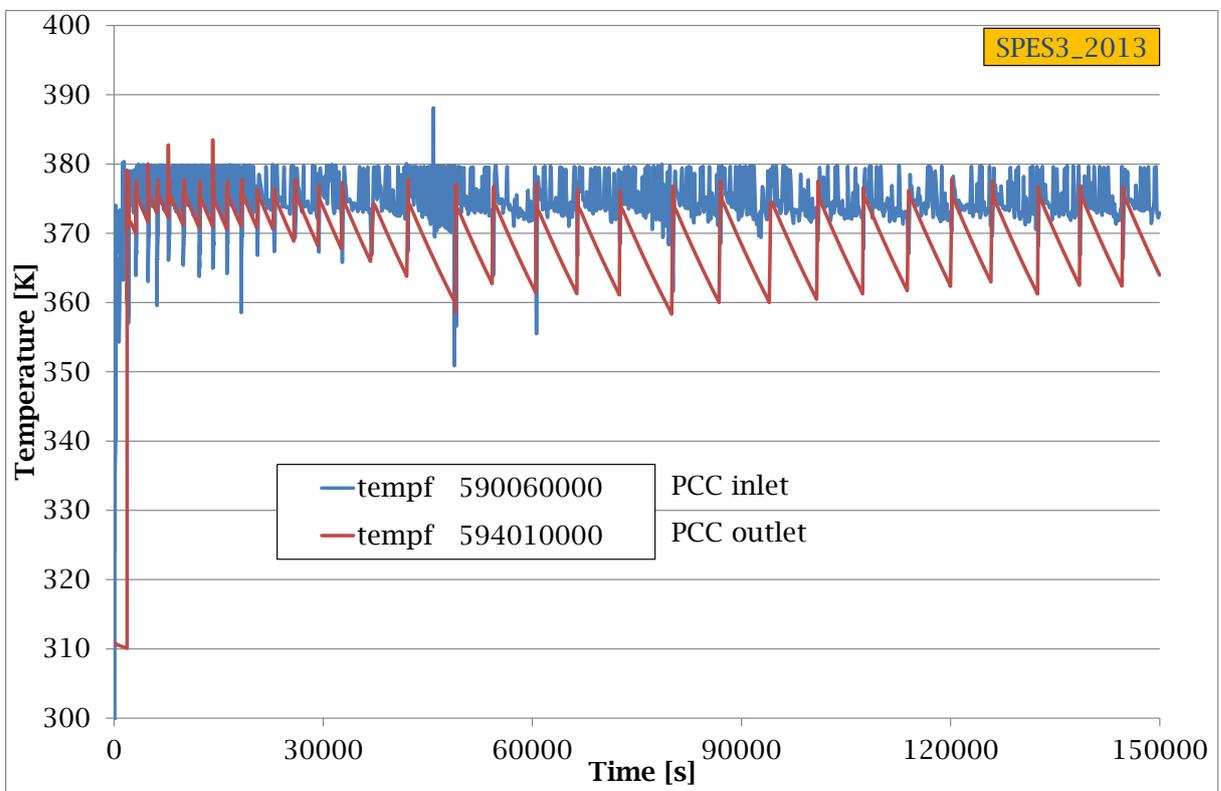


Fig. 6.157 – Temperatura fluido ingresso uscita dal sistema PCC in SPES3_2013.

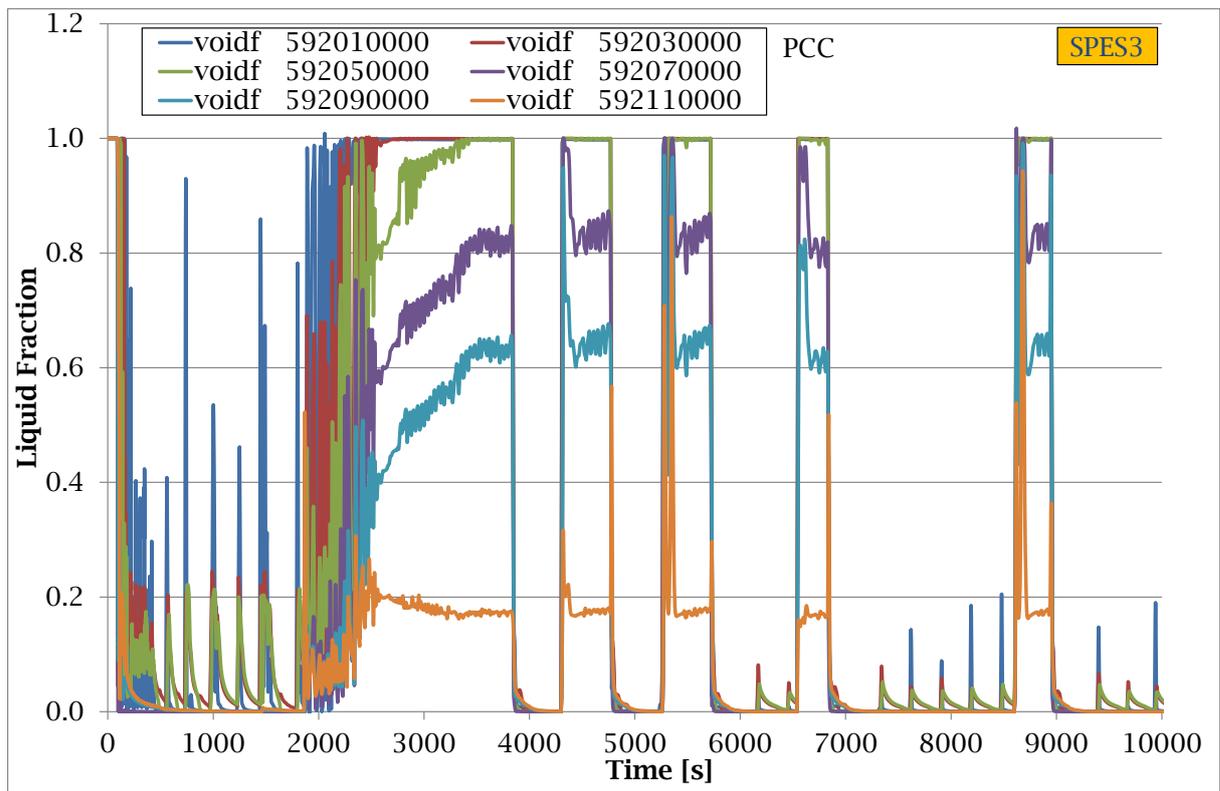


Fig. 6.158 – Gradi di vuoto del fluido del sistema PCC in SPES3 (part.).

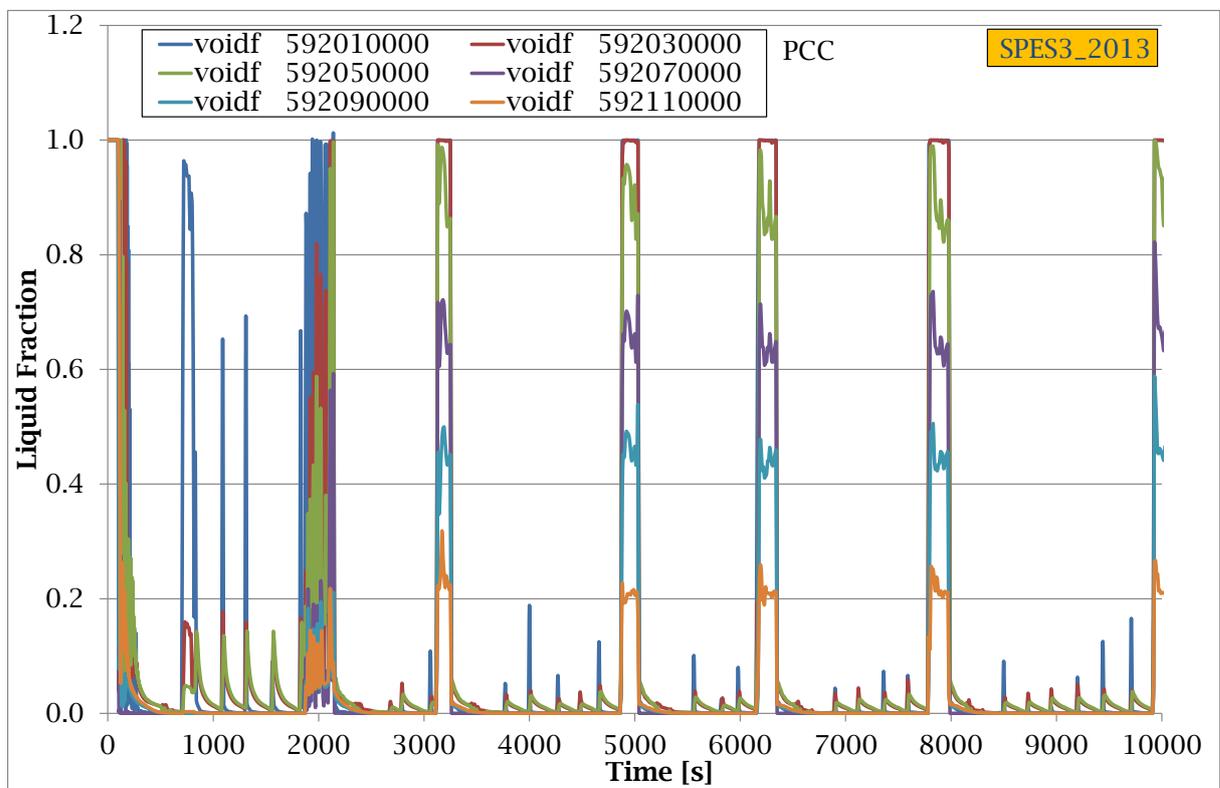


Fig. 6.159 – Gradi di vuoto del fluido del sistema PCC in SPES3_2013 (part.).

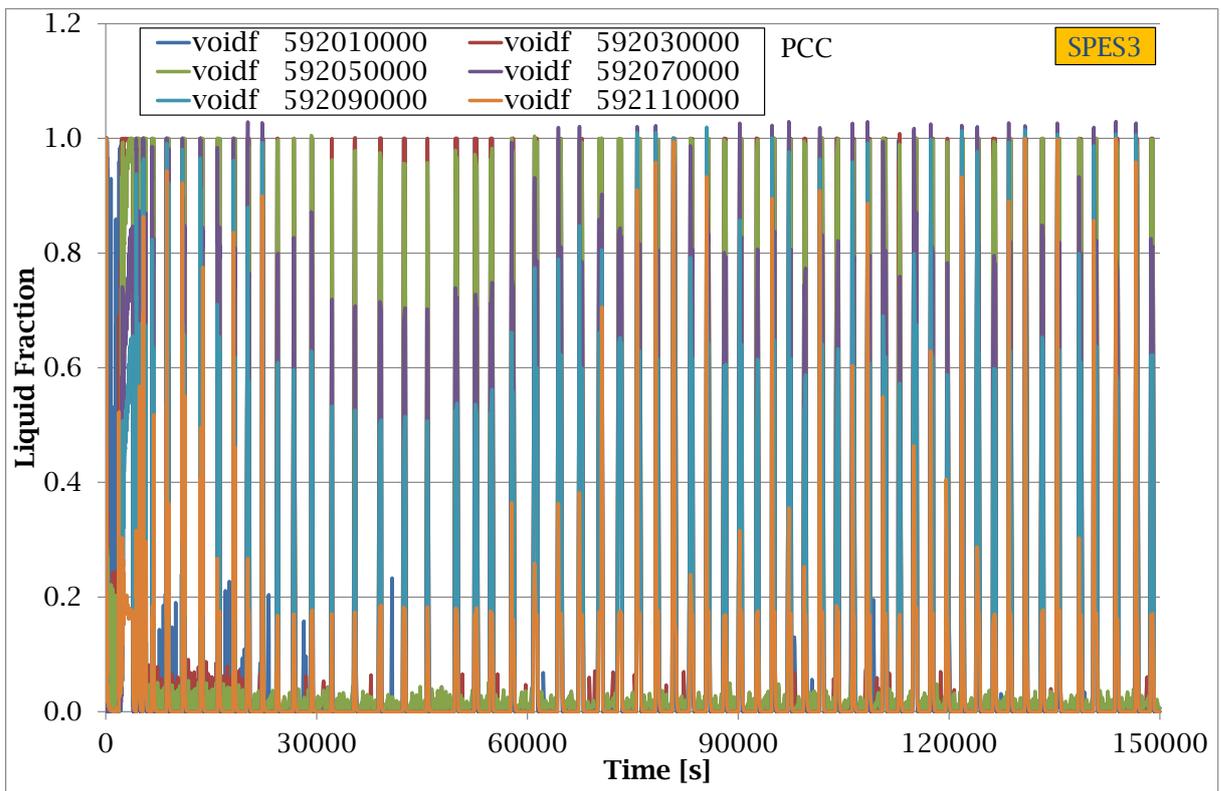


Fig. 6.160 – Gradi di vuoto del fluido del sistema PCC in SPES3.

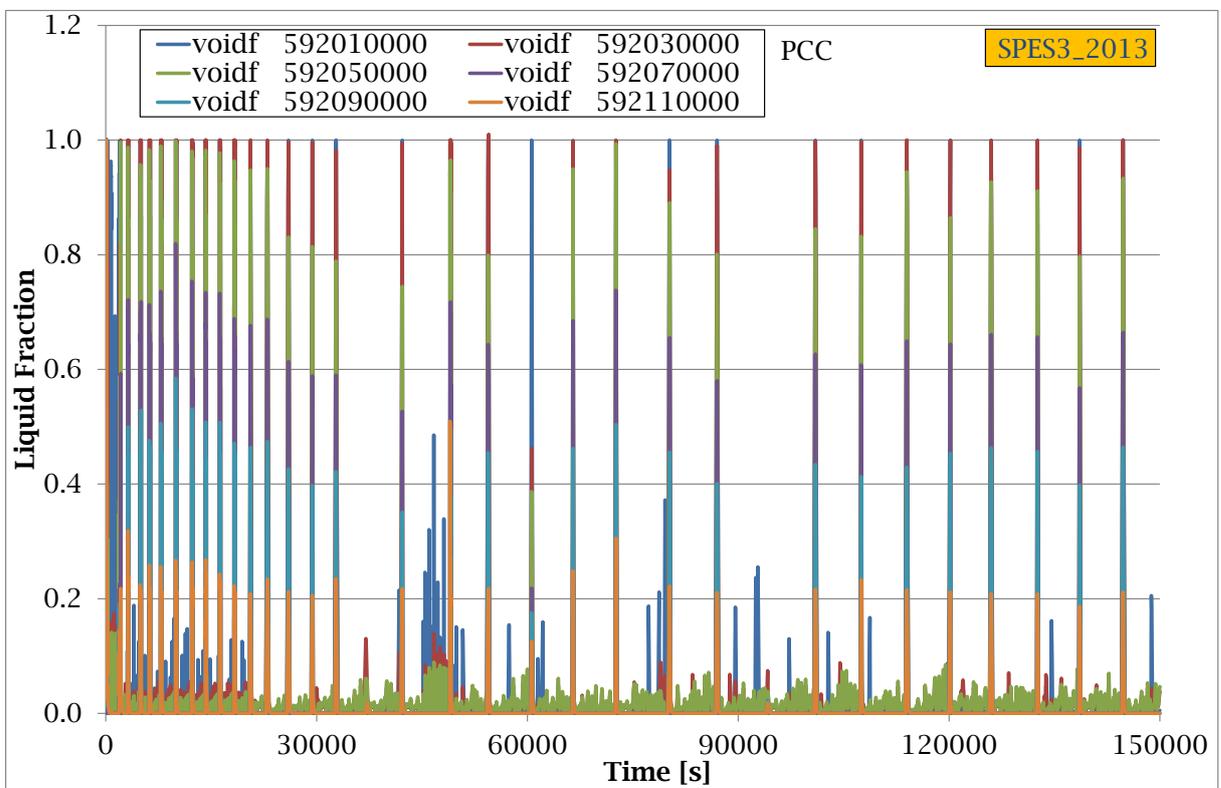


Fig. 6.161 – Gradi di vuoto del fluido del sistema PCC in SPES3_2013.

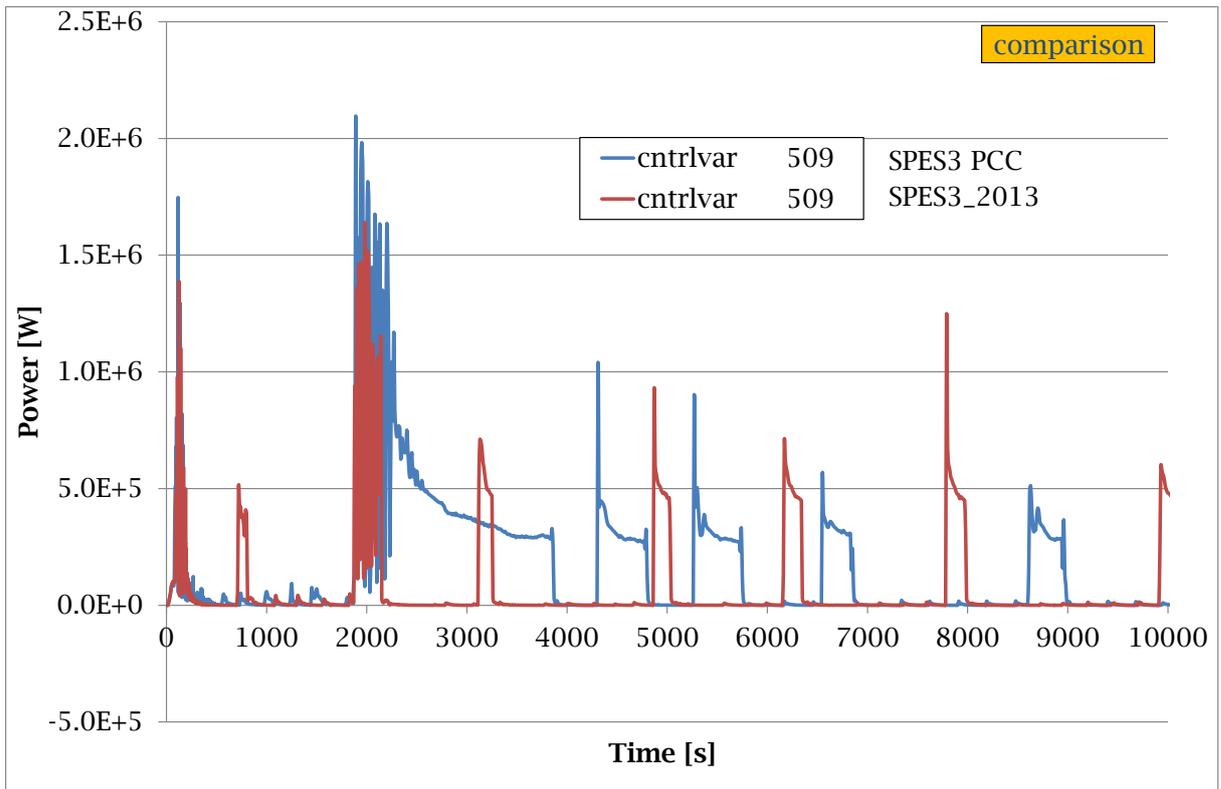


Fig. 6.162 – Potenza asportata dal sistema PCC (part.).

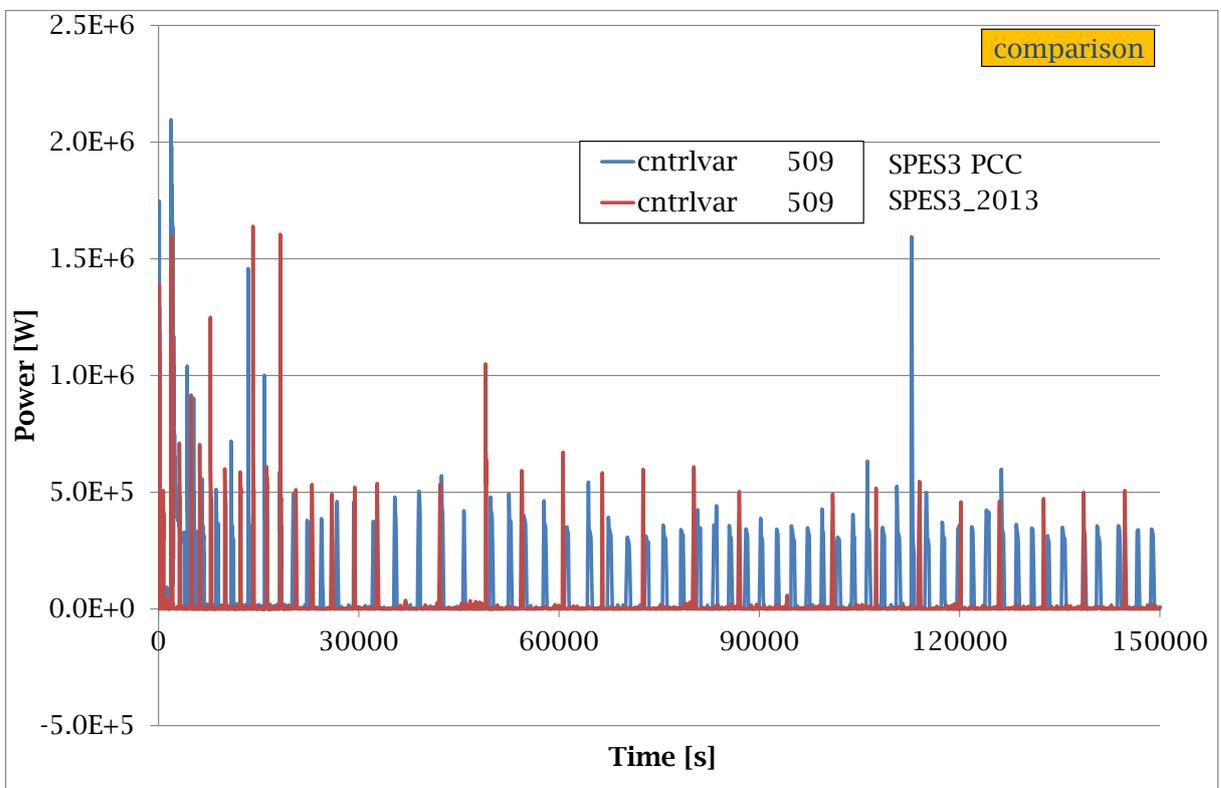


Fig. 6.163 – Potenza asportata dal sistema PCC.

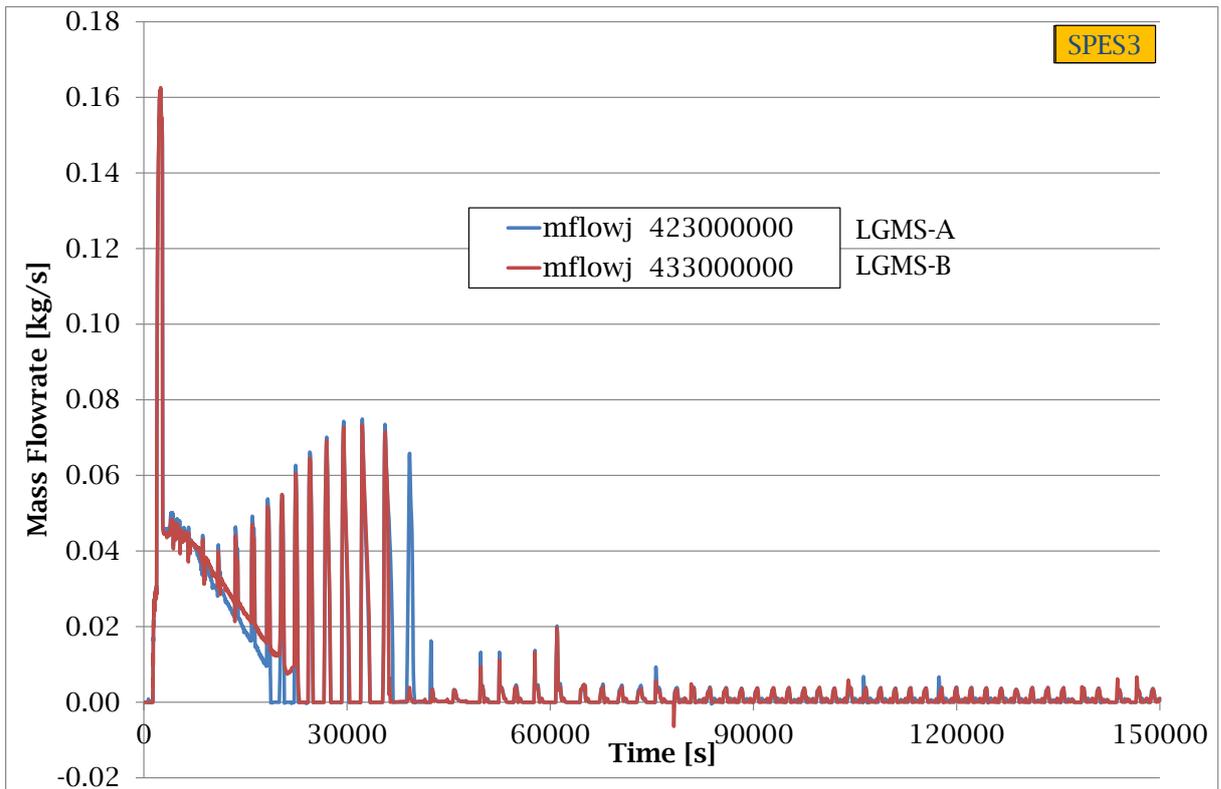


Fig. 6.164 – Portata iniettata dal sistema LGMS - A e B in SPES3.

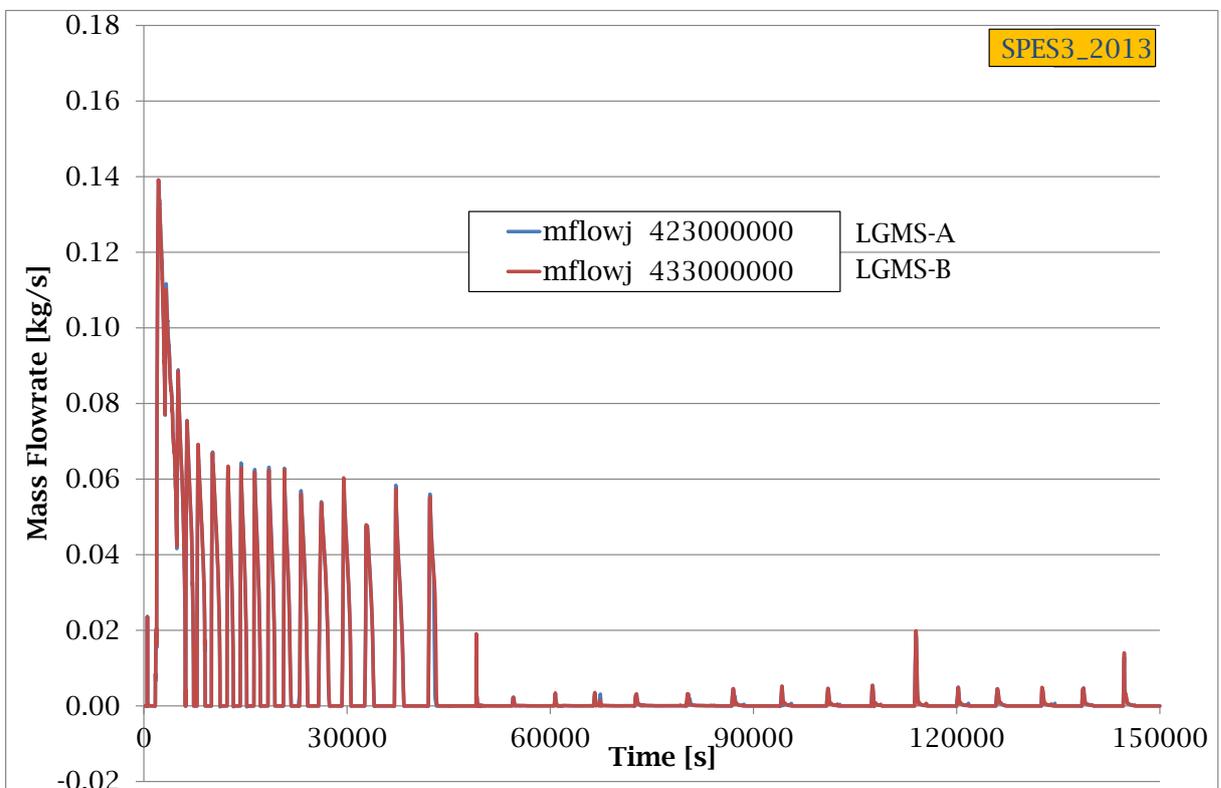


Fig. 6.165 – Portata iniettata dal sistema LGMS - A e B in SPES3_2013.

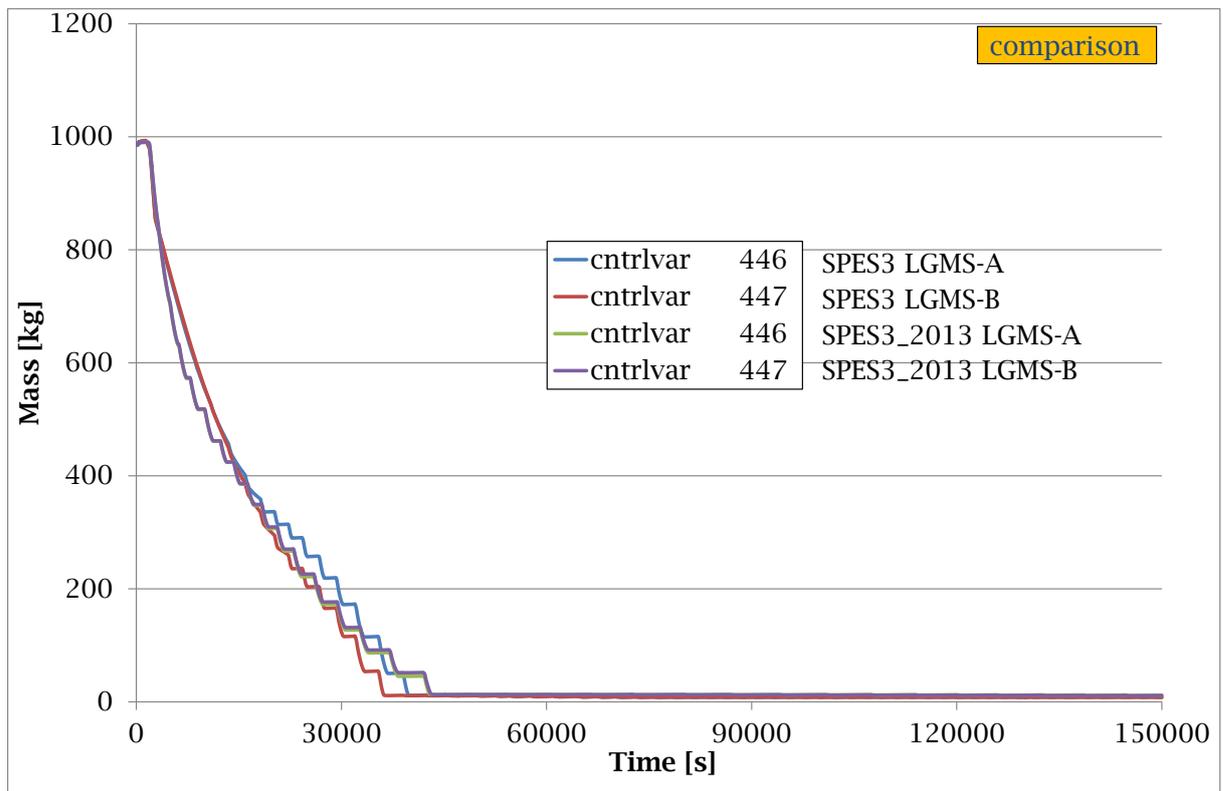


Fig. 6.166 – Inventario di massa nel sistema LGMS - A e B.

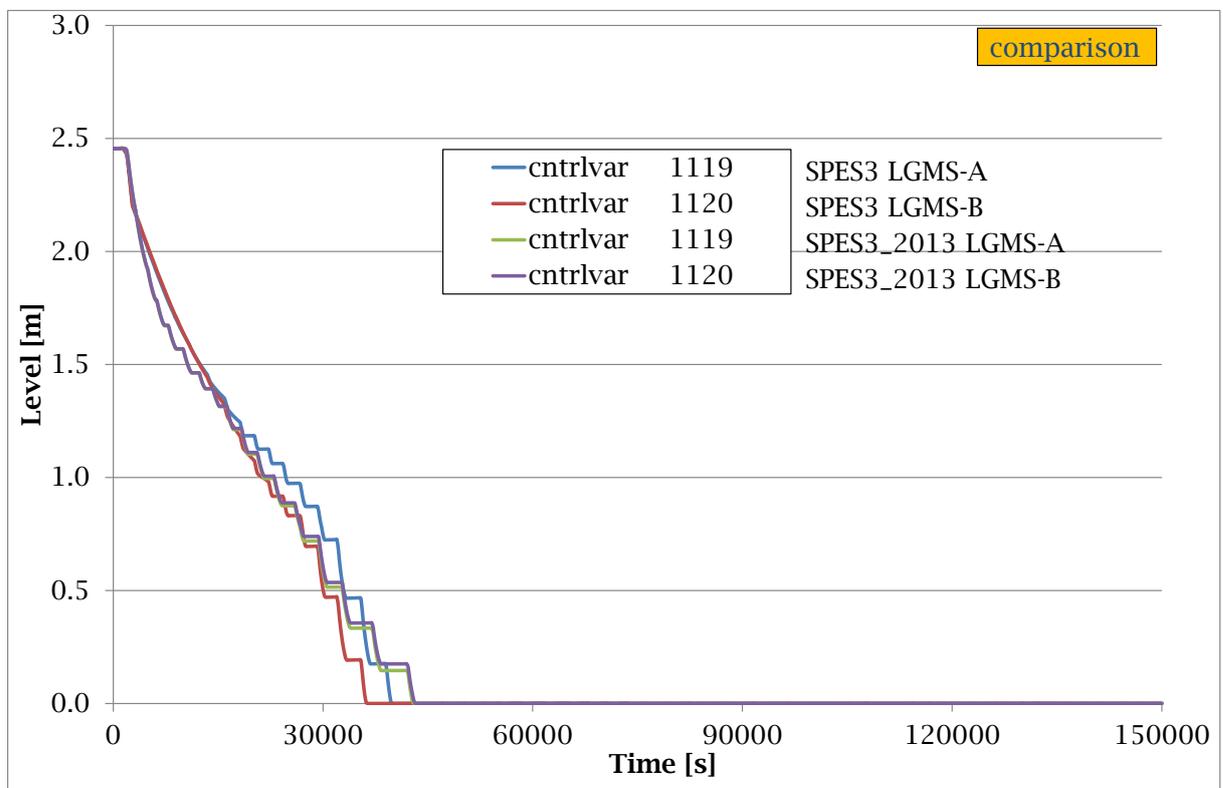


Fig. 6.167 – Livello di liquido nel sistema LGMS - A e B.

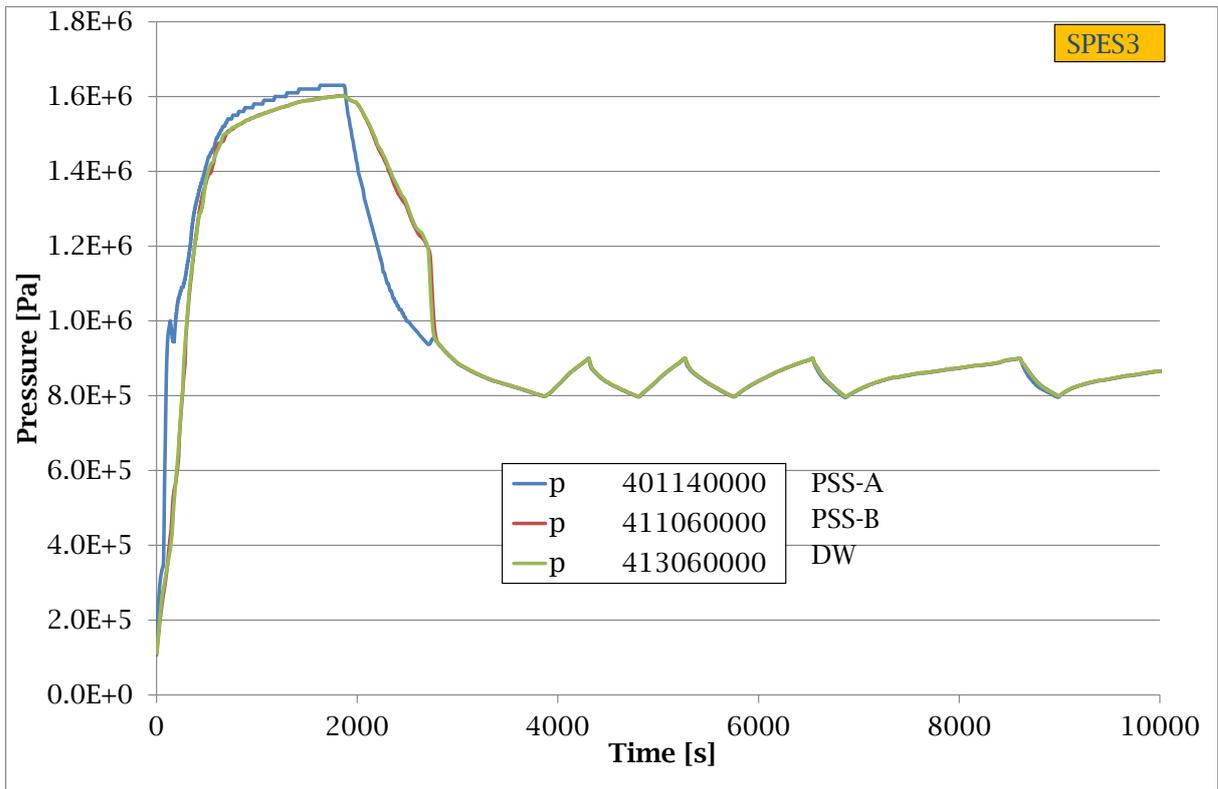


Fig. 6.168 – Pressione nel sistema PSS - A e B e nel DW in SPES3 (part.).

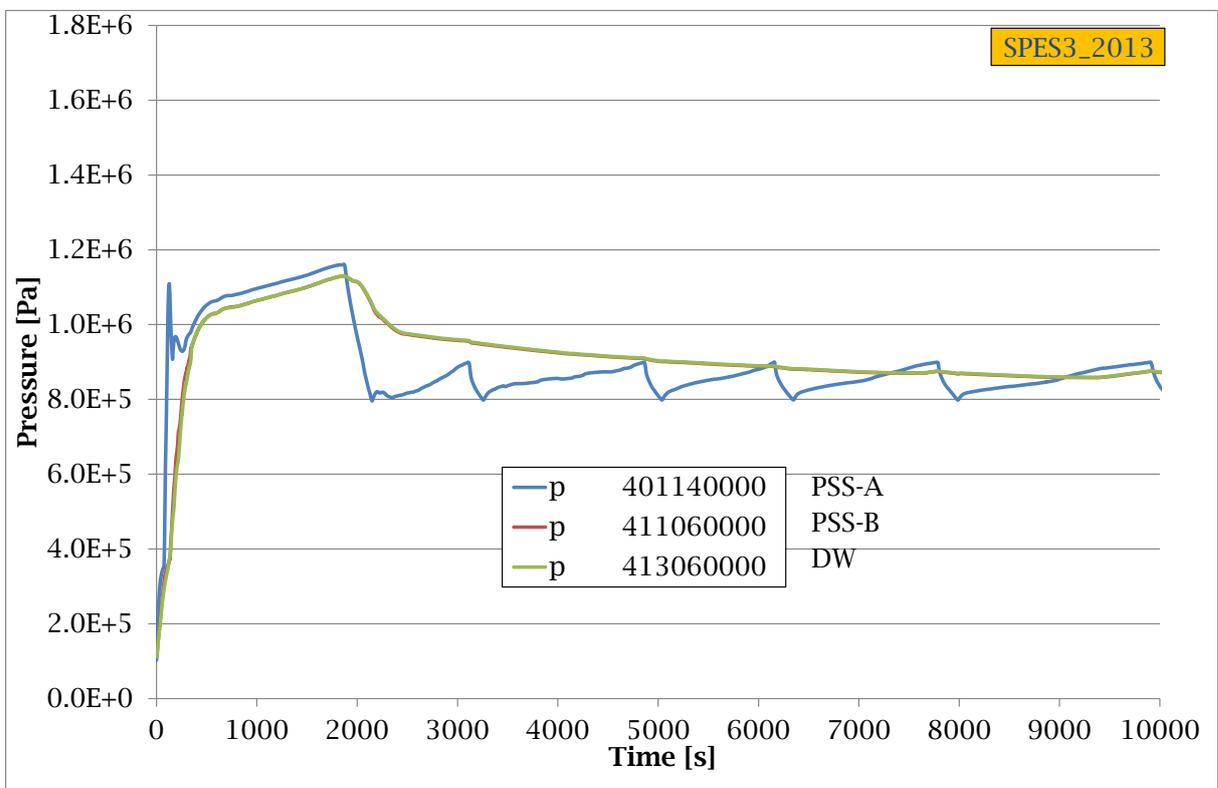


Fig. 6.169 – Pressione nel sistema PSS - A e B e nel DW in SPES3_2013 (part.).

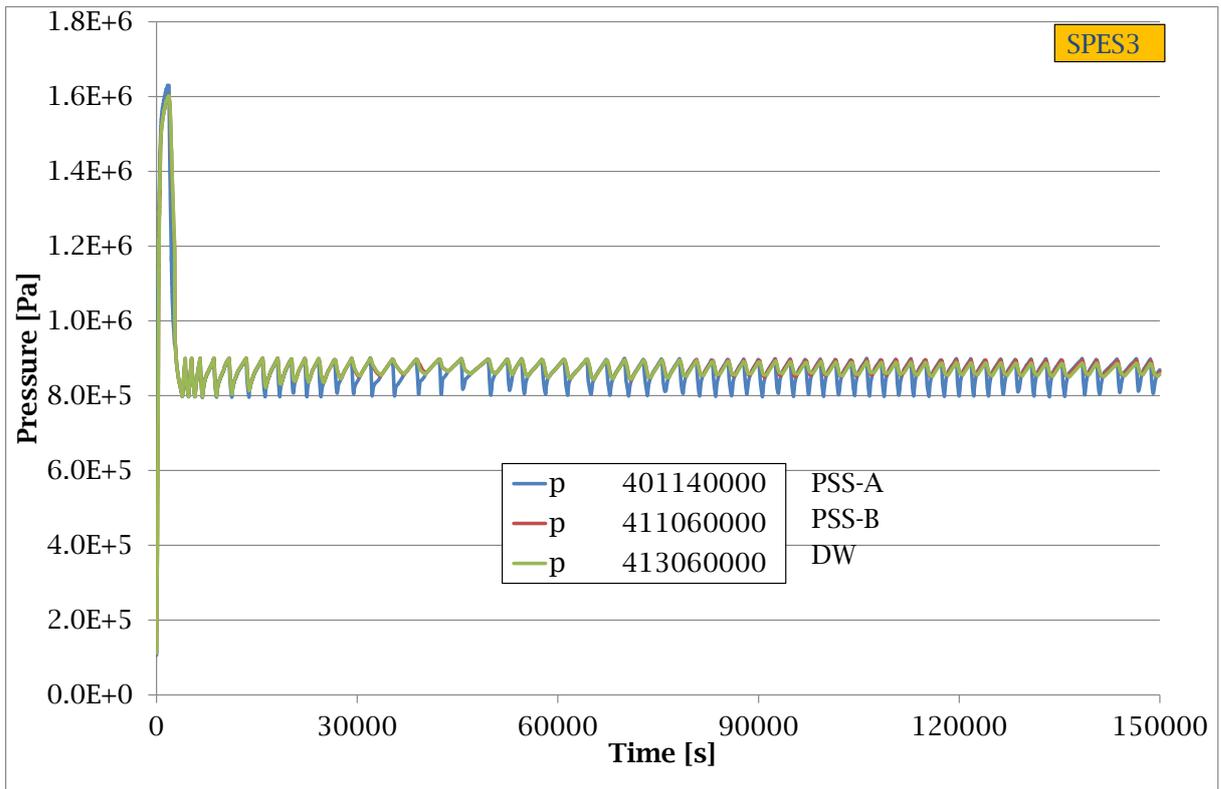


Fig. 6.170 – Pressione nel sistema PSS - A e B e nel DW in SPES3.

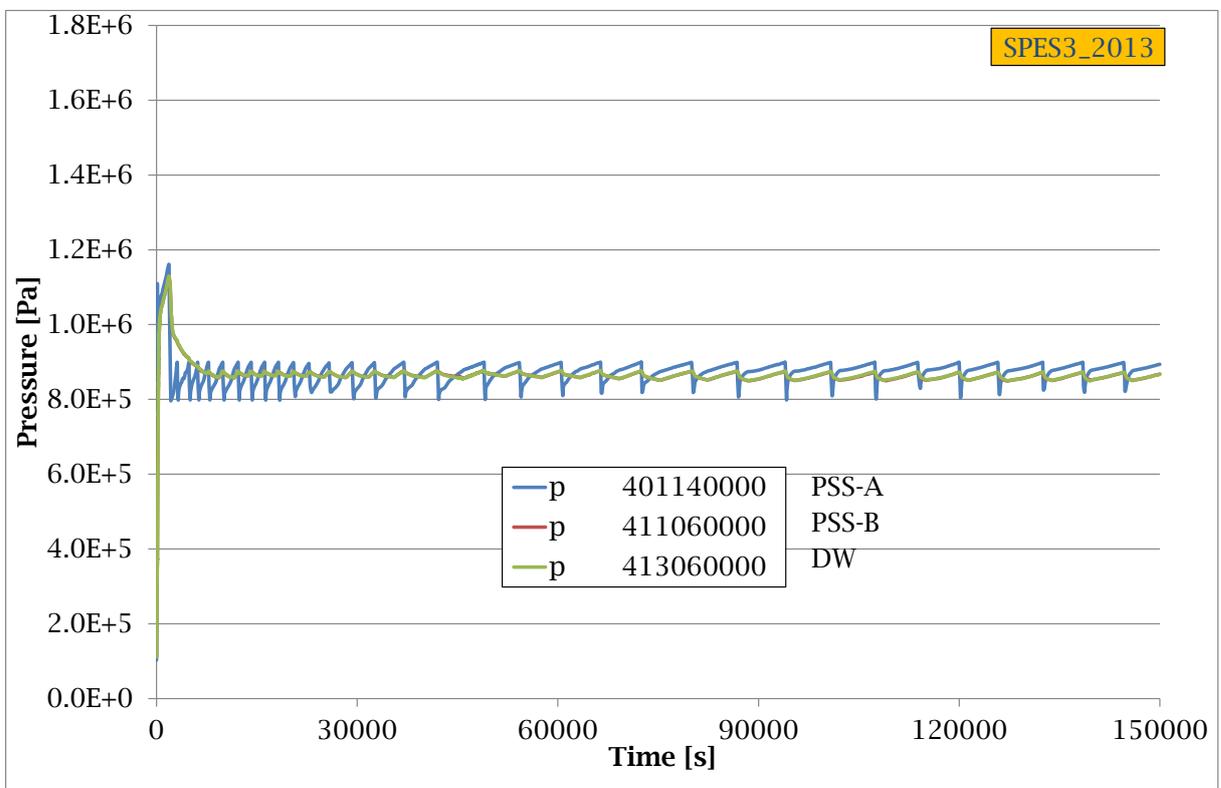


Fig. 6.171 – Pressione nel sistema PSS - A e B e nel DW in SPES3_2013.

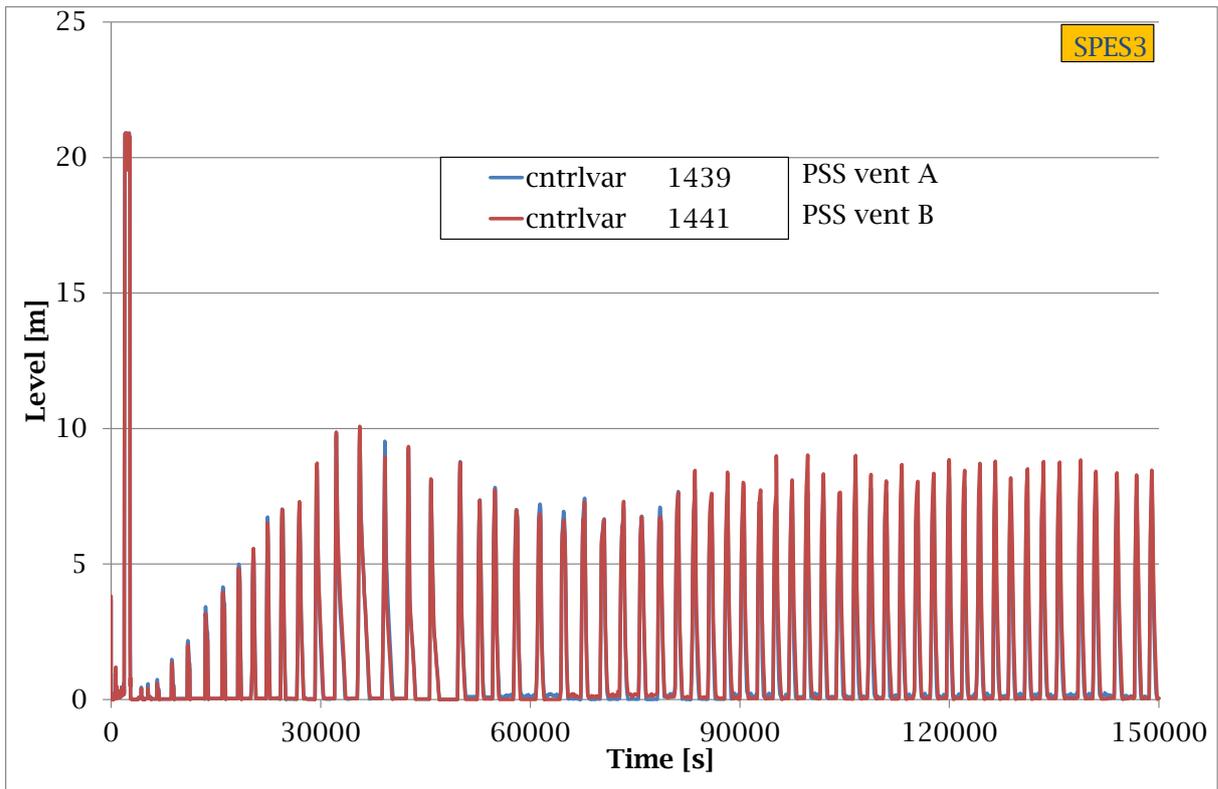


Fig. 6.172 – Livello di liquido nella “vent” A e B del sistema PSS in SPES3.

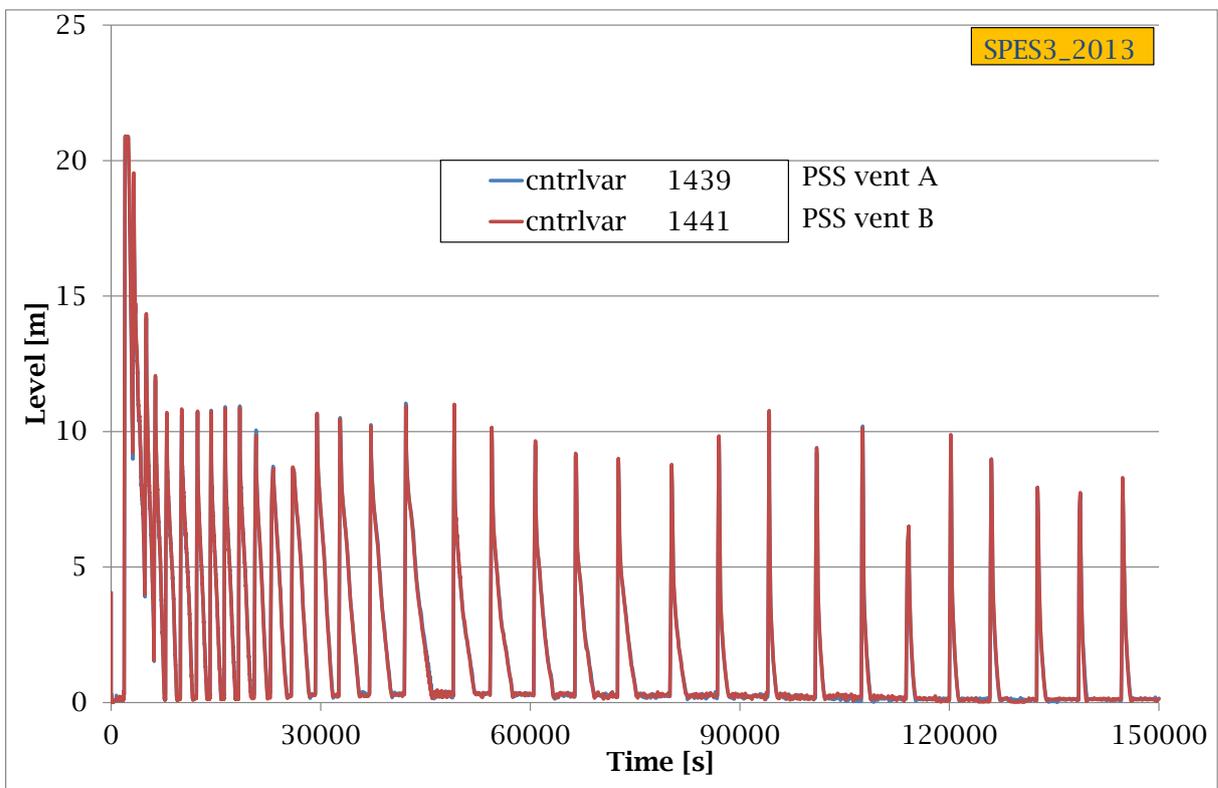


Fig. 6.173 – Livello di liquido nella “vent” A e B del sistema PSS in SPES3_2013.

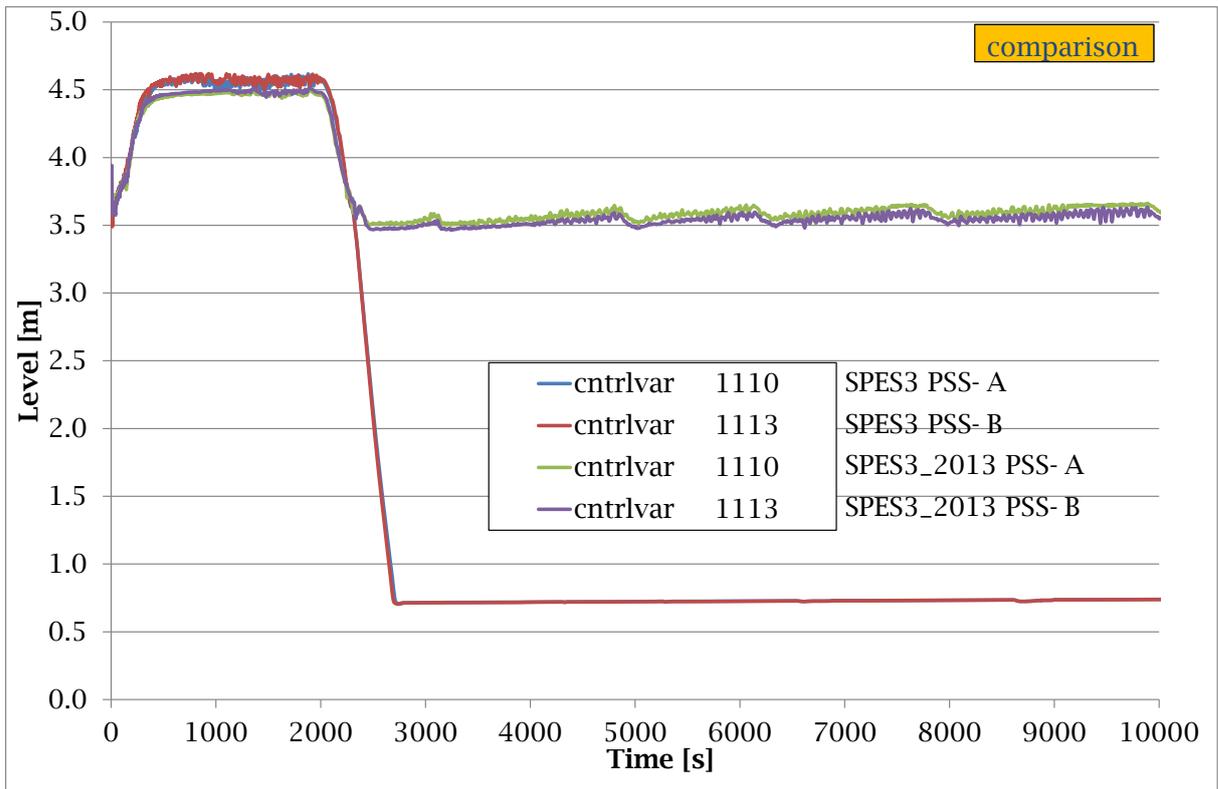


Fig. 6.174 – Livello di liquido nel sistema PSS - A e B (part.).

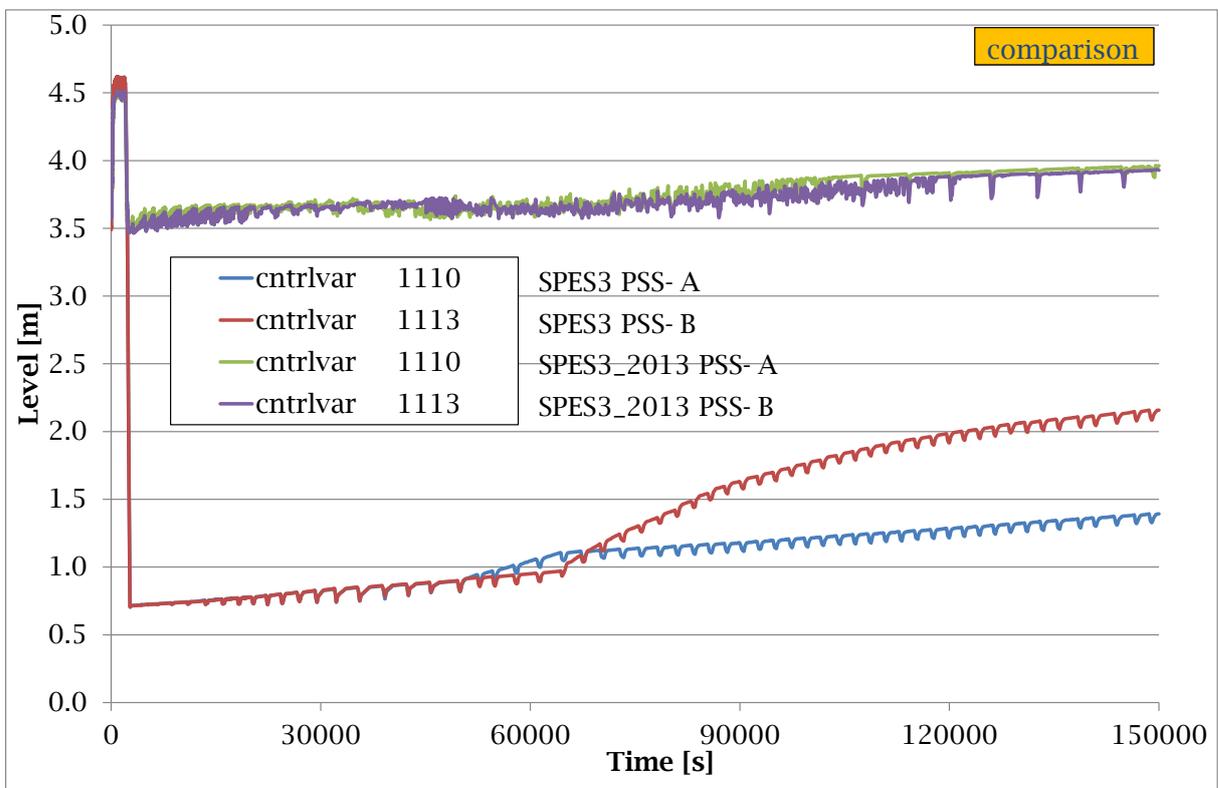


Fig. 6.175 – Livello di liquido nel sistema PSS - A e B.

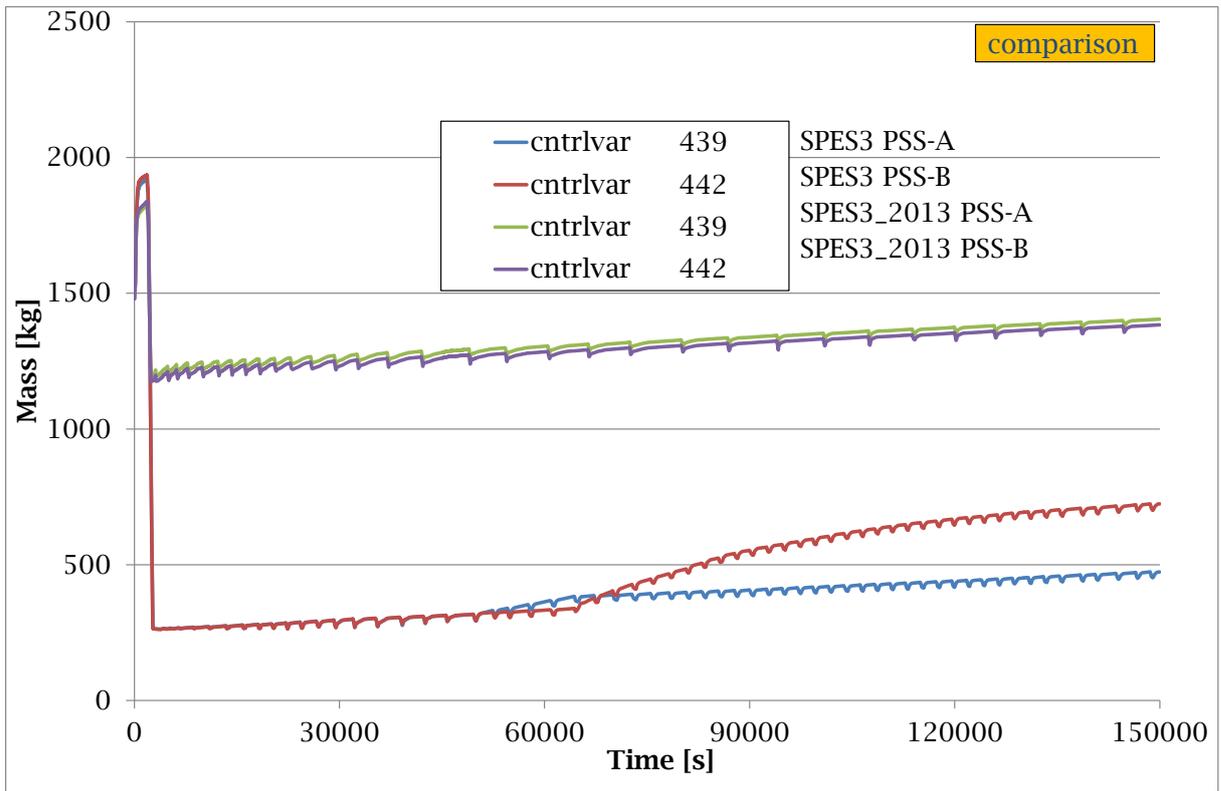


Fig. 6.176 – Inventario di massa nel sistema PSS - A e B.

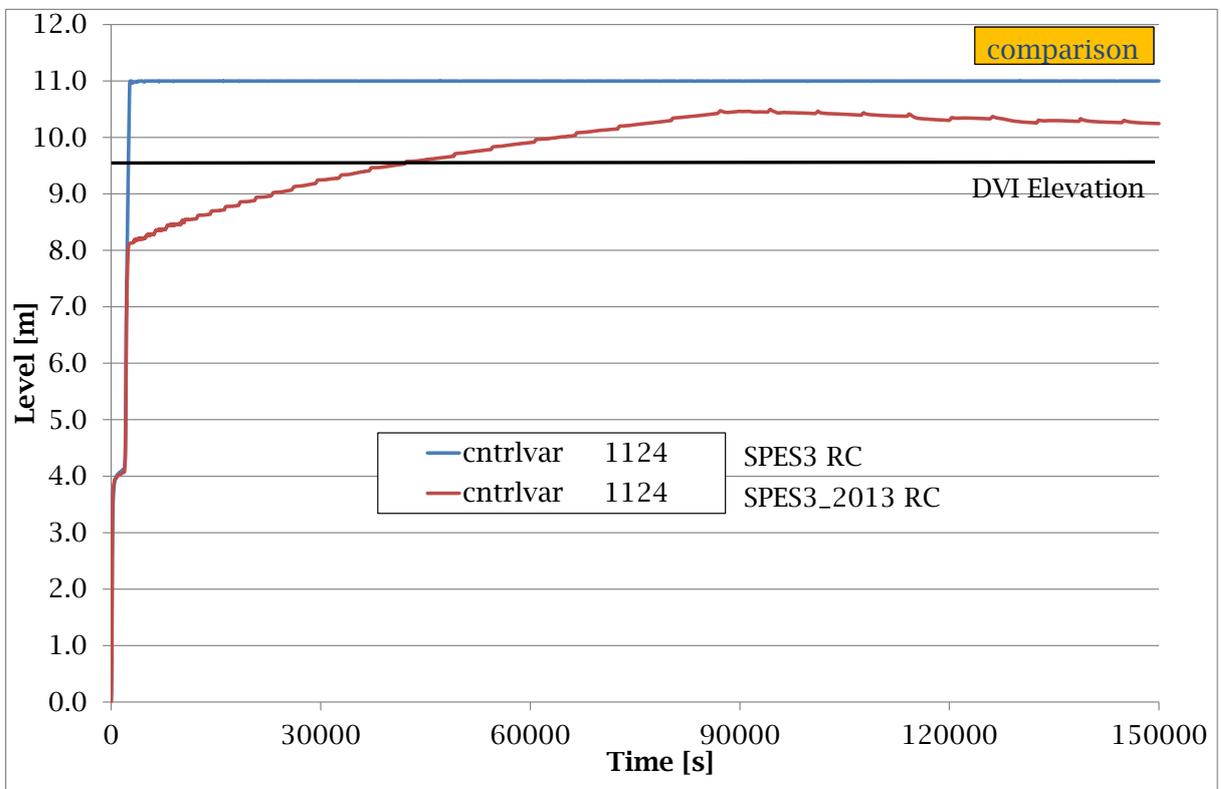


Fig. 6.177 – Livello di liquido in RC.

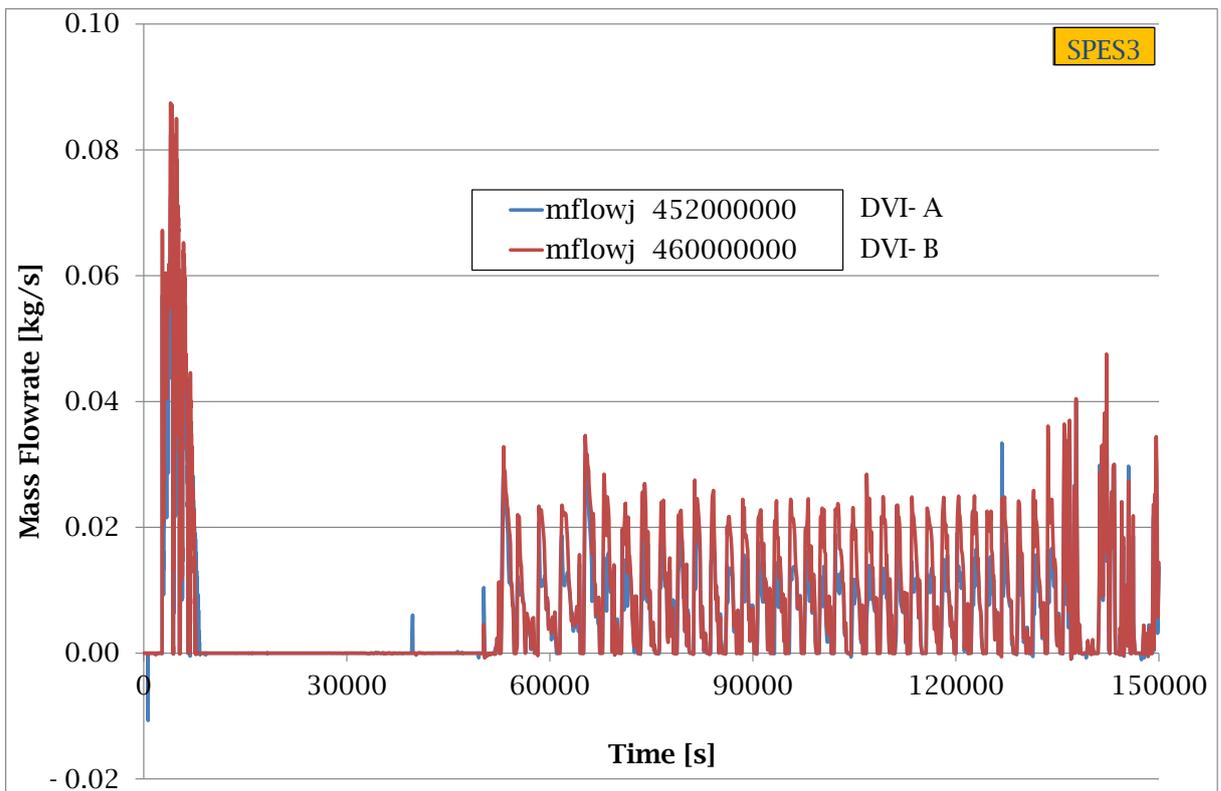


Fig. 6.178 – Portata tra RC DVI A e B in SPES3.

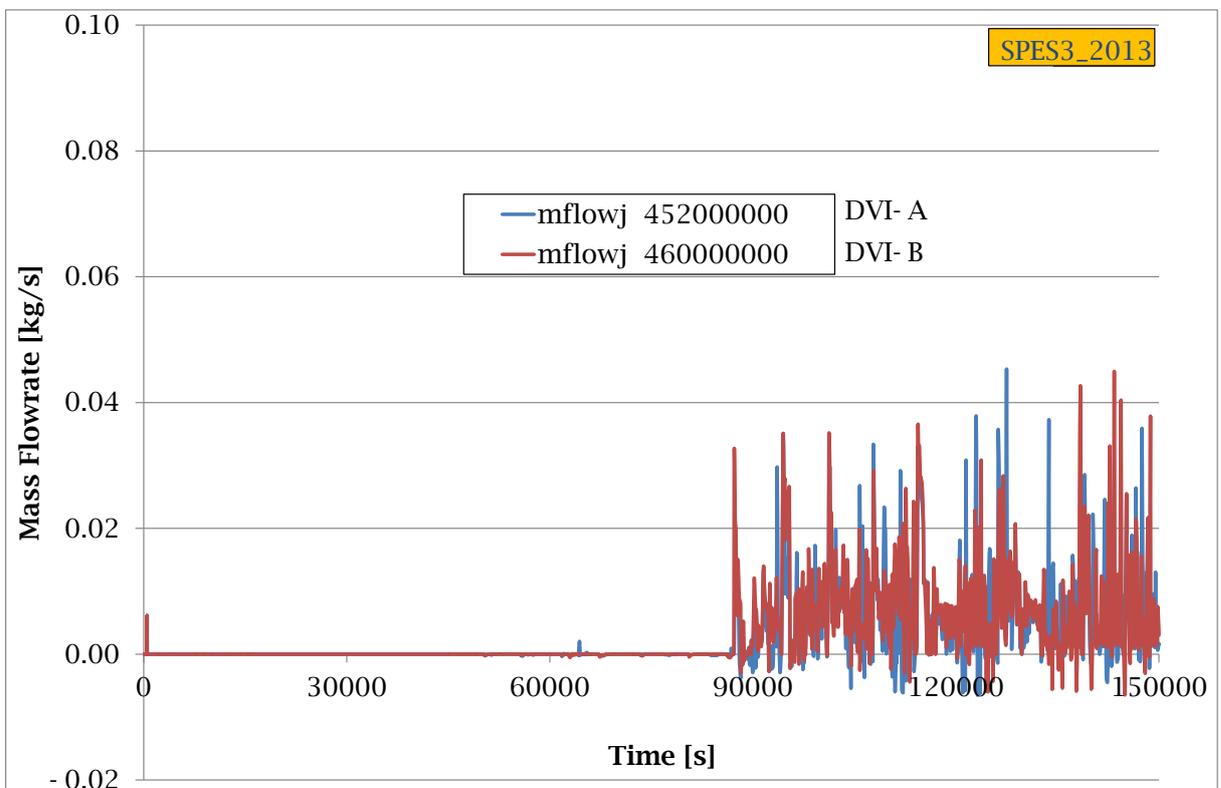


Fig. 6.179 – Portata tra RC DVI A e B in SPES3_2013.

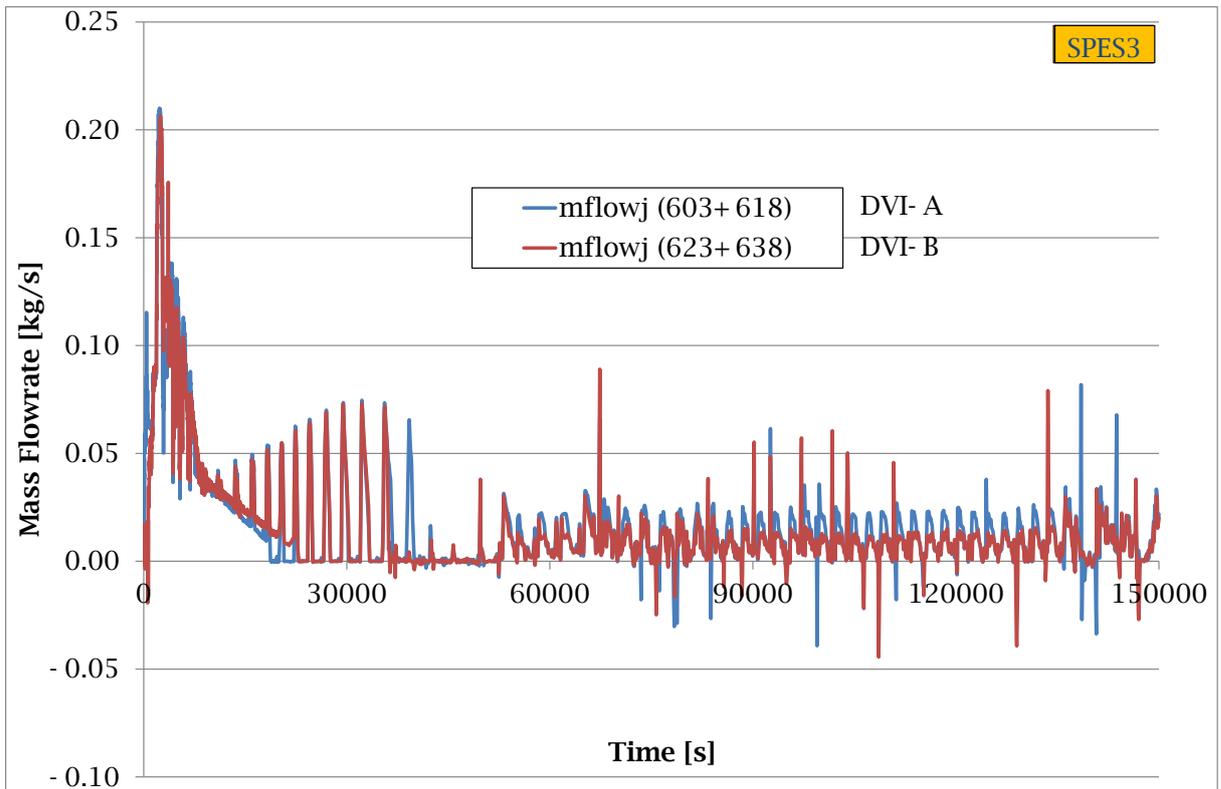


Fig. 6.180 – Portata attraverso la DVI A e B in SPES3.

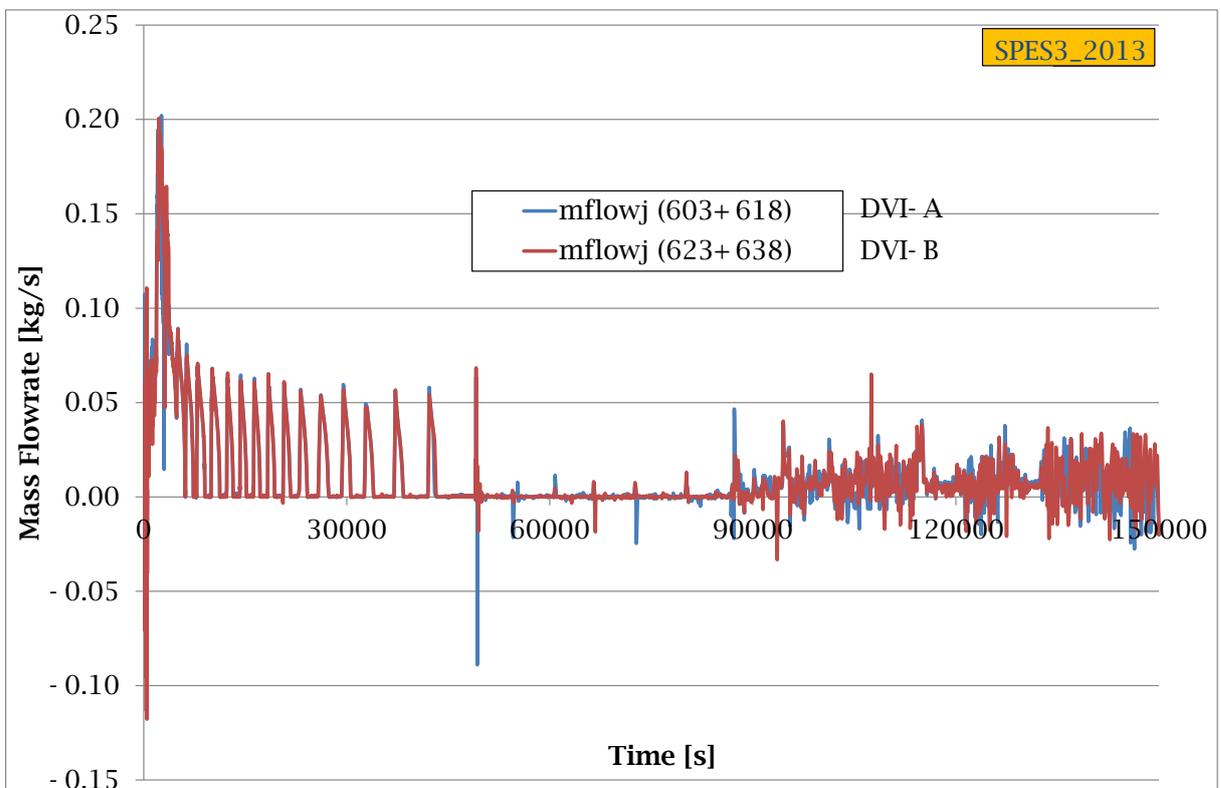


Fig. 6.181 – Portata attraverso la DVI A e B in SPES3.

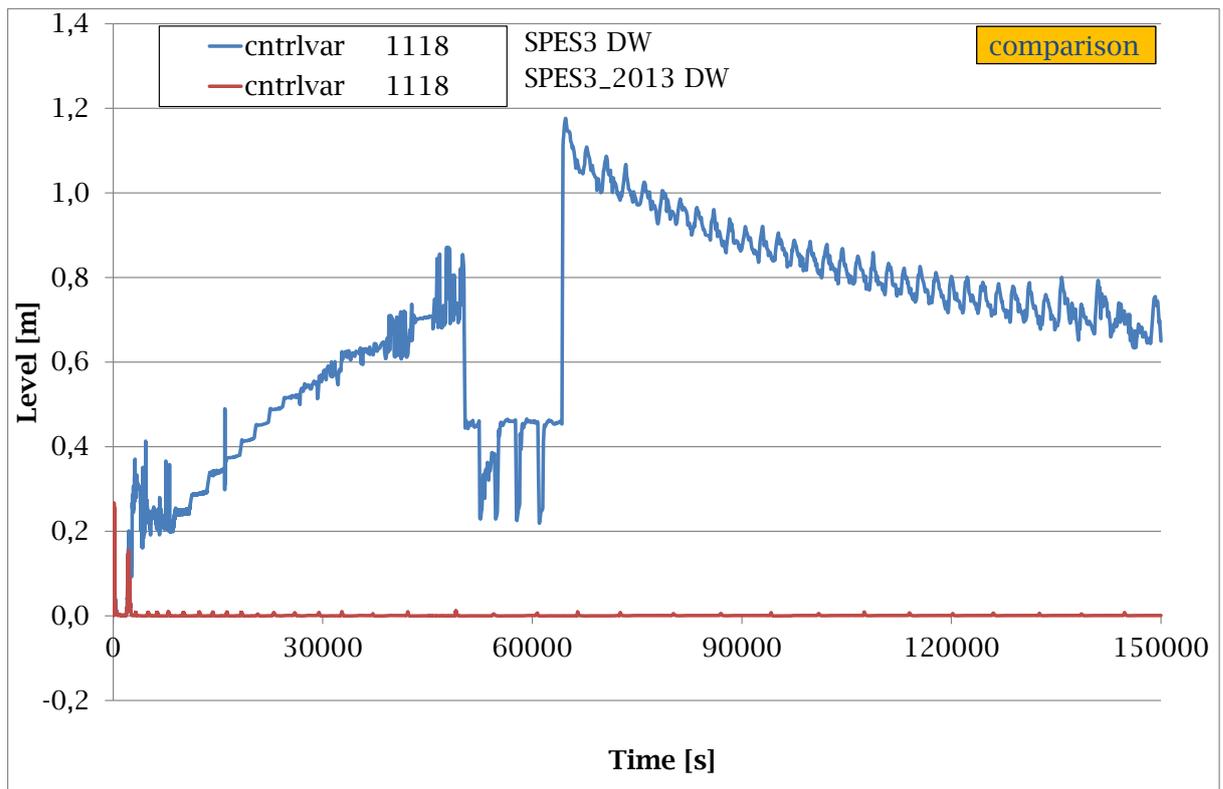


Fig. 6.182 – Livello di liquido nel DW.

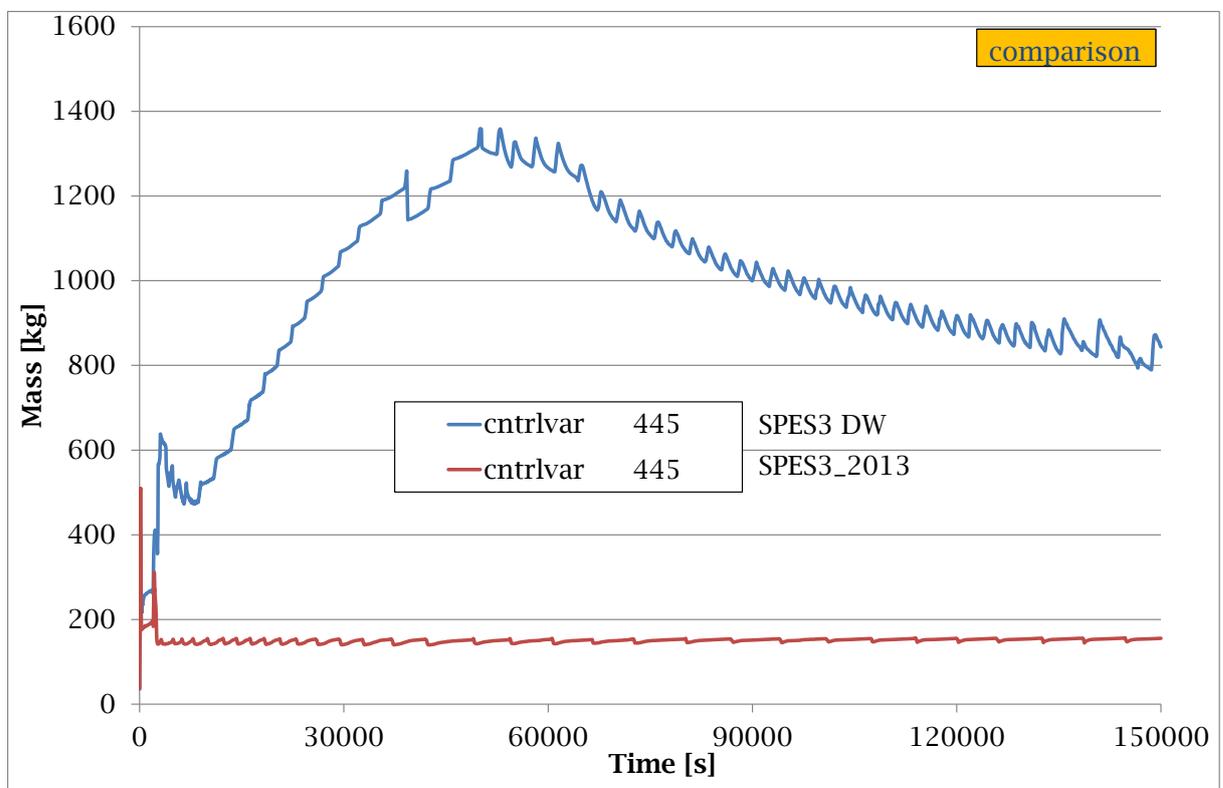


Fig. 6.183 – Inventario di massa nel DW.

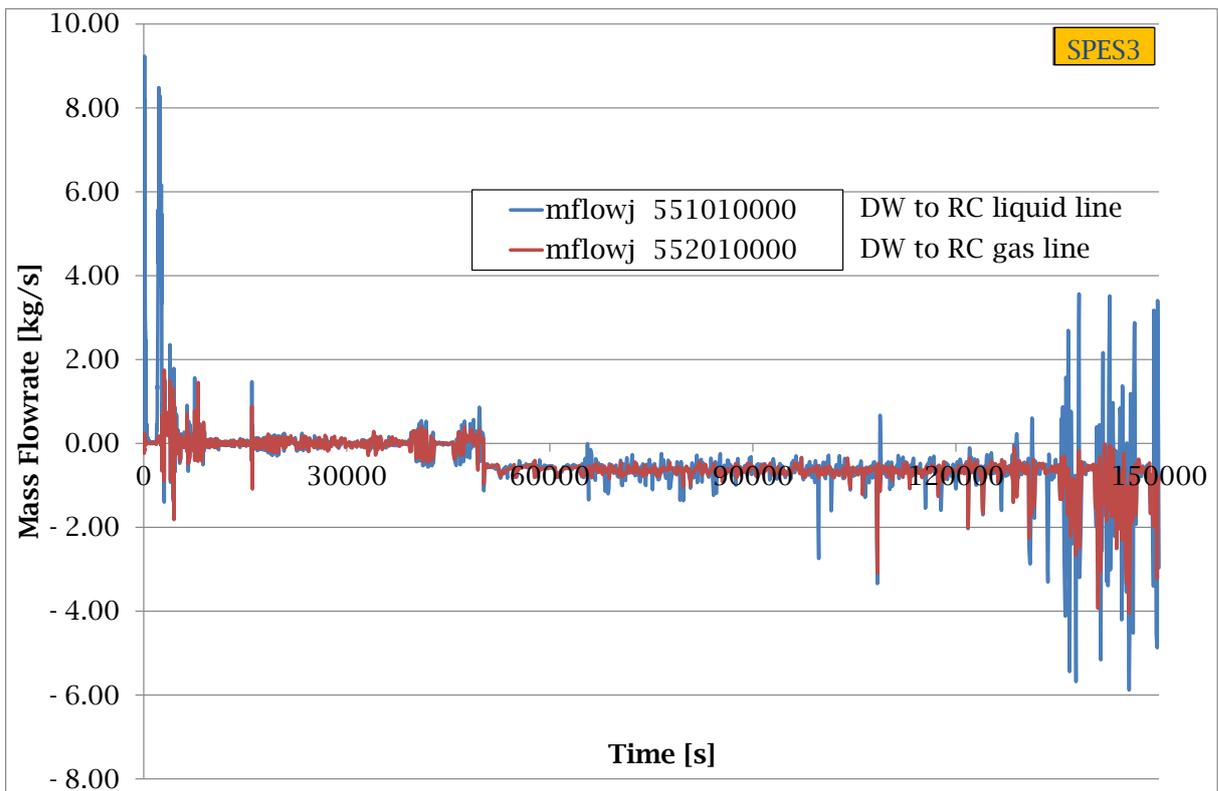


Fig. 6.184 – Portata di gas e di liquido tra DW e RC in SPES3.

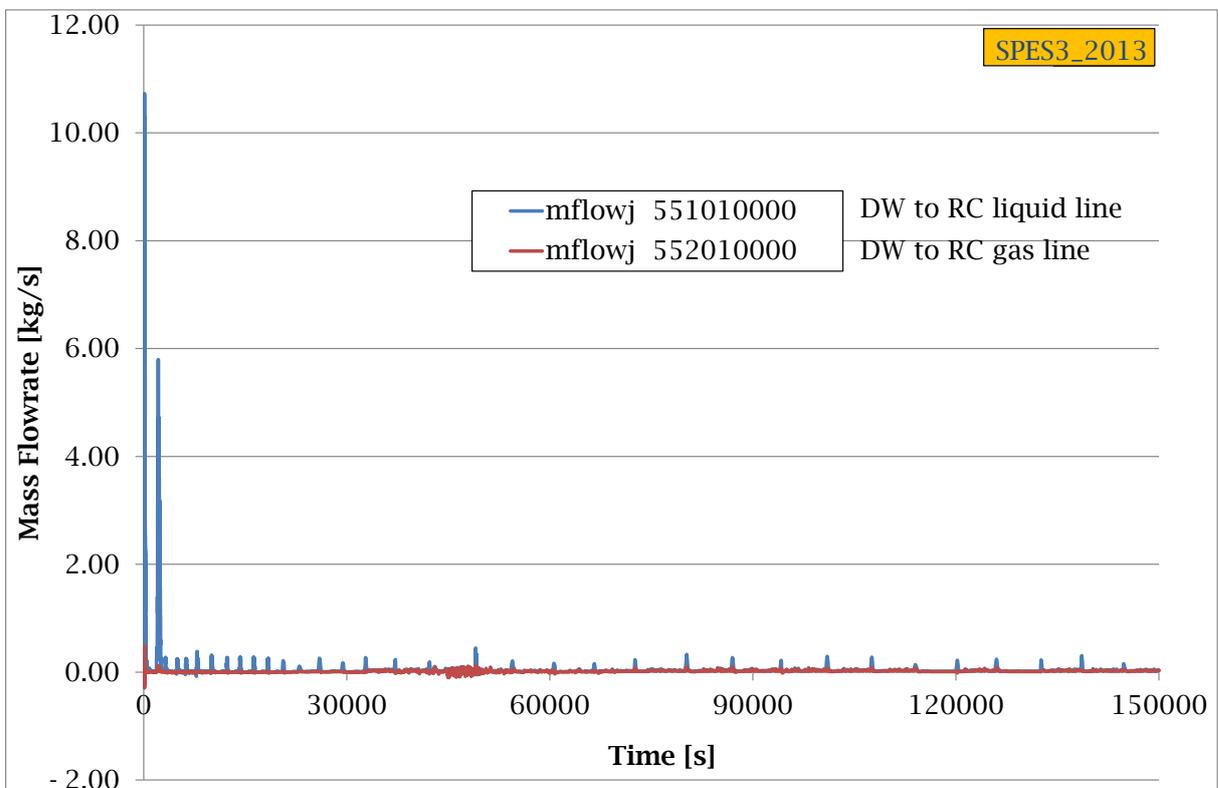


Fig. 6.185 – Portata di gas e di liquido tra DW e RC in SPES3_2013.

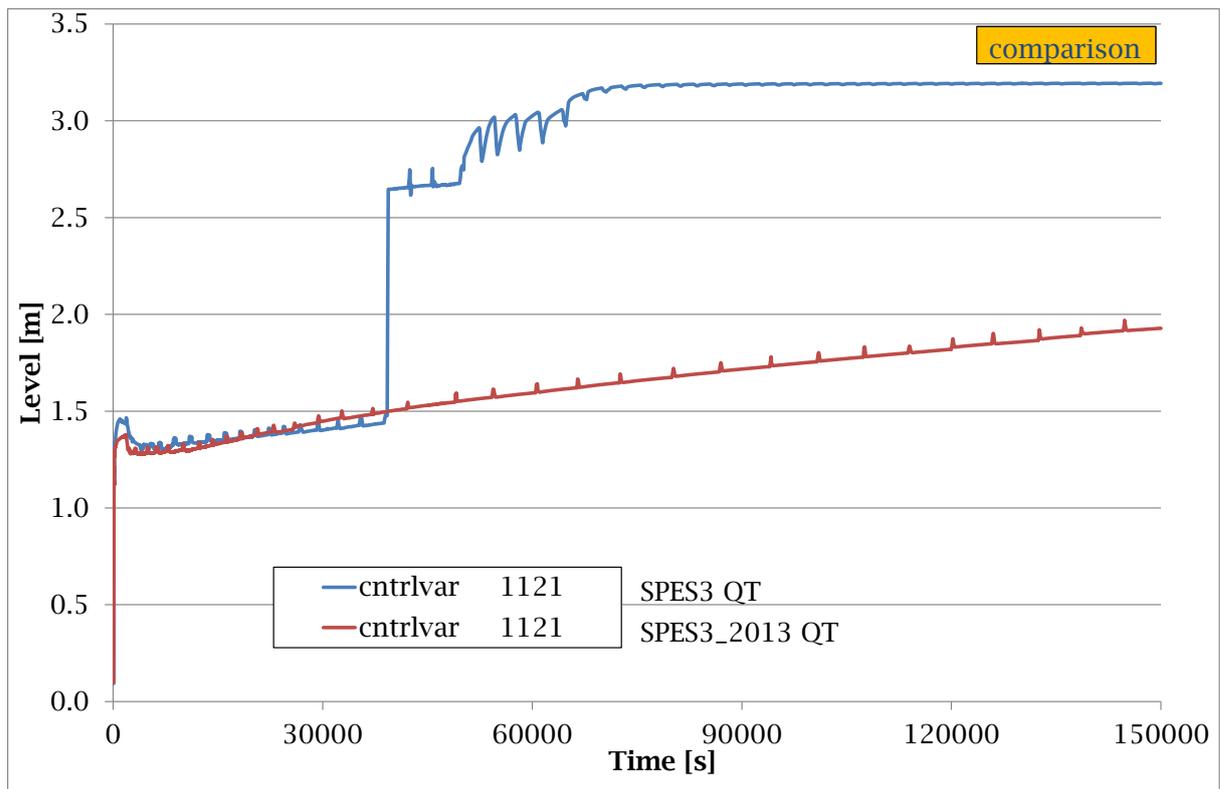


Fig. 6.186 – Livello di liquido nel sistema QT.

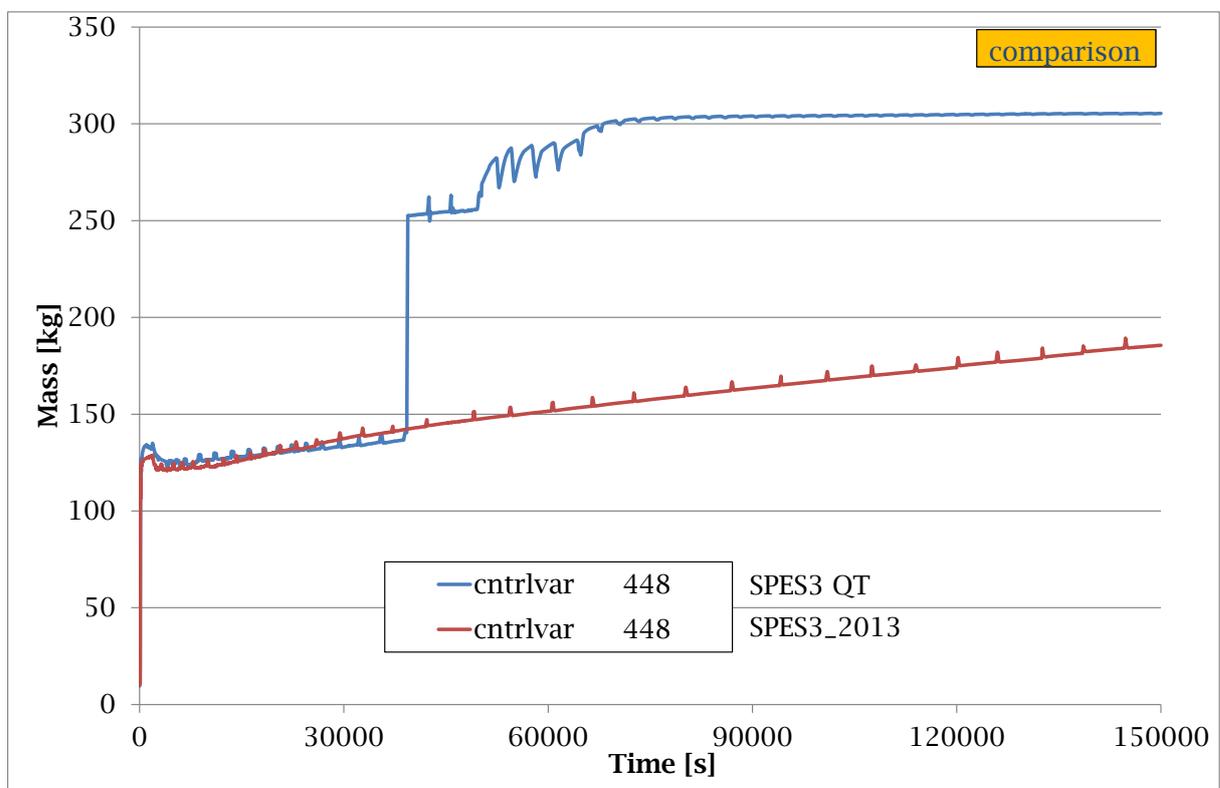


Fig. 6.187 – Inventario di massa nel sistema QT.

6.5.3 Osservazioni sul transitorio di rottura

L'analisi dettagliata del transitorio appena descritto ci ha consentito di mettere in luce il comportamento dell'impianto nella sua configurazione originale (SPES3) e nella nuova configurazione (SPES3_2013). Mentre sull'impianto originario, le procedure atte alla mitigazione delle conseguenze dell'incidente simulato permettevano di mantenerlo in condizioni di sicurezza, lo stesso non si osserva nella nuova configurazione. Infatti, in SPES3_2013 l'inventario di massa e le condizioni termo-fluidodinamiche del primario non consentono di mantenere a livelli accettabili la temperatura delle barre.

Si è quindi deciso di tentare di eliminare via via le principali differenze riscontrate tra le due configurazioni:

- inventario di massa del primario,
- DP totale del circuito primario,
- coastdown delle pompe.

6.6 VARIAZIONI AL NODING RELAP DELLA CONFIGURAZIONE SPES3_2013

Il primo tentativo è consistito nel riportare l'inventario di massa a valori comparabili con quelli di SPES3. Il noding RELAP5 dell'impianto SPES3_2013 è stato modificato aumentando i volumi (attraverso le flow area) dei componenti 101 e 106 che rappresentano rispettivamente il downcomer tubolare e il lower plenum del core. Le condizioni di stazionario dell'impianto rimangono immutate e in Fig. 6.188 si mostra che l'inventario di massa del primario è ora comparabile con quella di SPES-3.

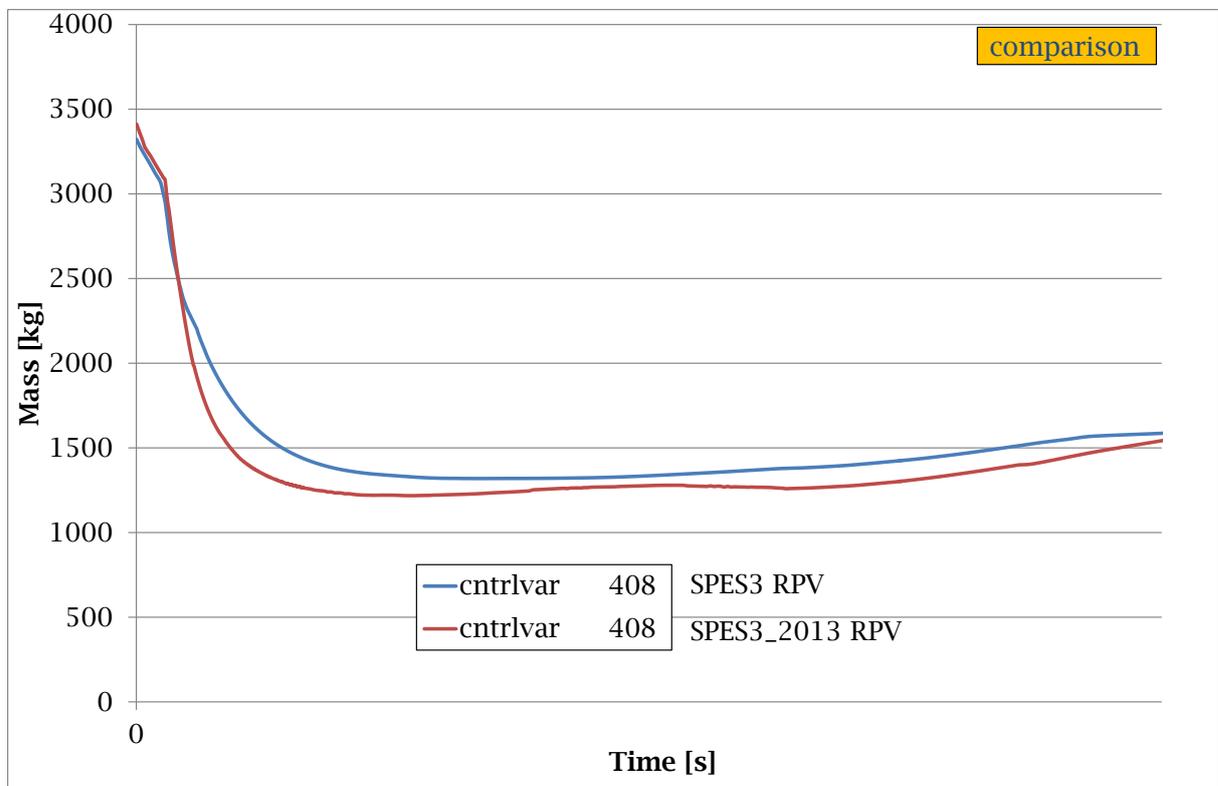


Fig. 6.188 – Inventario di massa del circuito primario.

Tuttavia l'andamento della temperatura nel canale di potenza resta invariata, Fig. 6.189. Tale andamento risulta in accordo con il fatto che la circolazione naturale che si instaura attraverso le valvole RI/DC non viene influenzata dalla modifica apportata dalla nuova nodalizzazione. Infatti, la portata attraverso tali valvole (vedi Fig. 6.190) rimane inferiore rispetto a quella della configurazione originale di SPES3.

In tale nuova configurazione, le perdite di carico dell'intero circuito primario risultano sensibilmente superiori rispetto alla configurazione originale di SPES3. La differenza fondamentale è imputabile alle perdite di carico attraverso il canale di potenza di SPES-2. Tenendo conto del fatto che i sistemi passivi di cui è dotato SPES-3 sono basati sull'innescamento della circolazione naturale fortemente influenzata da variazioni di pressione e di quota tra le parti del circuito, si è deciso di apportare lievi modifiche al layout dell'impianto SPES-3 per ottenere pari condizioni di DP.

In particolare, si è deciso di aumentare di un ordine di grandezza la sezione di passaggio delle valvole dalla 161 alla 166 che influiscono sull'efficacia della circolazione naturale nel circuito primario. A seguire si riportano i principali risultati ottenuti. La Fig. 6.191 riporta l'andamento della portata attraverso le valvole 163 e 166 (con valori più significativi rispetto alle 161+164 e 162+165). Vale la pena di notare che la portata sembra migliorata rispetto ai casi precedenti e si avvicina al valore della configurazione SPES-3. Tuttavia l'andamento della temperatura all'interno del canale di potenza non sembra influenzato, vedi Fig. 6.192.

In ultimo, si è deciso di imporre alle pompe 191 e 192 un coastdown paragonabile a quello della pompa di SPES3. Infatti, nei transitori fin qui simulati le pompe della configurazione SPES3_2013 si fermano completamente con largo anticipo rispetto a quanto succede nella configurazione SPES-3. Nella Fig. 6.193 viene mostrato il coastdown imposto alle pompe, la Fig. 6.194 riporta l'andamento della temperatura nel canale di potenza. Come si può notare l'influenza della modalità di blocco delle pompe sul comportamento della facility è ben chiaro e ci sembra opportuno segnalare come la configurazione dell'impianto SPES3_2013, qui presentata, possa risultare di interesse al fine della ultimazione della facility stessa, pur necessitando di ulteriori studi ed approfondimenti.

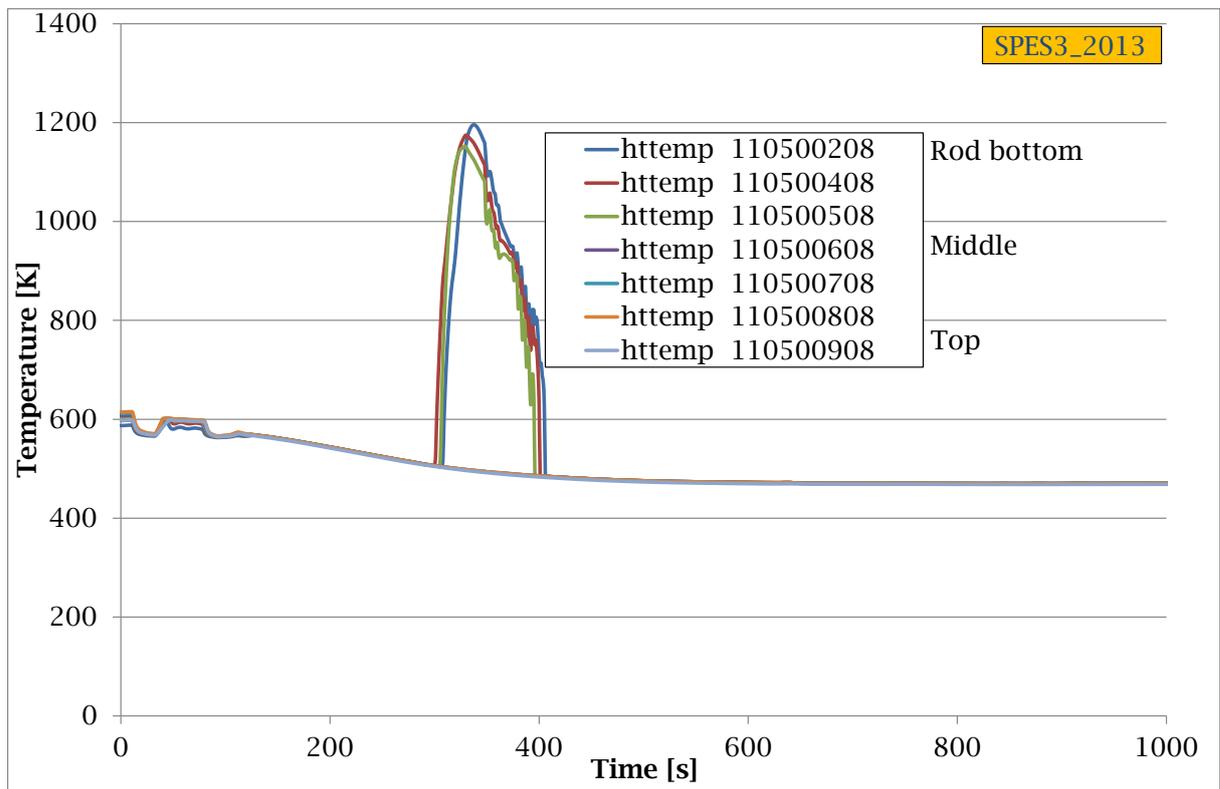


Fig. 6.189 – Temperatura del canale di potenza.

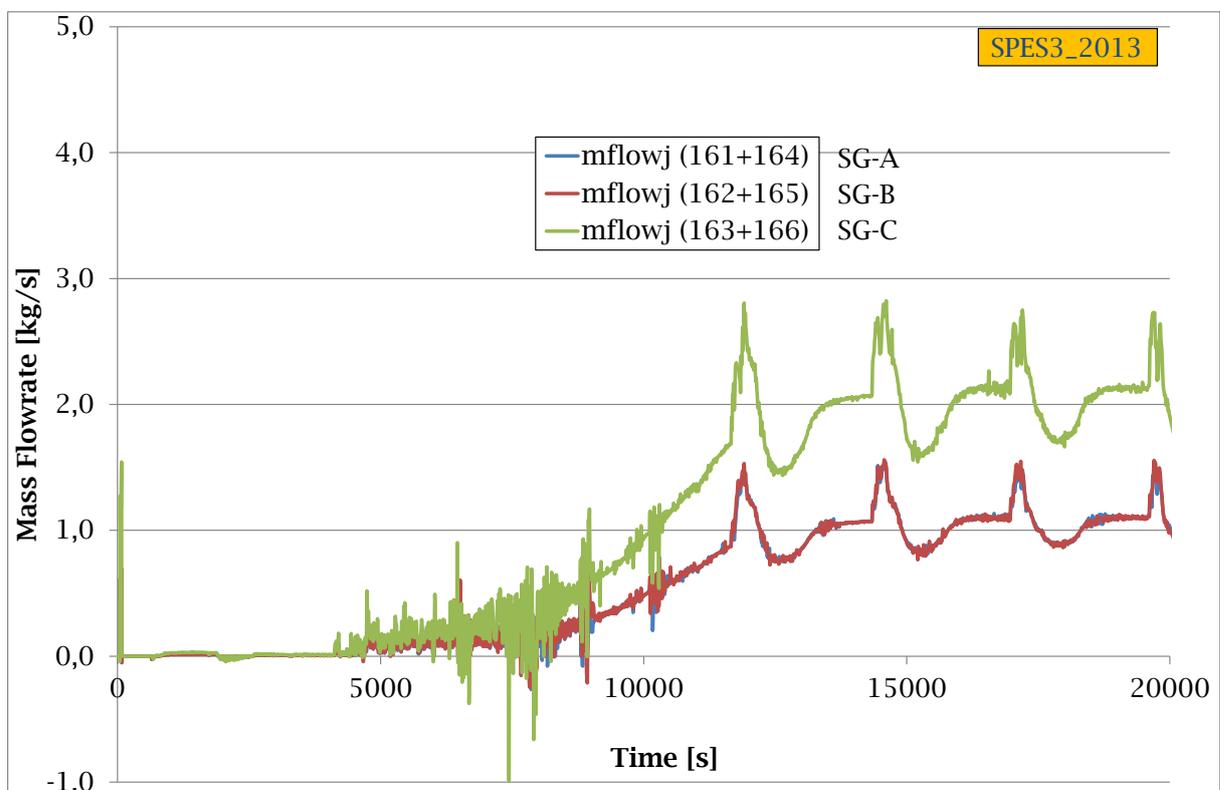


Fig. 6.190 – Portata in circolazione naturale.

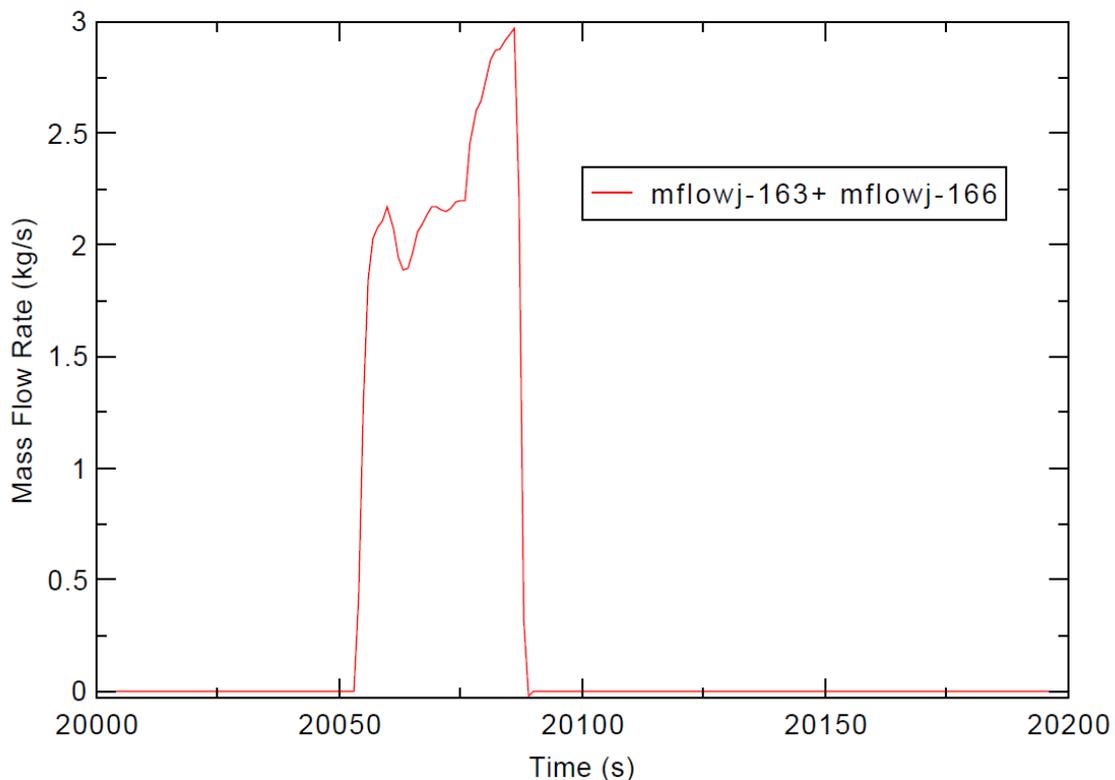


Fig. 6.191 – Portata in circolazione naturale.

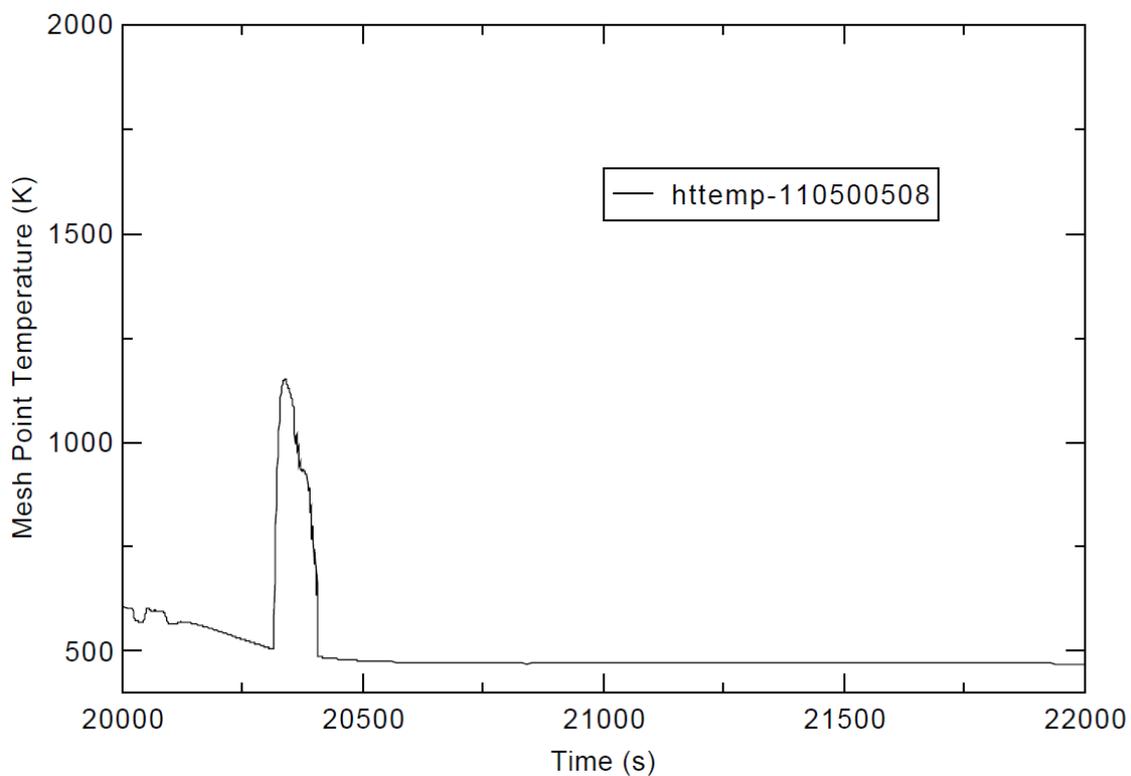


Fig. 6.192 – Temperatura del canale di potenza.

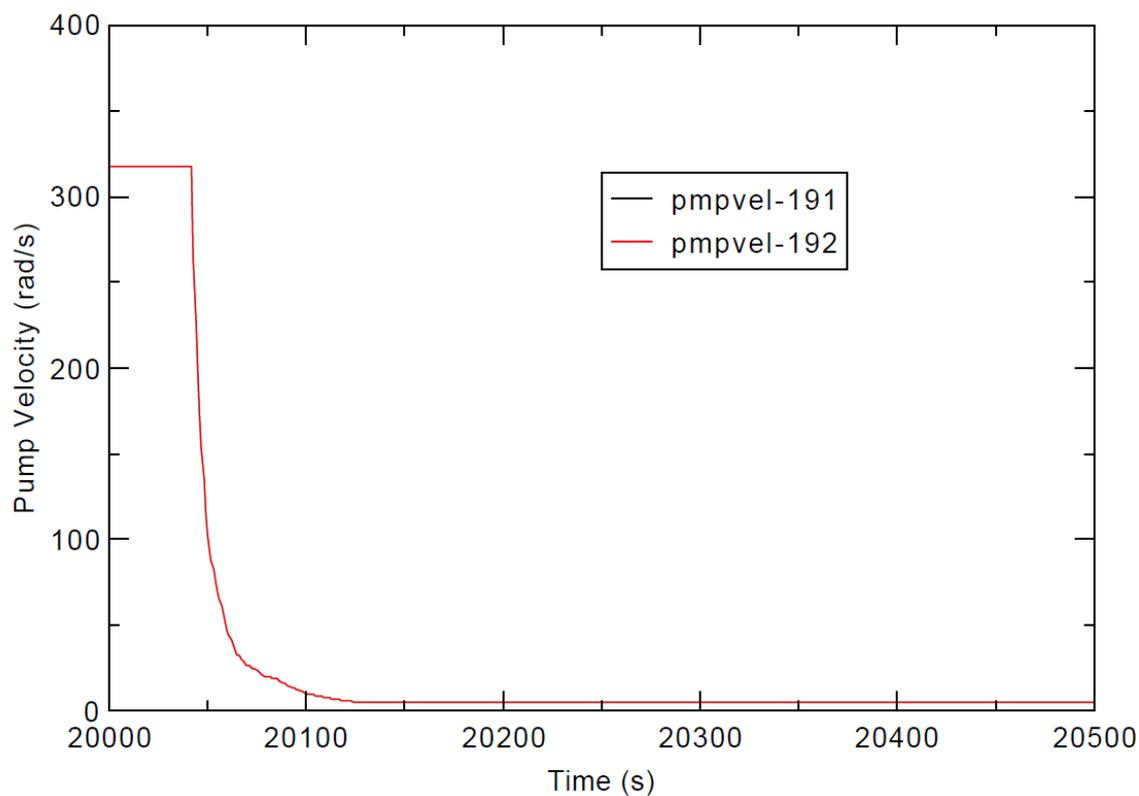


Fig. 6.193 – Coastdown delle pompe del primario.

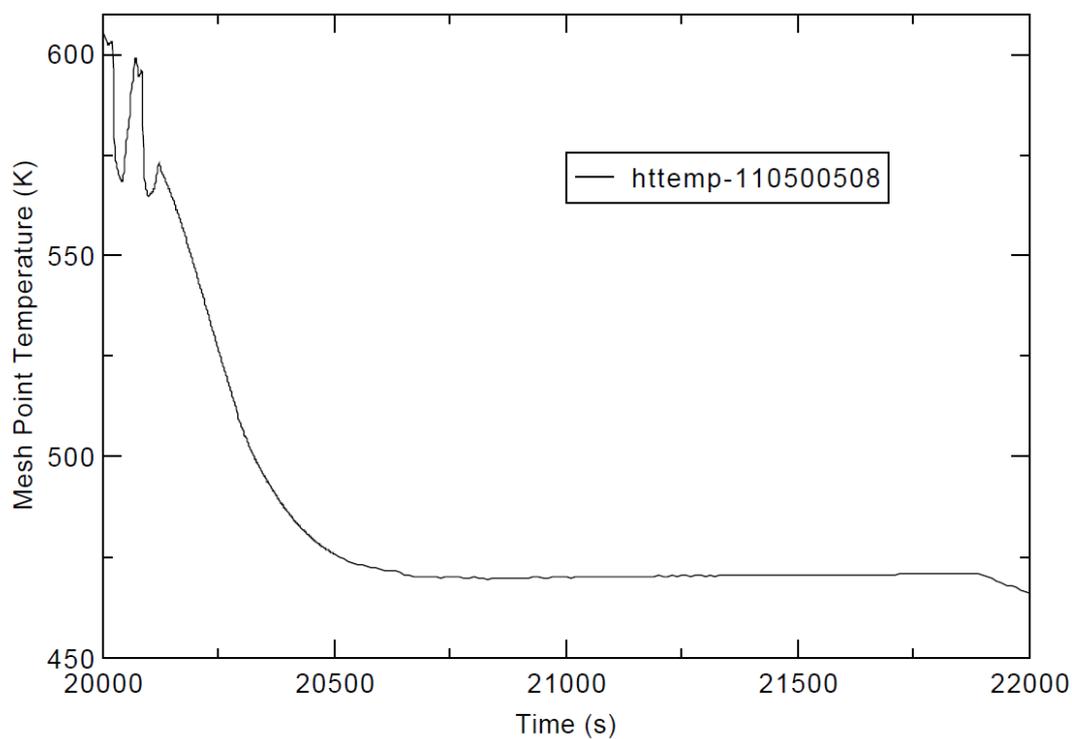


Fig. 6.194 – Temperatura del canale di potenza.

7. CONCLUSIONI

Nel panorama dei reattori di futura generazione, i reattori di tipo SMR si stanno da anni ritagliando un interesse crescente. Infatti, grazie alle loro caratteristiche di sicurezza intrinseca, modularità, economicità e affidabilità, sono in grado di suscitare l'interesse anche di quei paesi che ad oggi risultino privi di un'industria nucleare.

Proprio la valutazione dei principi di sicurezza intrinseca che sono alla base del "safety by design" richiesto ai reattori innovativi, necessita di una validazione a fronte di appropriate prove sperimentali e conseguentemente richiede forti investimenti, sia per la costruzione di facility a effetti separati e integrali, che per lo sviluppo di strumenti di calcolo e metodologie di analisi.

In quest'ottica, il simulatore integrale di SMR SPES-3 ricopre un ruolo di fondamentale importanza. Dato che il suo comportamento è stato sempre simulato da SIET con il codice di termoidraulica di sistema RELAP5, in primo luogo si è deciso di condurre una verifica dei risultati ottenuti da SIET attraverso il confronto con i risultati ottenuti da un analogo modello sviluppato per il codice TRACE dal Dipartimento di Energia dell'Università degli Studi di Palermo. Il transitorio di Station Black-Out (SBO) preso in considerazione ha messo in luce la congruenza tra i risultati ottenuti dai due codici, che hanno fornito risposte realistiche e fisicamente fondate.

La facility SPES-3, al 50% della sua realizzazione nei laboratori di SIET a Piacenza, ricopre un ruolo di primaria importanza per almeno due aspetti: pochi impianti sperimentali al mondo possono arrivare alle prestazioni di progetto di SPES-3 (quelle di un PWR), e per non sperperare gli alti investimenti già effettuati per giungere fino al grado di realizzazione attuale.

Sulla base di tali considerazioni, appare chiaro l'obiettivo del presente studio: la valutazione della possibilità di completare tale facility, riducendo per quanto possibile l'investimento richiesto per la sua ultimazione attraverso l'utilizzo di componentistica preesistente e analizzando le azioni che potrebbero essere realizzate a questo scopo.

Gli studi effettuati da ENEA con il codice RELAP5 per dimostrare la fattibilità di una configurazione alternativa che utilizzi il canale di potenza e le pompe primarie della facility SPES-2, hanno dato risultati incoraggianti. Per accertare la rappresentatività della nuova configurazione nella valutazione di concetti propri della sicurezza intrinseca, come il forte accoppiamento tra circuito primario-contenimento e l'utilizzo di sistemi passivi, si sono selezionati e simulati due transitori incidentali già analizzati nella configurazione originale della facility nei PAR precedenti. In particolare l'analisi della mancanza di alimentazione elettrica o SBO (transitorio 177) ha mostrato che la nuova configurazione è efficace nella rimozione del calore di decadimento attraverso EHRS fornendo risultati simili alla precedente analisi su SPES-3. L'analisi di un incidente di rottura da 4" sulla linea EBT (transitorio 180) ha invece mostrato sensibili differenze nell'accoppiamento tra primario e contenimento e nella fase di attivazione della circolazione naturale nel canale di potenza. Sono stati effettuati dei calcoli di scopo che hanno mostrato che queste differenze possono essere fortemente ridotte ripristinando il quantitativo originale di acqua nel primario e diminuendo le perdite di carico nel circuito per migliorare la circolazione naturale.

L'analisi condotta non ha comunque la pretesa di essere esaustiva in relazione alla fattibilità e alla rappresentatività della nuova configurazione. Nel percorso che ha portato alla simulazione dei transitori incidentali analizzati, si sono individuati alcuni punti che dovranno essere oggetto di verifica, validazione e ottimizzazione in future attività e in collaborazione con SIET che è il progettista e gestore della facility nella configurazione originale. I punti in questione sono:

- possibile abbassamento della quota del canale di potenza tale che, aumentando la differenza di quota core/scambiatore, si possano compensare le maggiori perdite di carico introdotte dal canale di potenza stesso ed aumentare la portata in condizioni di circolazione naturale,
- fattibilità di un allargamento delle valvole di bypass RI-DC al fine di ridurre le perdite di carico nelle situazioni incidentali in cui l'instaurarsi della circolazione naturale è di fondamentale importanza,
- caratterizzazione delle pompe di SPES-2 in configurazione parallela, poiché le caratteristiche di pompe poste in parallelo sono diverse dalle caratteristiche delle singole pompe che lo compongono. Questo è molto importante nella simulazione di transitori che prevedono una parzializzazione della portata nel circuito primario,
- fattibilità delle connessioni fisiche proposte tra componenti SPES-3 e SPES-2 e la loro progettazione/ingegnerizzazione, nonché dell'ottimizzazione delle modifiche proposte.

ACRONIMI

ADS	Automatic Depressurization System
BAF	Bottom of Active Fuel
BDBE	Beyond Design Basis Event
BDC	Beyond Design Conditions
Bot, bot	Bottom
BC	Base Case
D	Diameter
Di	inner Diameter
Do	outer Diameter
DBE	Design Basis Event
DC	Downcomer
DEG	Double Ended Guillotine
DP	Differential pressure
DT	Difference of temperature
DVI	Direct Vessel Injection
DW	Dry Well
EBT	Emergency Boration Tank
EHRIS	Emergency Heat Removal System
FL	Feed Line
FW	Feed Water
HX	Heat Exchanger
IRIS	International Reactor Innovative and Secure
LGMS	Long Term Gravity Make-up System
LM	LOCA Mitigation signal
LOCA	Loss of Coolant Accident
mid	middle
MFIV	Main Feed Isolation Valve
MSIV	Main Steam Isolation Valve
NPP	Nuclear Power Plant
P	Pressure
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PCC	Passive Containment Cooling
PRZ	Pressurizer
PSS	Pressure Suppression System
PWR	Pressurized Water Reactor
QT	Quench Tank
RC	Reactor Cavity
RELAP	Reactor Excursion and Leak Analysis Program
RI	Riser
RPV	Reactor Pressure Vessel
RWST	Refuelling Water Storage Tank
S	Safeguard signal
SBLOCA	Small Break Loss of Coolant Accident
SBO	Station Black-Out
SG	Steam Generator
SIET	Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche



Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
ADPFISS – LP1 - 009	0	L	168	170

SL Steam Line
SMR Small Modular Reactor
SPES Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza
T Temperature
TAF Top of Active Fuel

BIBLIOGRAFIA

- [1] US NRC, "TRACE V5.0 (patch 01): User's Manual," *Office of Nuclear Regulatory Research*, 2008.
- [2] C. D. Fletcher and R.R. Schultz, "RELAP5/MOD3.3 Code manual," *NUREG/CR-5535, INEL-95/174, Idaho National Engineering Laboratory*, Gennaio 2002.
- [3] R. Ferri, "SPES-3 facility: RELAP5 simulations, from 65% power, of the DBE DVI line split break, BDBE EBT top line DEG break, Fukushima type SBO, for design support," *SIET 01 811 RT 11 Rev.0*, Piacenza, Marzo 2012.
- [4] M. Rigamonti, "SPES-2 Facility description," Piacenza, SIET 00 183 RI 92, Rev.1, 1995.
- [5] R. Ferri and C. Congiu, "SPES3-IRIS facility nodalization for RELAP5 Mod. 3.3 code and steady state qualification," ENEA, FPN-P9LU - 017, Febbraio 2009.
- [6] Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) and Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES), "The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the seismic damage to the NPPs.," April 4th 2011.
- [7] A. Frisani, L. Oriani L.E. Conway, "Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) for IRIS Non-LOCA transients and accidents," vol. Westinghouse Electric Company STD-ES-05-02 Rev.0, June 2005.

CURRICULUM PERSONALE CIRTEN

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".

Pietro Alessandro Di Maio, ricercatore del S.S.D. ING-IND/19, da oltre 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 un centinaio 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 la rivista "Fusion Engineering and Design". E' abilitato alla conduzione del reattore nucleare AGN-201 del Dipartimento dell'Energia e collabora alla gestione dell'inventario delle fonti nucleari di tale dipartimento.

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".

Fulvio Mascari, assegnista di ricerca del S.S.D. ING-IND/19, da circa 6 anni svolge attività di ricerca su problematiche termoidrauliche e nucleari connesse allo sviluppo dei reattori a fissione. Partecipa alle attività di validazione dei codici termoidraulici di sistema TRACE e RELAP5, collaborando con il Department of "Nuclear Engineering & Radiation Health Physics" della Oregon State University, NuScale, l'Università degli Studi di Pisa e ENEA. Recentemente ha preso parte alle attività di un International Collaborative Standard Problem (ICSP) on Integral PWR Design Natural Circulation Flow Stability and Thermo-Hydraulic Coupling of Containment and Primary System during Accidents" promosso dall'IAEA. I risultati delle sue attività di ricerca sono pubblicati su una ventina di memorie in riviste internazionali, capitoli di libro, atti di congresso nazionali e internazionali e rapporti. E' anche coautore di diversi rapporti nell'ambito dei PAR trascorsi. E' stato referee per le riviste "Nuclear Engineering and Design" e "Science and Technology of Nuclear Installations".

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