



Ricerca di Sistema elettrico

Approfondimento di prove sperimentali per la simulazione del comportamento di un sistema passivo con scambiatore a baionetta per la rimozione del calore di decadimento

Massimiliano Polidori

APPROFONDIMENTO DI PROVE SPERIMENTALI PER LA SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO DI UN SISTEMA PASSIVO CON SCAMBIATORE A BAIONETTA PER LA RIMOZIONE DEL CALORE DI DECADIMENTO

Massimiliano Polidori (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Generazione di Energia Elettrica con Basse Emissioni di Carbonio

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

Linea: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Obiettivo: Sperimentazione e calcoli in appoggio agli studi sulla sicurezza

Responsabile del Progetto: Federico Rocchi, ENEA

Titolo

Approfondimento sulle prove sperimentali per la simulazione del comportamento di un sistema passivo con scambiatore a baionetta per la rimozione del calore di decadimento

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Termoidraulica dei reattori nucleari, Reattori e sistemi innovativi, Trasmissione del calore, Sicurezza nucleare

Sommario

A partire dalle attività del PAR 2012-2014, presso i laboratori SIET di Piacenza, si sono svolte molteplici campagne sperimentali sulla sezione di prova HERO-2 a due tubi a baionetta paralleli allo scopo di valutare se un sistema di rimozione del calore composto da baionette possa essere impiegato nei nuovi reattori SMR e Gen-IV. Le campagne hanno permesso la creazione di un vasto database di dati per la validazione di codici termoidraulici di sistema. Nel tentativo di ridurre alcune incertezze rilevate delle precedenti campagne, nella terza annualità del PAR2015-2017 SIET ha provveduto a rieseguire alcuni test sia in circuito aperto che chiuso, implementando nuova strumentazione e migliorando le procedure per l'esecuzione di test stazionari e dinamici.

Nella stessa annualità del PAR2017, l'oggetto dell'attività numerica ha riguardato l'analisi post-test dei dati sperimentali ottenuti sia in circuito aperto che in circuito chiuso con l'ausilio del codice termoidraulico di sistema RELAP5, con buoni risultati nella simulazione del loop in circolazione naturale (scambio termico in piscina, portata, etc.), al variare del grado di riempimento del circuito e del livello di potenza fornita ai tubi.

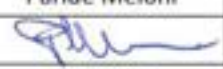
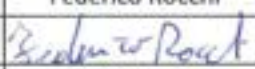
Nell'estensione del PAR2017 oggetto del presente rapporto, prima di procedere a ulteriori test sperimentali si è preferito procedere con un approfondimento numerico attraverso una prima analisi dei test transitori condotti da SIET. Sono stati ottenuti buoni risultati sia in termini qualitativi che quantitativi, anche grazie all'attività di sviluppo del modello della facility condotto in regime stazionario nelle precedenti annualità. Ulteriori miglioramenti al modello potranno essere oggetto di attività future.

I test prodotti da SIET sono da ritenere di alto valore per la validazione dei modelli utilizzati nei codici termoidraulici per la simulazione del comportamento del sistema in condizioni incidentali.

Note


Autori: M. Polidori

Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	01/02/2019	NOME	Massimiliano Polidori	Paride Meloni	Federico Rocchi
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 32
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

INDICE

LISTA DELLE FIGURE.....	3
LISTA DELLE TABELLE	3
1. INTRODUZIONE	4
2. IMPIANTO HERO-2 PER STUDI DI CIRCOLAZIONE NATURALE.....	5
2.1. Descrizione della sezione di prova	5
2.2. Implementazione nell’impianto IETI.....	7
2.3. Strumentazione della facility.....	10
3. LA CAMPAGNA SPERIMENTALE	11
3.1. Configurazioni di prova.....	11
3.2. Caratterizzazione delle dispersioni termiche del circuito	11
4. SIMULAZIONI POST-TEST CON IL CODICE RELAP5	13
4.1. Sintesi delle attività precedenti.....	13
4.2. Il codice RELAP5.....	14
4.3. Il modello RELAP5 di HERO-2 per studi di circolazione naturale.....	14
4.4. Procedura di prova per i test di start-up della circolazione naturale.....	17
4.5. Risultati dell’analisi post-test	18
5. CONCLUSIONI.....	25
ACRONIMI.....	26
BIBLIOGRAFIA	26
APPENDICE A – INFORMAZIONI DI IMPIANTO	27

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 3	di 32
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 – Sezione di un tubo a baionetta e dimensione dei tubi.....	5
Figura 2 – Schema di funzionamento di un tubo a baionetta.....	6
Figura 3 – Immagini di un riscaldatore elettrico.....	6
Figura 4 – Schematizzazione del layout di impianto HERO2-EHRS.....	9
Figura 5 – Funzione delle dispersioni termiche con TF02.....	12
Figura 6 – Confronto della potenza netta in funzione di quella fornita (PAR2015vsPAR2017).....	12
Figura 7 – Schema della nodalizzazione per RELAP5 del circuito di prova HERO-2 per test di start-up della circolazione naturale.....	15
Figura 8 – Confronto delle pressioni nel primo run (test 02-07-2018_1245).....	19
Figura 9 – Confronto delle portate nel primo run (test 02-07-2018_1245).....	19
Figura 10 – Confronto delle temperature nel primo run (test 02-07-2018_1245).....	19
Figura 11 – Confronto delle pressioni (test 02-07-2018_1245).....	20
Figura 12 – Confronto delle portate (test 02-07-2018_1245).....	20
Figura 13 – Confronto delle temperature attraverso la test section (test 02-07-2018_1245).....	21
Figura 14 – Temperature acqua in cold leg (test 02-07-2018_1245).....	21
Figura 15 – Confronto delle temperature attraverso il condensatore (test 02-07-2018_1245).....	21
Figura 16 – Confronto delle temperature di piscina (test 02-07-2018_1245).....	22
Figura 17 – Confronto delle pressioni (test 26-06-2018_1318).....	22
Figura 18 – Confronto delle portate (test 26-06-2018_1318).....	23
Figura 19 – Confronto delle temperature attraverso la test section (test 26-06-2018_1318).....	23
Figura 20 – Confronto delle temperature attraverso il condensatore (test 26-06-2018_1318).....	23
Figura 21 – Confronto delle temperature di piscina (test 26-06-2018_1318).....	24

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 – Principali parametri di progetto.....	5
Tabella 2 – Descrizione degli elementi principali della nodalizzazione.....	16
Tabella 3 – Test dinamici e caratteristiche degli stazionari iniziali.....	18

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFIS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 4	di 32
--	---	------------------	----------------------	------------------	-----------------

1. INTRODUZIONE

A partire dalla terza annualità del PAR 2012-2014, i laboratori SIET di Piacenza hanno ospitato una serie di campagne sperimentali sulla sezione di prova HERO-2 a due tubi a baionetta paralleli allo scopo di acquisire dati di base per la caratterizzazione dei tubi a baionetta e sulla opportunità del loro impiego come generatore di vapore in reattori di tipo SMR.

La sezione di prova HERO-2 era stata messa a disposizione da ENEA, mentre SIET si era occupata del montaggio e la realizzazione delle prove. Ogni tubo a baionetta, del diametro esterno di 2.54 cm e lunghezza 7.2 m, è costituito da un tubo interno che convoglia il liquido in ingresso e un tubo esterno riscaldato elettricamente. Nell'intercapedine tra i due tubi si realizza la generazione di vapore. Il riscaldamento è stato realizzato con un totale di 210 resistori elettrici che avvolgono i due tubi esterni per tutta la loro lunghezza. La facility è in grado di operare a una pressione massima di 70 bar ed una portata di 0.1 kg/s per tubo in circolazione forzata. Il principale limite di sicurezza era rappresentato dalla massima temperatura ammissibile per i riscaldatori esterni di 350°C.

Dopo una prima campagna svolta in circuito aperto e volta alla caratterizzazione dello scambio termico e delle condizioni di instabilità dei due tubi in parallelo [1], nella prima annualità del PAR 2015-2017 si era provveduto alla chiusura del circuito attraverso la connessione con un tubo di condensazione immerso in piscina per il trasferimento del calore al pozzo termico, e all'esecuzione di una nuova campagna sperimentale mirata a caratterizzare il comportamento della sezione di prova HERO-2 in circolazione naturale [2]. Scopo della campagna sperimentale era lo studio del comportamento termoidraulico di un sistema di raffreddamento di emergenza (Emergency Heat Removal System, EHRS) per la rimozione passiva del calore di decadimento in condizioni rappresentative di reattori SMR (Small Modular Reactor) ad acqua pressurizzata. Le prove sono state condotte in regime stazionario.

Nella seconda annualità PAR2016 era stata condotta una campagna di approfondimento volta a comprendere le cause del comportamento oscillatorio che si era manifestato in alcuni test a circuito aperto, dimostrando che espandendo il volume comprimibile in uscita alla test section, queste si smorzavano ma non completamente mostrando con una certa probabilità una fenomenologia intrinseca alla sezione di prova [3]. Nella terza annualità PAR2017 si è continuato con un approfondimento volto alla caratterizzazione delle dispersioni termiche, implementando nuova strumentazione (es. flussimetro a ultrasuoni per la misura diretta di portata), affinando le procedure di prova e provvedendo a stazionari prolungati. Sono stati condotti test in regime transitorio con lo scopo di verificare lo startup della circolazione naturale in caso di eventi incidentali [4].

I dati prodotti in circuito aperto e chiuso del PAR2017 sono stati l'oggetto di analisi post-test con l'ausilio del codice termoidraulico di sistema RELAP5, sfruttando anche l'analisi post-test ottenuta dalla prima campagna sperimentale di caratterizzazione del componente che ha permesso la messa a punto del modello della sezione di prova [5] e del modello di circuito chiuso sviluppato nella seconda annualità [6]. In particolare, l'obiettivo è stato la validazione del codice e delle opzioni di modellazione adottate per la simulazione del loop in circolazione naturale (scambio termico in piscina, portata, etc.), al variare del grado di riempimento del circuito e del livello di potenza fornita ai due tubi [7].

Nell'estensione del PAR2017 oggetto del presente rapporto, , prima di procedere a ulteriori test sperimentali si è preferito procedere con un approfondimento numerico attraverso una prima analisi dei test transitori condotti da SIET allo scopo di verificare lo start-up della circolazione naturale in caso di eventi incidentali, con commutazione dalla configurazione a circuito aperto e circolazione forzata a circuito chiuso, grazie a tre valvole rapide installate allo scopo. L'analisi numerica in condizioni dinamiche è un passaggio obbligato per lo sviluppo di codici termoidraulici e dei modelli di simulazione per la valutazione delle performance di uno scambiatore a baionette per la rimozione del calore di decadimento in condizioni rappresentative di un reattore SMR ad acqua pressurizzata.

2. IMPIANTO HERO-2 PER STUDI DI CIRCOLAZIONE NATURALE

2.1. Descrizione della sezione di prova

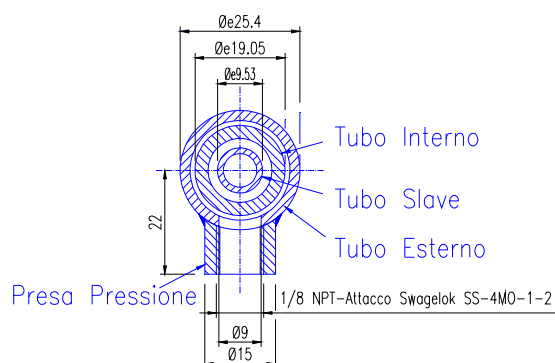
L'oggetto dei test descritti in questo documento è la sezione di prova chiamata HERO-2 (Heavy liquid mEtal pRessurized water cOoled tube #2). Il componente è stato fornito da ENEA [8] a SIET, che si è occupata del montaggio nell'impianto IETI.

La sezione di prova è costituita da due tubi a baionetta e l'insieme è caratterizzato da una lunghezza di circa 7.3 m. Tutte le parti della sezione di prova sono costituite da elementi commerciali e il materiale utilizzato è AISI304. La pressione di progetto della coppia di tubi a baionetta è di 180 bar. In Tabella 1 sono riportati i principali parametri di progetto. L'impianto su cui verrà testato il componente allo stato attuale è in grado di operare a una pressione massima di 70 bar ed una portata di 0.1 kg/s per tubo.

Tabella 1 – Principali parametri di progetto.

Fluido di processo	Acqua
Pressione	180 bar
Temperatura in ingresso	300-335 °C
Temperatura in uscita vapore	400 °C

Ogni tubo a baionetta è costituito da un totale di 3 tubi concentrici, in cui il tubo interno convoglia il liquido in ingresso e il tubo esterno è riscaldato elettricamente. Nell'intercapedine tra i due tubi si realizza la generazione di vapore. In Figura 1 è riportato in sezione un tubo a baionetta in corrispondenza di un attacco per la presa di pressione e in tabella sono riassunte le dimensioni principali dei tubi.



[mm]	Tubo Slave	Tubo Interno	Tubo Esterno
Diametro esterno	9.53	19.05	25.4
Diametro interno	7.09	15.75	21.18
Spessore	1.22	2.77	2.11
Lunghezza	7262	7262	7118

Figura 1 – Sezione di un tubo a baionetta e dimensione dei tubi.

Il centraggio tra tubo slave e tubo interno è effettuato attraverso appositi distanziali, mentre tra tubo interno ed esterno il compito è demandato ai cavi di strumentazione delle termocoppie di fluido poste nella regione anulare che hanno anche il compito di preservare l'integrità delle termocoppie.

All'ingresso di ciascun tubo è posta una struttura saldata sulla camera di vapore in grado di alloggiare gli orifizi, piccoli bulloni forati con lo scopo di stabilizzare il flusso di acqua impedendo la formazione di instabilità. La differenza di pressione misurata tra l'ingresso e l'uscita dell'orifizio permette inoltre di calcolare la portata entrante. All'uscita dalla regione anulare, l'acqua entra in una camera di vapore del diametro di 17 cm e altezza 12 cm su cui sono saldati due bocchelli, di cui flangiato per

l'accoppiamento con l'impianto IETI e l'altro usato per far uscire i cavi delle termocoppie di fluido e quindi sigillato.

Il principio di funzionamento di un generatore di vapore a tubi a baionetta è schematizzato nella seguente Figura 2. L'acqua sottoraffreddata discende dal tubo interno. Nella risalita all'interno dell'intercapedine anulare esterna, avviene la generazione di vapore, dove il calore fornito attraverso il tubo esterno viene rimosso. Per cercare di limitare lo scambio termico tra il fluido caldo in risalita nello spazio anulare e il fluido freddo discendente si deve creare un'intercapedine chiusa ermeticamente e riempita di un mezzo isolante, nel caso di HERO-2 è aria, ma per applicazioni di tipo nucleare è preferibile un gas nobile.

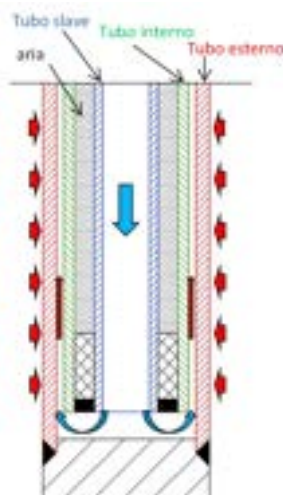


Figura 2 – Schema di funzionamento di un tubo a baionetta.

Il riscaldamento è stato realizzato con un totale di 210 resistori elettrici che avvolgono i due tubi esterni per tutta la loro lunghezza. Ciascun riscaldatore elettrico della lunghezza di 6 cm, di cui un'immagine è visibile in Figura 3, è in grado di erogare 240 W alla tensione di 100 V. Quindi, la potenza totale disponibile per ciascun tubo ammonta a 25.2 kW, che al netto delle perdite di calore verso l'esterno porta ad una potenza stimata di circa 22 kW netti per tubo. La temperatura massima ammissibile è fissata a 350 °C, limite che si è dimostrato essere il più stringente in fase di progettazione e realizzazione dei test. Va segnalato che l'installazione di questa tipologia di riscaldatori porta ad avere una certa discontinuità nel flusso di potenza fornita, che idealmente dovrebbe essere lineare. In primo luogo, perché deve essere lasciato spazio in corrispondenza delle 5 prese di pressione lungo tutto il tubo e poi perché non è chiaro se ci siano effetti di bordo sull'erogazione di potenza. Tuttavia, in prima approssimazione la distribuzione di potenza sarà considerata lineare. Le termocoppie di parete installate da SIET sono state collocate nello spazio lasciato libero tra i resistori, a quote corrispondenti alle termocoppie di fluido.



Figura 3 – Immagini di un riscaldatore elettrico.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 7	di 32
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Ogni tubo è stato suddiviso in due zone di riscaldamento controllato indipendentemente. A seguito dei calcoli di pre-test è stata scelta un'alimentazione di potenza suddivisa in 2/3 nella regione bassa e 1/3 nella regione alta, al fine di avere un maggior controllo sulle temperature di surriscaldamento all'uscita nella camera di vapore.

L'intero impianto è alimentato dai 3 gruppi che compongono il sistema TAMINI presenti in SIET, dove:

- ❖ TAMINI 3 fornisce potenza ai preriscaldatori che condizionano il fluido in ingresso, nel funzionamento a circuito aperto,
- ❖ TAMINI 2 fornisce potenza alla regione 2/3 nella parte bassa dei tubi a baionetta,
- ❖ TAMINI 1 fornisce potenza alla regione 1/3 nella parte alta dei tubi a baionetta.

Riguardo la strumentazione, HERO-2 è stato strumentato in parte già nella fase di assemblaggio con 14 termocoppie di tipo K, 7 per ciascun tubo con passo di 1 m, in grado di fornire la temperatura del fluido nella regione anulare. Nella campagna sperimentale del PAR 2015 sono state installate 2 ulteriori termocoppie TF18 e TF28 poste in corrispondenza dell'uscita dei tubi nella camera di vapore, in modo da ovviare all'assenza di informazioni riguardo lo stato del vapore nella regione superiore (circa 1 m).

In corrispondenza delle termocoppie di fluido sono state anche installate 7 termocoppie di parete (esterna) sul tubo 1, sebbene date le caratteristiche del sistema di riscaldamento e la loro installazione nel gap tra resistenze, queste non forniscono misure rappresentative né della temperatura di parete né della temperatura dei riscaldatori. Possono solo fornire informazioni qualitative.

Sono presenti anche 5 prese di misura della pressione per ciascun tubo disposte a un passo di 1.4 m e sul fondo del tubo è presente una penetrazione dove è connesso un terminale per un trasduttore di pressione differenziale. Si è scelto di strumentare maggiormente uno dei due tubi con 7 misuratori di pressione differenziale.

La strumentazione della sezione HERO-2 può essere quindi riassunta in:

- ❖ 14 termocoppie di fluido, 7 per ciascuno due tubi (di cui la TF15 e TF17 nel tubo 1 e la TF21 nel tubo 2 sono fuori uso e non sostituibili)
- ❖ 7 termocoppie di parete sul tubo 1 (di cui la TW13 è danneggiata)
- ❖ 2 misuratori di pressione assoluta (ingresso e uscita)
- ❖ 11 misuratori di pressione differenziale (DP), di cui 7 sul tubo 1 più strumentato e 4 sul tubo 2
- ❖ Misure di voltaggio e amperaggio per la valutazione della potenza fornita.

SIET stessa ha poi provveduto alla restante strumentazione di impianto al fine di monitorare le condizioni di pressione e perdita di pressione, la portata, la temperatura di ingresso e uscita e la potenza.

2.2. Implementazione nell'impianto IETI

Le prove sulla facility sperimentale HERO2 si inquadrano nel progetto di sistemi integrati di generazione di vapore per i reattori SMR ad acqua leggera, per i quali sia prevista la possibilità di rimuovere tramite circolazione naturale il calore di decadimento generato da uno spegnimento di emergenza di un reattore nucleare.

Grazie alle modifiche apportate all'impianto nelle precedenti campagne sperimentali, la sezione di prova è in grado di essere testata sia in circuito aperto e circolazione forzata, alimentata con acqua sottoraffreddata o satura, oppure in circuito chiuso e circolazione naturale.

L'impianto generale ha uno sviluppo in altezza pari a circa 20 m, nel quale si possono distinguere le seguenti componenti/linee di processo:

- ❖ generatore di vapore (GV) a tubi a baionetta HERO-2;

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 8	di 32
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

- ❖ piscina di raffreddamento con tubo di scambio inclinato, da 2" 1/2 sch. 80;
- ❖ "gamba calda", da 3/4" sch. 40, di collegamento uscita GV - ingresso piscina di raffreddamento;
- ❖ "gamba fredda", da 3/4" sch. 40, di collegamento uscita piscina di raffreddamento - ingresso GV;
- ❖ valvola di sicurezza tarata a 70 bar posizionata all'uscita del GV;
- ❖ linea di estrazione vapore/incondensabili a monte del condensatore sulla sommità dell'impianto;
- ❖ linee di caricamento impianto dal punto più basso, in corrispondenza delle prese di pressione M13 e M23.

Uno schema generale del layout di impianto è riportato in Figura 4, mentre lo schema altimetrico è riportato nel disegno plano-altimetrico in APPENDICE A.

Dallo schema è possibile notare che nell'attività condotta in questa annualità sono state inserite anche tre valvole rapide (V18, V19, V20), la cui commutazione contemporanea permette di passare dal funzionamento a circuito aperto a circuito chiuso. Queste hanno permesso l'esecuzione di alcuni test dinamici per verificare lo start-up della circolazione naturale, oltre che un più agevole passaggio tra le varie configurazioni di prova per l'esecuzione di test stazionari.

Il controllo della portata viene realizzato mediante regolazione della cilindrata della pompa volumetrica IMAMI. La potenza imposta per mezzo delle resistenze scaldanti installate sulla parete esterna dei tubi della sezione di prova può essere considerata uniforme in tutta la loro lunghezza in modo da rendere il trasferimento di potenza al fluido circolante più simile possibile a quello che avverrebbe in uno scambiatore immerso in un fluido primario.

In circuito aperto, il controllo di pressione avviene allo scarico della sezione di prova dove è presente un sistema composto da una valvola pneumatica e una valvola manuale di contropressione posta in parallelo, entrambe situate in una diramazione della hot leg.

In circolazione naturale, non ci sono organi meccanici che movimentano il fluido, né valvole attuate di regolazione per portata e pressione, per cui il livello di pressione raggiunta nei test è funzione di soli due parametri che possono essere controllati:

- ❖ potenza elettrica erogata
- ❖ grado di riempimento (Filling Ratio, FR).

Variando queste grandezze, i valori di portate, pressioni, titoli in uscita e temperature si determineranno autonomamente e uno degli obiettivi della campagna sperimentale è stata la loro registrazione.

I P&I di impianto del circuito aperto e chiuso sono riportati in APPENDICE A.

Sulle prese delle linee manometriche M13 e M23 sono state predisposte due valvole (indicate nel P&ID come V03 e V04), una per tubo per il riempimento dell'impianto, collegate alla pompa centrifuga che provvede al riempimento iniziale, a bassa pressione. Questa posizione è stata scelta in quanto costituisce il punto più basso del circuito, come risulta evidente dal disegno altimetrico di APPENDICE A.

Sulla sommità della linea di ingresso alla piscina, costituente il punto più alto dell'impianto è presente una piccola valvola di scarico collegata ad un condensatore ausiliario: questa valvola ha la duplice funzione di indicare il completo riempimento dell'impianto una volta che l'acqua comincia a traboccare e a permettere, durante il funzionamento in temperatura ed in pressione, assieme al condensatore, di estrarne una quantità controllata, condensarla perché poi venga pesata.

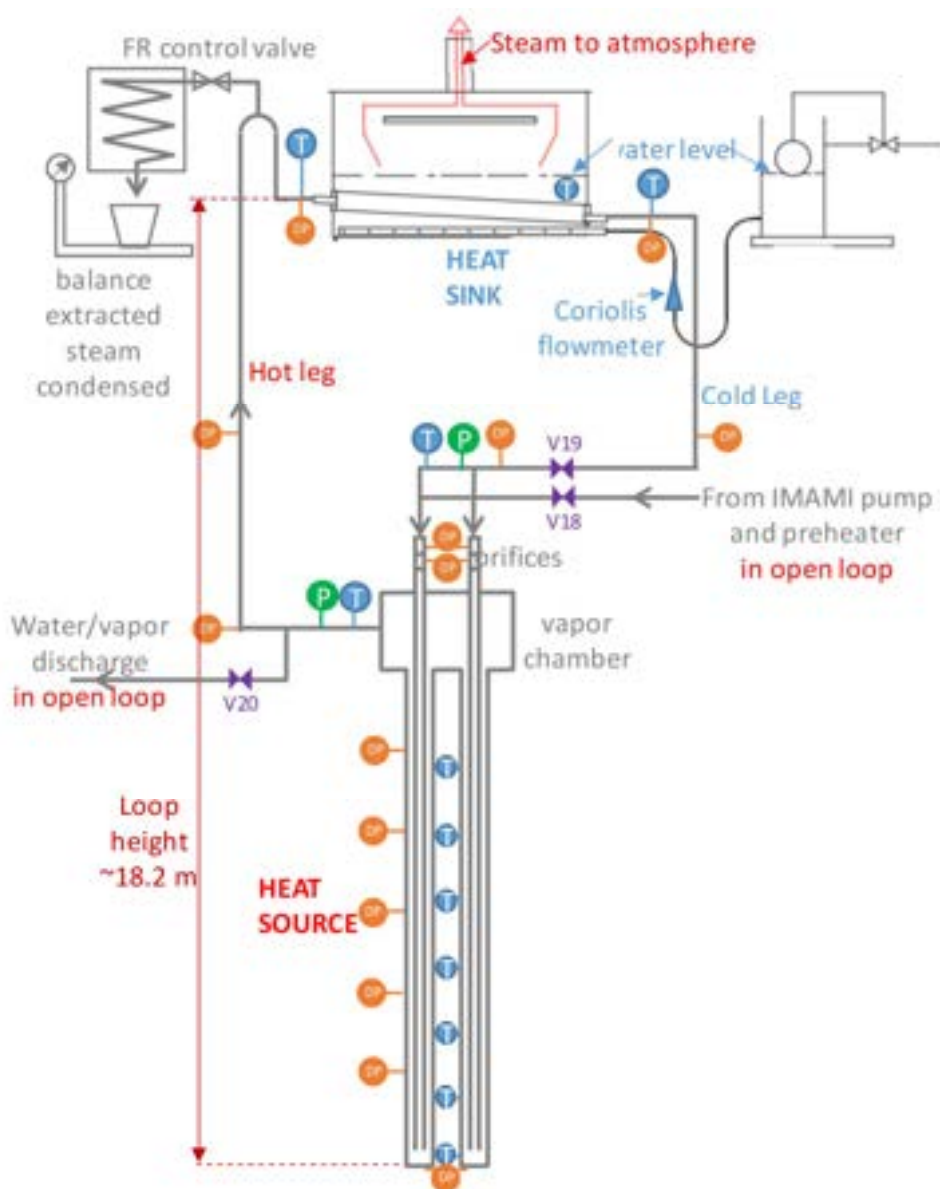


Figura 4 – Schematizzazione del layout di impianto HERO2-EHRS.

Misurata la capienza massima del circuito (escluse linee manometriche) pari a 19.788 kg di acqua a temperatura ambiente, il FR è determinato in base alla seguente relazione:

$$FR = \frac{M_{max} - M_{estratta}}{M_{max}}$$

dove M_{max} è la massa di acqua a freddo corrispondente a un totale riempimento del circuito e $M_{estratta}$ è la massa d'acqua sottratta al circuito.

La potenza elettrica erogata, al netto delle perdite, viene rimossa dalla piscina in cui è immerso il tubo condensatore. La quantità di acqua evaporata a causa della potenza termica scambiata viene reintegrata mediante una pompa centrifuga. Il livello della piscina di raffreddamento è regolato dal livello della piscina ausiliaria mediante una valvola a galleggiante. La valvola mantiene nelle due piscine un livello costante tale da assicurare la completa copertura del tubo condensatore. All'inizio della registrazione di ogni test stazionario, in questa campagna si è provveduto a fermare il reintegro di acqua della piscina, cosicché l'abbassamento del livello di acqua in piscina fornisce un'informazione

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 10	di 32
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

più accurata sulla potenza rimossa dal condensatore. La diminuzione del livello di acqua è stimata attraverso la misura della pressione differenziale DP48 tra base e sommità della piscina, anch'essa aggiunta in questa campagna.

2.3. Strumentazione della facility

Per le misure delle grandezze fisiche è stata predisposta la strumentazione riportata nella tabella compresa in APPENDICE A. Occorre specificare che le termocoppie di fluido e di parete della sezione di prova erano comprese nella fornitura della stessa, pertanto non ne sono forniti i certificati. Le termocoppie di fluido TF15, TF17 sul tubo 1, la TF21 sul tubo 2 e la termocoppia di parete TW13 sono rimaste fuori uso per tutta la campagna sperimentale in quanto danneggiate.

Per le misure di portata massica circolante in questa campagna è stato installato un flussimetro a ultrasuoni sulla linea di ritorno del condensato, a differenza delle precedenti campagne in cui la misura poteva solo essere calcolata indirettamente dalle misure di differenza di caduta di pressione a cavallo degli orifizi di ingresso (DP11 e DP21) [2].

Riassumendo, la nuova strumentazione aggiuntiva impiegata in questa campagna:

- Un flussimetro a ultrasuoni
- Un trasmettitore di pressione differenziale per la misura del livello in piscina, DP48
- Due TC di fluido, TF06 e TF07 per la verifica delle condizioni del fluido nella steam line, per verificare le condizioni di saturazione,
- Tre valvole rapide V18, V19, V20 per l'esecuzione di test dinamici di start-up della circolazione naturale.

Per maggiori informazioni sulla campagna sperimentale e la sua esecuzione si rimanda a [4].

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFIS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 11	di 32
--	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

3. LA CAMPAGNA SPERIMENTALE

3.1. Configurazioni di prova

Nella campagna sperimentale del PAR 2017, la sezione di prova è stata utilizzata in 3 diverse configurazioni, in base alla tipologia dei test che si sono eseguiti.

Configurazione a circuito aperto

L'impianto, in circuito aperto, è rappresentato nei P&ID in APPENDICE A. In questa configurazione le valvole rapide V18 e V20 sono aperte, mentre la V19 è chiusa. Questa è la configurazione iniziale per tutte le prove dinamiche che prevedono un successivo passaggio dell'impianto alla configurazione in circuito chiuso.

Configurazione a circuito chiuso

La configurazione a circuito chiuso è stata impiegata nelle prove in circolazione naturale a circuito chiuso e come stato finale nelle prove di start up della circolazione naturale a seguito di intervento delle valvole rapide, in cui V18 e V20 sono chiuse, mentre V19 è aperta. L'impianto è rappresentato nei P&ID in APPENDICE A.

Configurazione a circuito aperto per test di dispersione termica

Per la determinazione delle dispersioni nei vari tratti del circuito, un flusso di acqua sottoraffreddata è stato fatto circolare in modo forzato attraverso tutto il circuito. Per ottenerlo, le valvole V163 e V08, che nella configurazione a circuito aperto sono collegate all'uscita della sezione di prova, sono state connesse alla base della drain line. In questo modo anche steam line, piscina e drain line possono essere flussate e quindi caratterizzate in termini di dispersioni. L'impianto è rappresentato nei P&ID in APPENDICE A (configurazione aperta estesa dove il gruppo valvole di controllo della pressione è derivato a partire dalla linea di ritorno del condensato).

3.2. Caratterizzazione delle dispersioni termiche del circuito

In questa sede si ritiene utile riportare alcune informazioni riguardo la stima delle dispersioni termiche del circuito.

Nella precedente campagna sperimentale, le dispersioni termiche della sezione di prova erano state calcolate mediante un bilancio tra potenza elettrica erogata al generatore di vapore e potenza estratta in piscina; quest'ultima era derivata a partire dalla misura diretta della portata di reintegro di acqua alla piscina effettuata con un Coriolis e dalla differenza tra l'entalpia del vapore saturo alla temperatura di piscina misurata (T04) e l'entalpia del liquido a condizioni ambientali, stimate a 28°C e 1.013bar. Il bilancio descritto è realizzato secondo la seguente equazione:

$$V_{TAM1}I_{TAM1} + V_{TAM2}I_{TAM2} - \dot{m}_{F02}(h_{vs}(TF04) - h(1.013bar, 28^{\circ}C)) = \dot{Q}_{loss}$$

L'insieme dei risultati è riportato in Figura 5 dove la stima delle perdite di calore è messa in relazione alla temperatura di uscita dalla sezione di prova TF02 con correlazione polinomiale di secondo grado. L'elevata dispersione dei punti sperimentali, conseguenza dei lunghi tempi di regimazione del livello della piscina, si è rivelato un forte limite per le simulazioni con codice di calcolo. La campagna sperimentale di questa annualità aveva come principale scopo la riduzione delle incertezze legate alle perdite di calore.

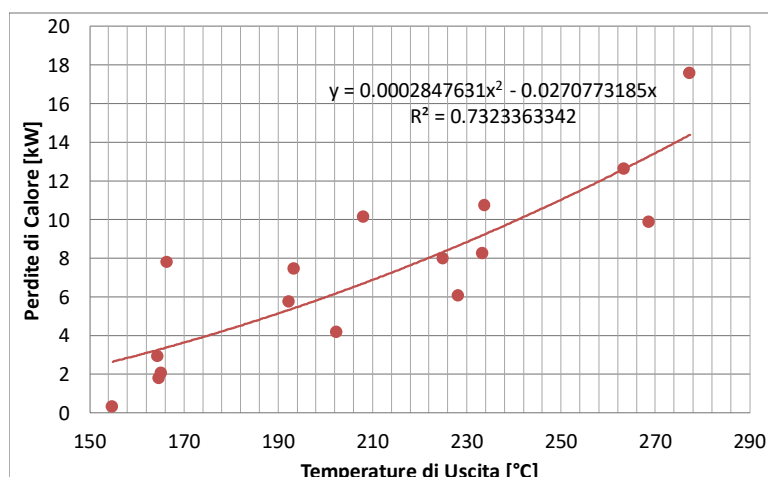


Figura 5 – Funzione delle dispersioni termiche con TF02

Il confronto tra la potenza elettrica erogata rispetto a quella all'uscita dalla piscina, esteso alle due campagne sperimentali, è illustrato in Figura 6. La stima delle potenze nette risulta molto ben rappresentata e con spread dei dati molto ridotto rispetto ai risultati del PAR2015. Questo miglioramento è quantificabile attraverso il coefficiente di determinazione della regressione lineare rappresentata nel grafico (R2). Inoltre gli scostamenti dei punti peggiori dalla retta di regressione passano dal 20% registrato nel PAR2015 al 6% nel PAR2017.

Anche l'intercetta all'asse x della retta di regressione dei risultati del PAR2017 (che vale 3.1631) rappresenta meglio la presenza di un termine di dispersioni dipendente solo dalla temperatura rispetto ai risultati del PAR 2015, dove l'intercetta risulta nulla.

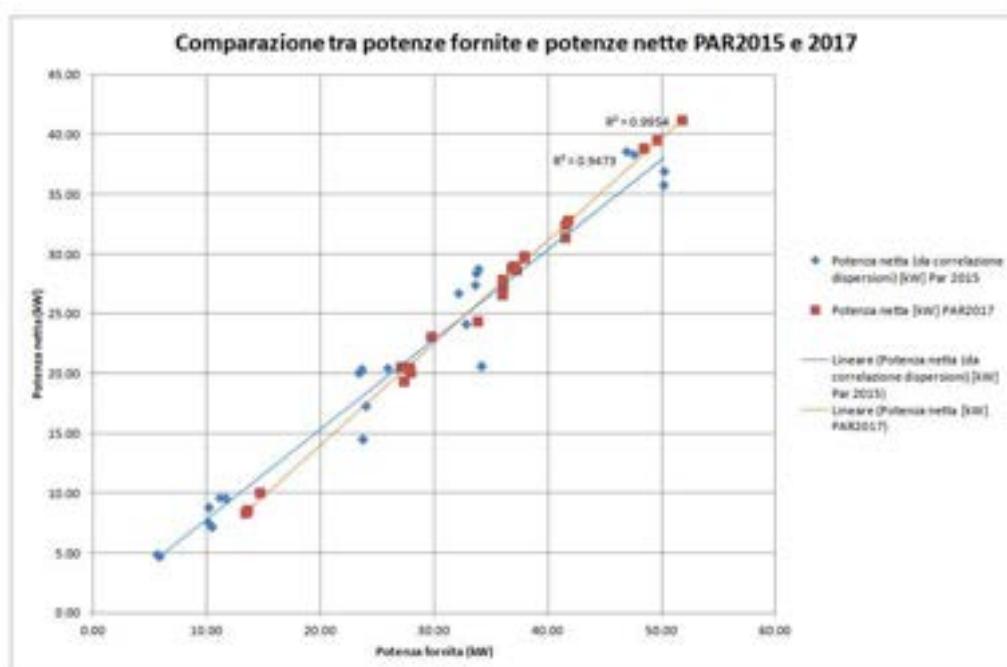


Figura 6 – Confronto della potenza netta in funzione di quella fornita (PAR2015vsPAR2017).

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFIS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 13	di 32
--	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

4. SIMULAZIONI POST-TEST CON IL CODICE RELAP5

4.1. Sintesi delle attività precedenti

Nella annualità PAR2015, i risultati dei test sperimentali condotti in circuito aperto per la caratterizzazione della sezione di prova HERO-2 [1] sono stati utilizzati per la validazione post-test del codice di sistema RELAP5. In particolare i dati utilizzati erano quelli della revisione definitiva del documento fatta da SIET. Il risultato di quell'attività può essere riassunto in una buona capacità del modello di riprodurre sia i test di caratterizzazione a singolo tubo, sia i test di instabilità a due tubi, a valle di una calibrazione che ha interessato: le perdite di carico attraverso l'orifizio e sul canale anulare, le perdite di calore verso l'esterno e la conducibilità termica dell'aria presente nell'intercapedine tra i tubi slave e inner [5].

Nel PAR2016, il modello per RELAP5 della sezione di prova HERO-2 è stato usato come base per la costruzione del circuito chiuso usato per prove di circolazione naturale [2] e calibrato. La calibrazione ha riguardato principalmente lo scambio termico del condensatore, fortemente sottostimato da RELAP5. Tutti i test a doppio tubo erano stati simulati imponendo ai riscaldatori la potenza netta stimata attraverso i dati sperimentali, mentre il sistema era mantenuto in condizioni adiabatiche con la semplice rimozione del calore nel condensatore. La stima della potenza netta era però affetta da molteplici incertezze. In primo luogo non si disponeva di una misura diretta della portata, inoltre, nelle valutazioni dei bilanci termici non si erano tenute in considerazione le perdite di calore della piscina, con il risultato che la stima delle dispersioni termiche lungo il loop (potenza elettrica – potenza sottratta in piscina) era molto differente anche per test con caratteristiche simili. Un'altra motivazione di queste incertezze era dovuta ai lunghi tempi di regimazione dell'impianto e alla necessità operativa di accelerare l'acquisizione dei test. In alcuni casi, non è certo che il sistema abbia raggiunto un reale stato stazionario. Il modello RELAP5, infatti, non si era dimostrato capace di interpretare l'intera campagna sperimentale fornendo ampie differenze sulle simulazioni delle pressioni di saturazione (sia sovra- che sotto-stimate) e portate sempre sovrastimate [6].

Nella campagna di simulazione del PAR2017 si sono prese in considerazione i dati sperimentali prodotti da SIET all'interno della stessa annualità, dove molte delle incertezze sui bilanci termici sono state rimosse grazie all'uso di nuova strumentazione e procedure sperimentali [4], vedi Cap. 2 di questo rapporto. In particolare, il modello calibrato con un test a circuito aperto esteso e circolazione forzata è stato usato per l'analisi post-test di tutte le prove condotte a circuito chiuso, con lo scopo di ottenere uno strumento di calcolo univoco in grado di interpretare l'intera campagna. I risultati ottenuti sono stati incoraggianti, sufficienti a una corretta comprensione delle diverse fenomenologie presenti nella matrice di test, con buone stime nella valutazione delle pressioni di saturazione ma con portate generalmente sovrastimate. Questi risultati sono stati però ottenuti a fronte di un incremento del coefficiente di scambio termico del condensatore, che ha determinato un incremento eccessivo della differenza di temperatura attraverso il componente.

Nell'attività proposta come estensione del PAR2017 oggetto del presente rapporto, si è provveduto ad un'analisi preliminare dei test dinamici di start-up della circolazione naturale condotti da SIET.

Dopo una piccola introduzione del codice RELAP5 (§4.2), viene presentato il modello della facility HERO-2 al §4.3, che ha richiesto alcune piccole modifiche per permettere il passaggio dalla configurazione aperta a quella chiusa, e infine i risultati ottenuti al §4.5.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFIS – LP1 – 128	0	L	14	32

4.2. Il codice RELAP5

RELAP5 mod3.3 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) [9] è un codice di calcolo termoidraulico sviluppato da US-NRC (United States – Nuclear Regulatory Commission) in collaborazione con i paesi che hanno preso parte all'accordo CAMP (Code Applications and Maintenance Program) che rappresenta a tutt'oggi un codice di riferimento per simulazioni termoidrauliche, sebbene la Commissione stia spingendo per l'adozione del nuovo codice TRACE.

RELAP5 è sviluppato e utilizzato per studi che variano dal design al licensing di reattori ad acqua leggera, e per analisi di transitori operativi e incidentali. Inoltre, date le potenzialità del codice, esso è largamente usato per simulazioni termoidrauliche di una grande varietà di sistemi nucleari e non, sia ad acqua leggera sia con altri fluidi di processo.

Il codice RELAP5 usa un modello idrodinamico di tipo monodimensionale bifase monocomponente con la possibilità di tenere conto dell'eventuale presenza di gas incondensabili nella fase vapore o di un soluto non volatile nella fase liquida. L'ipotesi base del RELAP5 è di disequilibrio meccanico e termodinamico tra le fasi, ma permette anche di utilizzare modelli più semplici come quello omogeneo, dell'equilibrio termico e del moto senza attrito.

4.3. Il modello RELAP5 di HERO-2 per studi di circolazione naturale

La nodalizzazione adottata è riportata in Figura 7, e in Tabella 2 una breve descrizione dei principali elementi che la compongono.

Il modello è stato preparato per la simulazione completa dei due tubi a baionetta, quindi i due tubi paralleli sono stati integralmente simulati. La meshatura piuttosto fine risulta composta da circa 420 mesh totali. La parte riguardante la sezione di prova è stata mutuata dall'analisi post-test della campagna 2015 in circuito aperto.

Seguendo il flusso d'acqua a partire dall'orifiziatura in ingresso ai tubi 80 e 90, il flusso attraversa i canali discendenti 100 e 200 all'interno dei tubi slave per poi risalire gli anulari in senso ascendente 110 e 210 dove grazie al flusso termico fornito dai riscaldatori esterni ha luogo la generazione di vapore. Il vapore proveniente dai due tubi viene convogliato nella camera vapore 311 e attraverso la tubazione di gamba calda 420 raggiunge il tubo di condensazione 430 immerso in piscina (volume 500). Il tubo è leggermente inclinato di 3° per facilitare l'efflusso di liquido, come si può vedere nel disegno di piscina in APPENDICE A. Il condensato viene poi riportato alla sezione di prova attraverso la tubazione di gamba fredda 440. Tra la cold leg e gli orifici è posta la valvola 441 (trip) a simulare la valvola V19 dell'impianto, che impedisce la circolazione nel circuito primario.

Il funzionamento a circuito aperto è simulato con condizioni al contorno. La temperatura di ingresso e la portata in circolazione forzata sono regolate con il volume tempo-dipendente 10 e con la tmdpjun 15, che simula anche la valvola 18 dell'impianto quando la portata è azzerata e si ha il passaggio da circuito aperto a chiuso. La valvola 345 (trip) simula la valvola V20 dell'impianto e il volume 350 serve ad imporre la pressione relativa allo stazionario precedente il transitorio.

Completa il circuito primario della facility un sistema composto da una giunzione 421 e un volume 422 tempo-dipendenti che hanno la funzione di scaricare una piccola portata di acqua al corrispondente condensatore C1 come da procedura di impianto, che ha lo scopo di preriscaldare la hot-leg. In assenza di questa procedura, non si sarebbe riusciti ad avere vapore nella gamba calda.

Il volume complessivo della piscina di condensazione è stato suddiviso dapprima in tre volumi al fine di tenere in considerazione i fenomeni convettivi che si possono creare all'interno della piscina. La parte bassa, di altezza 20 cm, è a sua volta suddivisa tra i volumi 500 e 501, di cui solo il primo è accoppiato termicamente con il tubo di condensazione. La parte superiore della piscina è rappresentata dal volume 502, di altezza 38 cm, dove si presenta il pelo libero di acqua a un'altezza di

circa 5 cm. Il volume 502 è quindi messo in contatto con l'ambiente esterno alla pressione di 1 Atm e 20 °C attraverso 515 e 520, dove viene rilasciato il vapore generato. Dato che in questa campagna è stata aggiunta una misurazione di differenza di pressione attraverso la piscina, DP48, dai volumi sottostanti sono stati ricavati ulteriori due volumi, 503 e 504, di altezza 1 cm per poter determinare la pressione alla base della piscina. Per finire, un sistema composto da una valvola motorizzata e un volume tempo-dipendente con acqua a 20°C e 1 Atm provvede al reintegro di acqua in piscina per mantenere il livello a circa 25 cm, sufficienti a tenere il tubo di condensazione sotto battente.

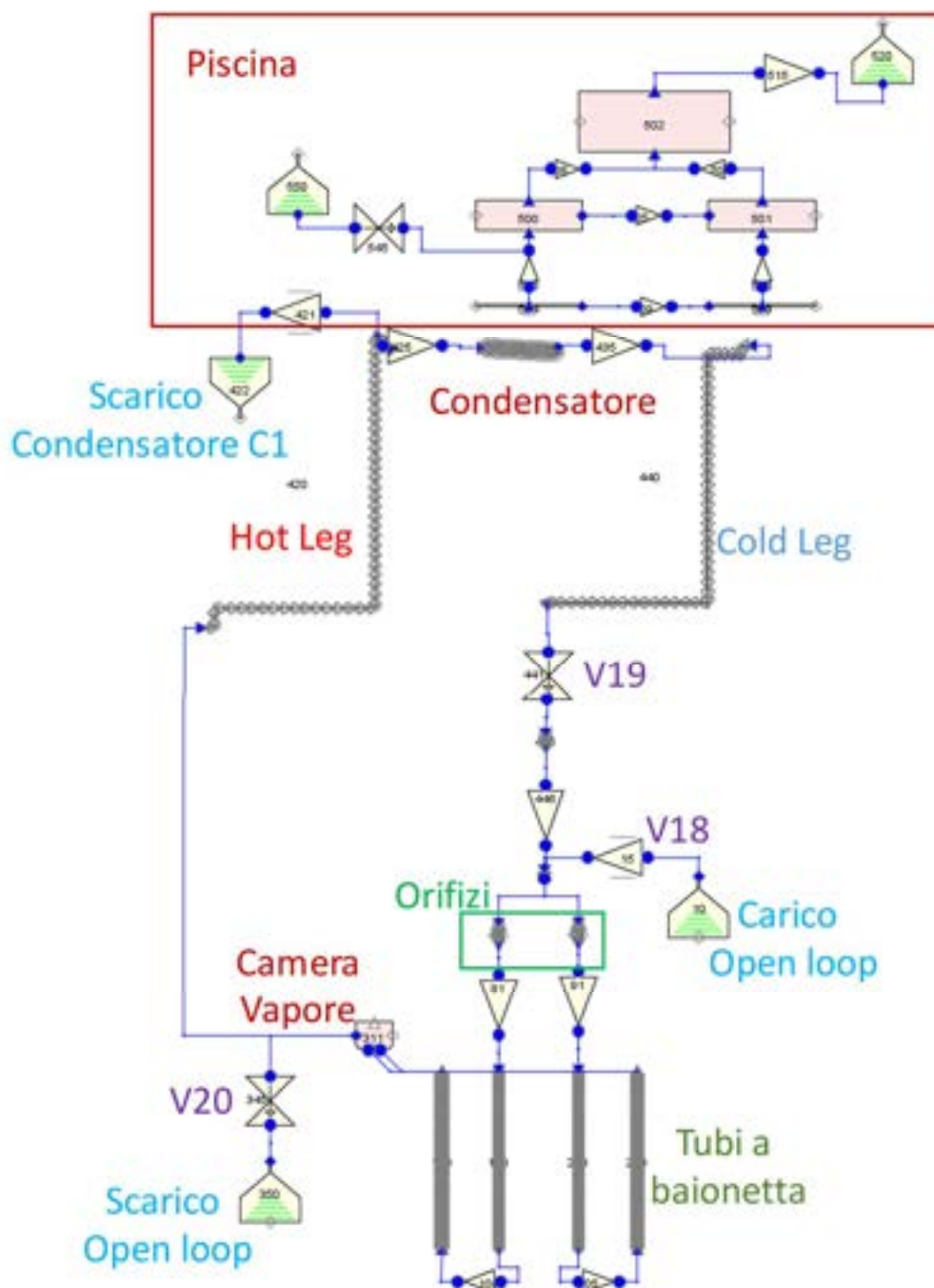


Figura 7 – Schema della nodalizzazione per RELAP5 del circuito di prova HERO-2 per test di start-up della circolazione naturale.

Le strutture termiche simulate sono:

- ❖ la parete di accoppiamento tra tubo discendente e anulare ascendente dei tubi a baionetta, modellati con una struttura multistrato composta da AISI 304 e uno strato intermedio di aria secca con conducibilità $k=0.038 \text{ W/m/K}$, e calore specifico $c_p=1050 \text{ J/kg/K}$
- ❖ la parete esterna di ciascun tubo, modellata con due strutture termiche separate in senso assiale con lo schema $2/3 - 1/3$ dell'altezza della baionetta, ciascuna in AISI304 più un ulteriore strato dello stesso materiale in cui viene fatto generare calore per simulare i riscaldatori esterni
- ❖ la parete del tubo di condensazione, in AISI304 che accoppia il circuito primario con la piscina
- ❖ le tubazioni di gamba fredda e calda sono state simulate in AISI304 e coibentate con lana di roccia
- ❖ le pareti della piscina di condensazione in AISI304 coibentato con lana di roccia
- ❖ un tratto di tubazione di lunghezza 45 cm, pipe 445, in cui si è simulata la presenza della valvola rapida V19 che costituisce una importante capacità termica non coibentata.

Tabella 2 – Descrizione degli elementi principali della nodalizzazione.

Numero	Tipo	Caratteristiche Circuito Primario
10 - 15	tmdpvol+tmdpjun	Iniezione di acqua in circuito aperto (valvola V18 in circuito aperto)
50	branch	Volume di separazione della portata sui due tubi
80 - 90	pipe	Regione di ingresso ai tubi con orifizio
100 - 200	pipe	Tubo centrale discendente
110 - 210	annulus	Regione anulare ascendente di generazione del vapore
311	branch	Volume della camera di vapore
420	pipe	Gamba calda
421 - 422	tmdpjun+ tmdpvol	Scarico al condensatore C1 in circuito aperto
430	pipe	Tubo di condensazione immerso in piscina
440 - 445	pipe	Gamba fredda
441	tripvlv	Valvola rapida V19 di chiusura circuito primario
345+350	tripvlv+tmdpvol	Scarico di acqua in circuito aperto (valvola V20 in circuito aperto)
		Caratteristiche Piscina
500	snglvol	Volume di piscina accoppiato termicamente con tubo condensatore
501 - 502	snglvol	Volumi di piscina per la circolazione naturale al suo interno
503 - 504	snglvol	Volumi di piscina per controllo pressione (DP48)
515+520	sngljun+tmdpvol	Condizione atmosferica in piscina
545+550	mtrvlv+tmdpvol	Reintegro controllato di acqua in piscina per mantenerne il livello
Strutture termiche simulate		
100-1 200-1		Parete a strati tra tubo discendente e ascendente (AISI304-Aria-AISI304)
110-1 210-1		Parete esterna con riscaldatore nella zona 2/3 inferiore
110-2 210-2		Parete esterna con riscaldatore nella zona 1/3 superiore
311-1		Parete della camera vapore
420-1		Gamba calda in AISI304
430-1		Parete scambiante tra condensatore e piscina
440-1		Gamba fredda in AISI304
445-1		Valvola V19 non coibentata
500/1/2-1		Pareti della piscina di condensazione

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFIS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 17	di 32
--	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

A differenza delle simulazioni della precedente annualità, nella sezione di prova viene imposta la reale potenza elettrica registrata nei test e tutte le strutture termiche sono messe in contatto con l'ambiente esterno a simulare le reali perdite di calore del circuito. Il coefficiente di scambio termico convettivo con l'ambiente è imposto a 10 W/m²/K e la temperatura ambiente a 27 °C.

Inoltre, dati gli scopi della presente campagna, si è considerata una generazione di potenza uniforme in entrambe le zone. Rispettando le condizioni di prova sperimentale.

Per quanto riguarda le perdite di carico è stata imposta una rugosità di 3.2 um per il calcolo delle perdite distribuite. Le perdite di carico concentrate della sezione di prova sono state calibrate nel precedente post-test con dati in circuito aperto, mentre le perdite concentrate lungo il loop dovute a cambi di direzione e area di passaggio sono state valutate con correlazioni in letteratura [10].

4.4. Procedura di prova per i test di start-up della circolazione naturale

Per l'esecuzione delle prove di isolamento del circuito a seguito di evento incidentale, si è previsto il passaggio repentino da circuito aperto a chiuso tramite la commutazione contemporanea delle 3 valvole rapide di isolamento V18, V19 e V20, e la successiva instaurazione della circolazione naturale. Si parte realizzando una circolazione a circuito aperto con l'ausilio della pompa IMAMI e del preriscaldatore; le valvole V18 e V 20 sono aperte, mentre la V19 è chiusa. Operativamente è stato necessario mantenere leggermente aperta la linea del condensatore C1, scaricando una portata di circa 3-5 g/s. In assenza di questo flussaggio ausiliario, all'interno della steam line non si riusciva ad avere la presenza di vapore, a causa del piccolo diametro della linea stessa, che non consente il moto controcorrente di vapore e condensa. Nel caso di un impianto reale, il diametro delle linee è tale da garantire che la steam line rimanga naturalmente piena di vapore saturo secco senza altri interventi.

Dopo aver stabilizzato l'impianto alla portata, pressione e potenza volute, vengono commutate le valvole rapide, per cui V18 e V20 vengono chiuse, mentre V19 viene aperta, mentre la pompa e il preriscaldatore vengono spenti.

Quest'ultima manovra dà il via ad un transitorio che termina con il raggiungimento dell'ebollizione in piscina. Sperimentalmente la prova ha termine quando il battente dovuto al livello in piscina non si sia abbassato di circa un kPa rispetto al riempimento iniziale. Il livello si abbassa perché all'inizio del transitorio si provvede a chiudere la valvola di reintegro dell'acqua in piscina per permettere una migliore stima della potenza estratta dal circuito primario.

Nella fase precedente il transitorio, nonostante la valvola V19 sia chiusa, la parte di circuito comprendente il condensatore e la cold leg non sono isolate, per cui durante il funzionamento a circuito aperto una piccola quantità di vapore fluisce comunque attraverso il condensatore e una fase liquida fredda si viene ad accumulare all'interno della cold leg. L'entità di questo volume di acqua fredda avrà rilevanza nell'evoluzione del successivo transitorio per due motivi:

1. contribuisce a determinare il FR nel passaggio a circuito chiuso, una volta che le valvole rapide sono state commutate,
2. costituisce un volume di acqua fredda che all'apertura della valvola V19 si riversa nella sezione di prova con effetto sulle temperature e pressioni del transitorio.

4.5. Risultati dell'analisi post-test

I test dinamici di start up della circolazione naturale della campagna messi a disposizione da SIET sono raccolti in Tabella 3 in cui sono stati riportati anche le caratteristiche dei parametri principali degli stazionari iniziali: potenza della sezione di prova, pressione e portata imposta. Il FR non è un parametro controllabile in questo tipo di test poiché si determina in autonomia quando vengono commutate le valvole rapide, in base a quanta acqua viene intrappolata nel circuito chiuso. La massa totale a freddo di acqua che può essere contenuta nel circuito è stata pesata in 19.788 kg, escludendo le linee manometriche.

Tabella 3 – Test dinamici e caratteristiche degli stazionari iniziali.

Nome del file acquisito	Potenza totale	Pressione	Portata
	kW	bar	g/s
02-07-2018_1245	38.070	19.95	27.2
26-06-2018_1318	36.900	49.85	20.3
23-07-2018_1241	41.520	67.4	22.4

Come già spiegato al §3.2, la stima delle dispersioni termiche sperimentali è stata effettuata attraverso bilanci termici, in cui alla potenza elettrica reale introdotta nella sezione di prova viene sottratta la potenza asportata in piscina. In questa campagna, grazie alla nuova strumentazione, è stato possibile calibrare il modello RELAP5 della facility di prova con dati sperimentali più consistenti.

Nella precedente annualità, il modello modificato e calibrato con un test a circuito aperto esteso e circolazione forzata è stato usato per l'analisi post-test di tutte le prove condotte a circuito chiuso, con lo scopo di ottenere uno strumento di calcolo univoco in grado di interpretare l'intera campagna.

Il modello calibrato aveva fornito risultati incoraggianti, sufficienti a una corretta comprensione delle diverse fenomenologie presenti nella matrice di test, con buone stime nella valutazione delle pressioni di saturazione ma con portate generalmente sovrastimate. Questi risultati sono stati però ottenuti a fronte di un incremento del coefficiente di scambio termico del condensatore, che ha determinato un incremento eccessivo della differenza di temperatura attraverso il componente [7].

In questa annualità, per motivi legati ai tempi di calcolo e al tempo limitato dell'estensione del progetto, non si è potuto provvedere ad un'indagine sulle ragioni della necessità di tale incremento, né si è potuto migliorare la calibrazione del modello. Si è preferito quindi testare l'attuale modello allo scopo di avere alcune risposte preliminari sulle sue capacità di simulazione anche in regime dinamico, con la consapevolezza di alcuni suoi limiti che potranno essere oggetto di analisi in future attività.

Nel primo run di calcolo condotto per il test del 02-07-2018 senza particolari accorgimenti adottati nel modello di simulazione se non l'introduzione delle condizioni di prova, i principali risultati ottenuti sono riportati nei seguenti grafici. Il confronto tra le pressioni calcolate e simulate di Figura 8 mostra come l'evoluzione del transitorio sia ben riprodotto qualitativamente ma non quantitativamente. Una importante informazione che si può trarre è che il FR che si è ottenuto nella configurazione a circuito chiuso risulta corretto, in quanto la pressione a cui si stabilizza lo stazionario è ben riprodotta. La quantità di acqua relativa allo stazionario finale è 10.605 kg, corrispondente a un FR di 0.536. Per la corretta lettura delle portate sperimentali, riprodotte in Figura 9, bisogna considerare che prima del transitorio la portata è fornita dallo strumento F0001 (Coriolis), mentre in circuito chiuso è fornita dal flussimetro a ultrasuoni. La portata in circolazione naturale è sovrastimata, così come lo era nelle precedenti analisi condotte su test stazionari, con oscillazioni della stesa ampiezza di quella misurata dal flussimetro.

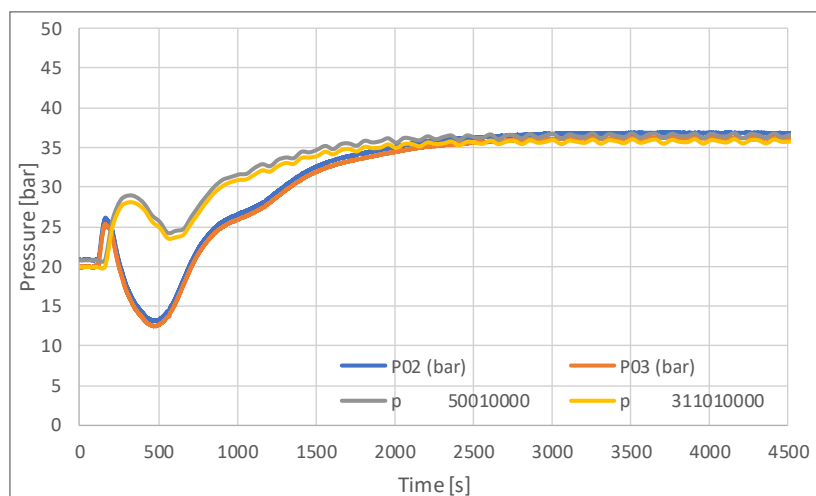


Figura 8 – Confronto delle pressioni nel primo run (test 02-07-2018_1245).

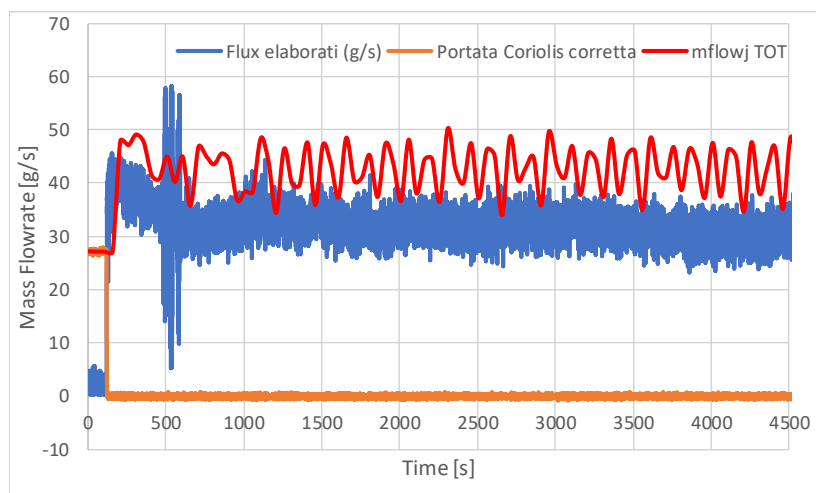


Figura 9 – Confronto delle portate nel primo run (test 02-07-2018_1245).

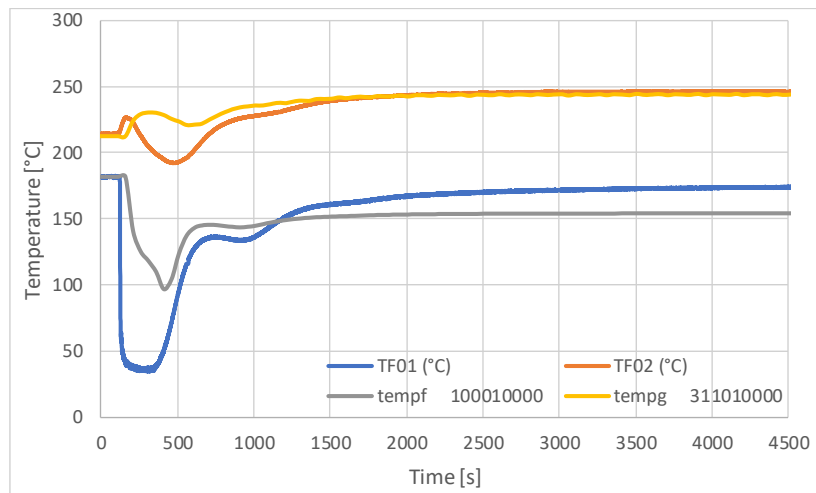


Figura 10 – Confronto delle temperature nel primo run (test 02-07-2018_1245).

In Figura 10 è riportato il confronto tra le temperature di ingresso e uscita alla test section. In questo grafico è possibile notare una netta differenza nella discesa della temperatura in ingresso alla sezione

di prova che sperimentalmente è un brusco calo fino alla temperatura di circa 40 °C mentre nella simulazione non scende mai al di sotto dei 100 °C. Questo significa che la temperatura dell'acqua che si accumula nella cold leg è troppo alta, ma analizzando i risultati è stato chiaro che il motivo risiedeva nel fatto che la temperatura non aveva raggiunto condizioni stazionarie accettabile, risultando in raffreddamento. Quindi i tempi per il raggiungimento dello stazionario iniziale sono stati allungati da 2000 s a 10000 s.

Le simulazioni ottenute con estensione dello stazionario iniziale e con una portata imposta allo scarico del condensatore C1 di 3 g/s sono riportate di seguito. Il confronto delle pressioni di Figura 11 mostra un certo miglioramento dell'evoluzione della pressione durante la fase transitoria, ma anche un certo peggioramento per quanto riguarda lo stazionario finale in cui la pressione risulta sovrastimata. Questo è dovuto ad un eccesso di accumulo d'acqua nella cold leg e nel condensatore che a inizio transitorio risultano completamente riempiti d'acqua. La massa di acqua intrappolata nel circuito chiuso all'attuazione delle valvole è di 10.945 kg corrispondenti a un FR di 0.553. Il lieve incremento nell'inventario di acqua nel circuito, circa 300 g, è comunque sufficiente a giustificare l'incremento della pressione di saturazione stimata con il codice.

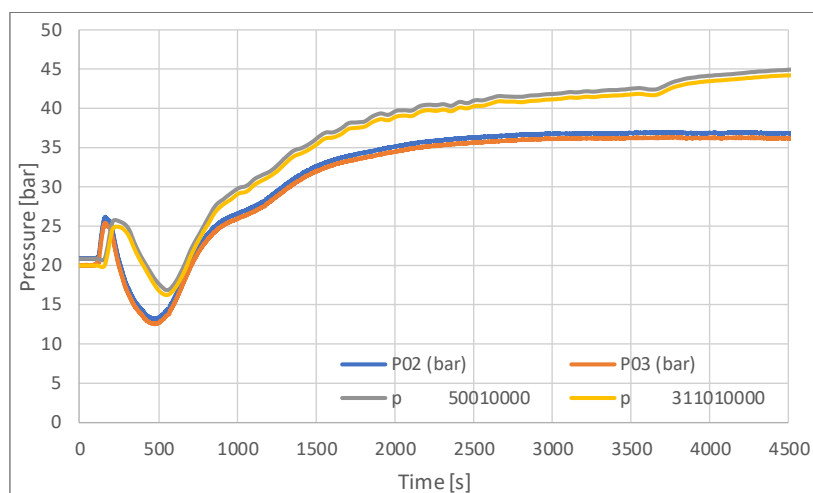


Figura 11 – Confronto delle pressioni (test 02-07-2018_1245).

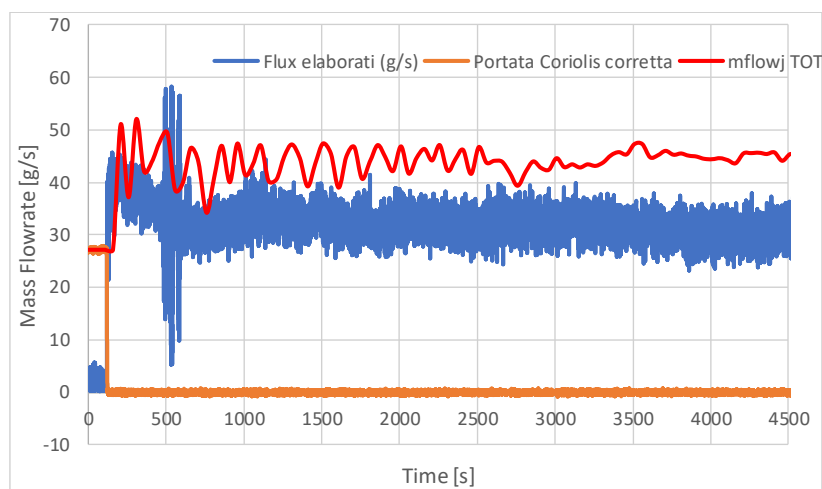


Figura 12 – Confronto delle portate (test 02-07-2018_1245).

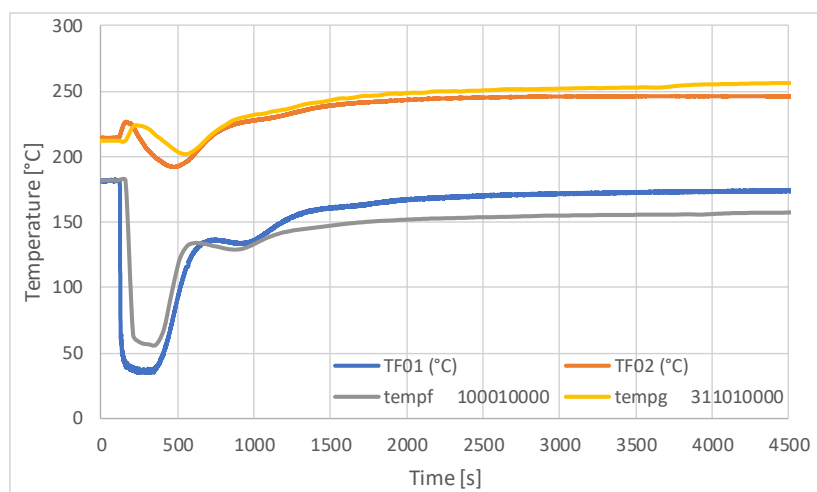


Figura 13 – Confronto delle temperature attraverso la test section (test 02-07-2018_1245).

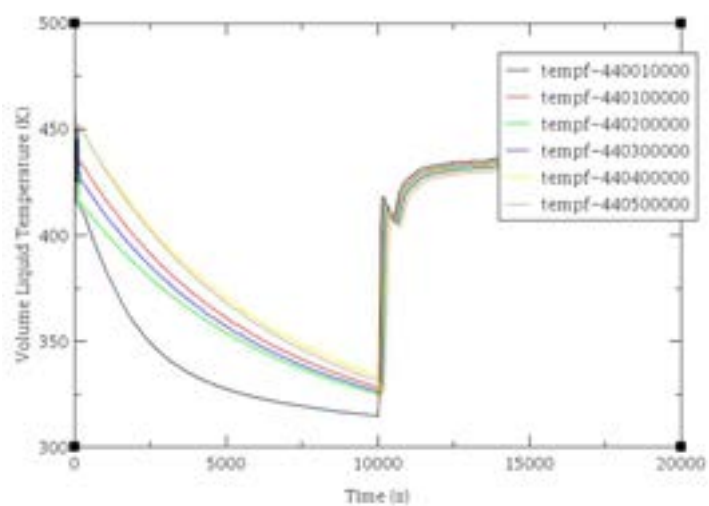


Figura 14 –Temperature acqua in cold leg (test 02-07-2018_1245).

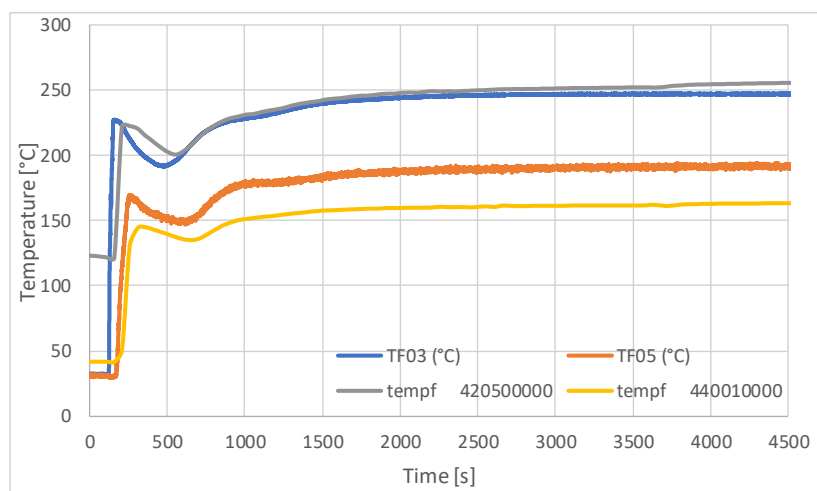


Figura 15 – Confronto delle temperature attraverso il condensatore (test 02-07-2018_1245).

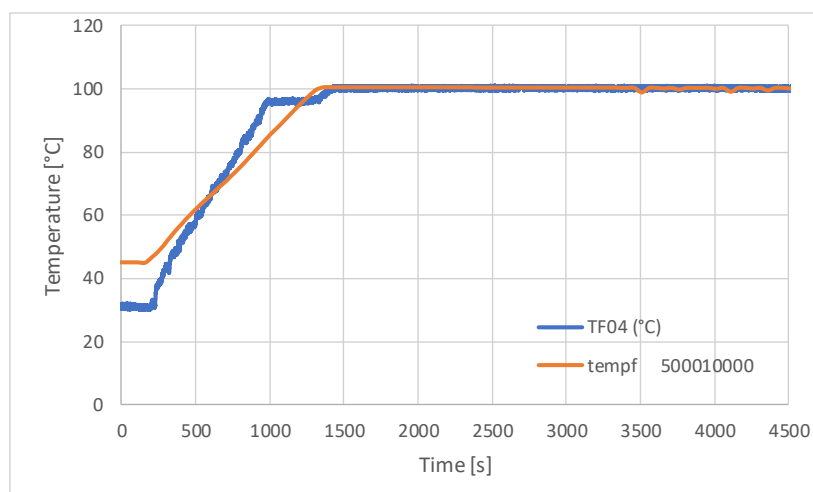


Figura 16 – Confronto delle temperature di piscina (test 02-07-2018_1245).

La portata di Figura 12 risulta ancora sovrastimata ma l'evoluzione delle temperature attraverso la sezione di prova, riportata in Figura 13, risulta molto migliorata sebbene non ancora in grado di riprodurre le misure sperimentali, in quanto le temperature in cold leg non risultano ancora ben stabilizzate a inizio transitorio, con una significativa deriva verso il basso a causa delle perdite termiche (vedi Figura 14).

Dal confronto tra le temperature attraverso il condensatore di Figura 15 e le temperature di piscina di Figura 16 si nota come la temperatura si attesti intorno ai 47 °C nello stazionario iniziale, nonostante la temperatura in piscina sia stata inizializzata a 30 °C, questo a causa dello scambio di calore della piccola frazione di vapore che una volta condensata va a riempire la cold leg. Inoltre, il rateo di salita della temperatura in piscina è sottostimato dal modello, che può indicare una capacità di trasferimento del calore inferiore rispetto all'esperienza.

La soluzione per ottenere una migliore simulazione potrebbe essere quella di trovare una metodologia di inizializzazione del calcolo più efficace, ma dati i tempi limitati non è possibile indagare ulteriormente.

La stessa analisi è stata condotta infine per il test del 26-06-2018 con risultati che sostanzialmente confermano quanto discusso nel transitorio precedente.

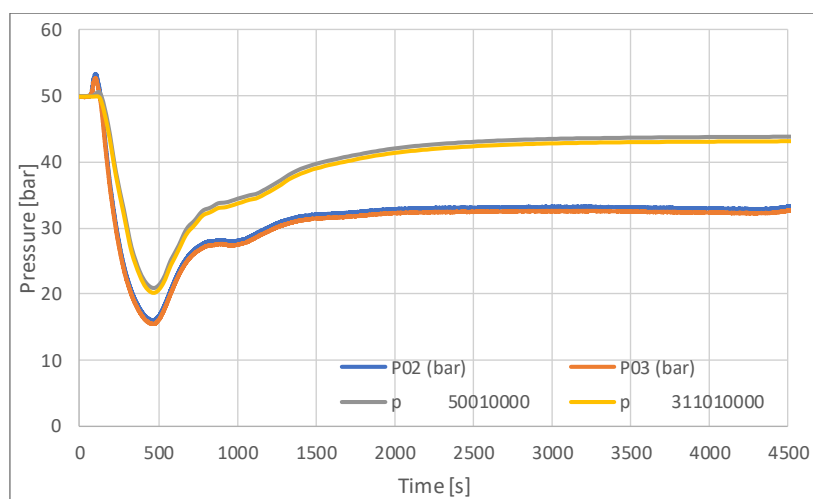


Figura 17 – Confronto delle pressioni (test 26-06-2018_1318).

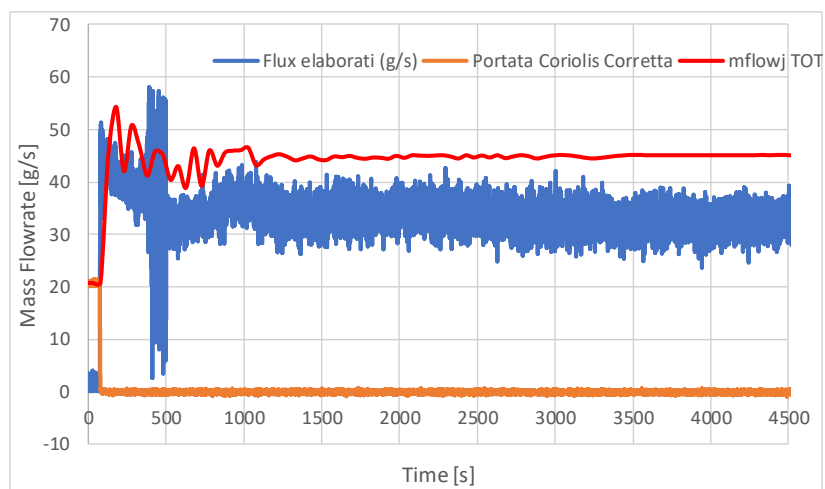


Figura 18 – Confronto delle portate (test 26-06-2018_1318).

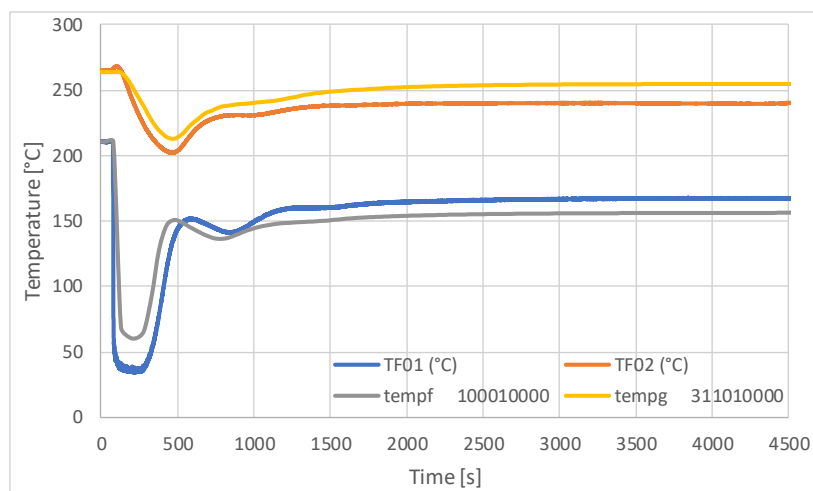


Figura 19 – Confronto delle temperature attraverso la test section (test 26-06-2018_1318).

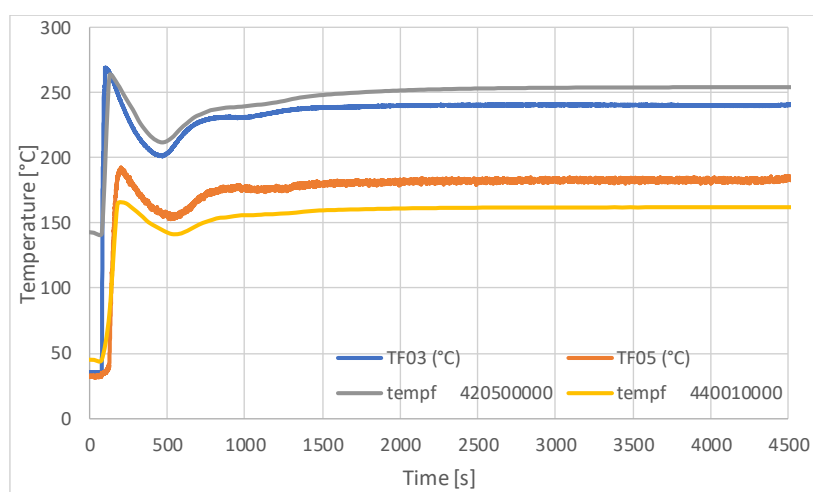


Figura 20 – Confronto delle temperature attraverso il condensatore (test 26-06-2018_1318).

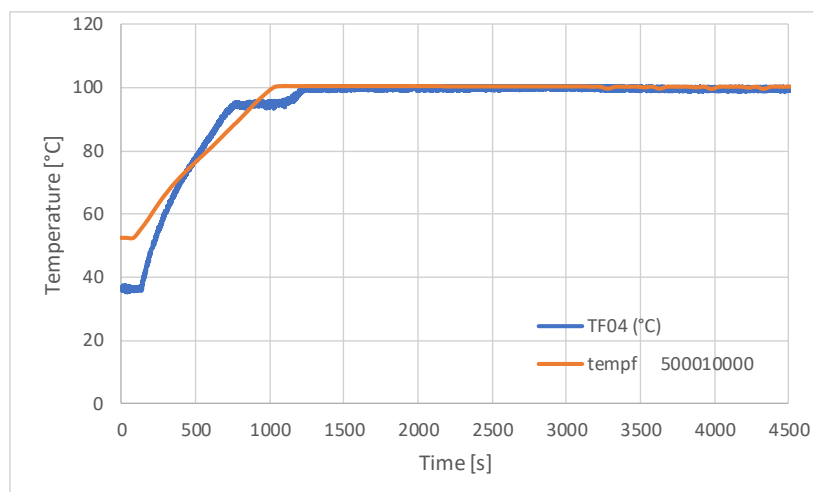


Figura 21 – Confronto delle temperature di piscina (test 26-06-2018_1318).

I test dinamici approssimano in modo accettabile i valori sperimentali, soprattutto da un punto di vista qualitativo, con una tendenza alla sovrastima delle pressioni di saturazione degli stazionari finali dovuti alla sovrastima dei FR che si vengono a creare nel circuito primario. Inoltre, le temperature dell'acqua nel condensatore, in piscina e nella cold leg sono leggermente sovrastimate con effetto sull'evoluzione dei transitori, anche a causa dei lunghi tempi richiesti all'acqua per raggiungere la temperatura ambiente con il solo contributo delle perdite termiche. Una migliore procedura di inizializzazione potrebbe essere utile ad ottenere migliori risultati, così come una migliore calibrazione in particolare delle condizioni di scambio termico tubo/piscina e delle perdite di carico. Questo potrebbe essere oggetto di future attività numeriche.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 25	di 32
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

5. CONCLUSIONI

A partire dal PAR2014 dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA, una collaborazione tra ENEA, SIET e POLIMI ha svolto attività di sperimentazione a supporto della caratterizzazione di scambiatori con tubi a baionetta allo scopo di acquisire dati di base per la loro caratterizzazione e sulla possibilità di un loro impiego come generatore di vapore in reattori di tipo SMR. Nel corso di precedenti annualità, presso i Laboratori SIET, era stato realizzato e testato un circuito di prova per generatori di vapore a tubi elicoidali. Questo circuito è stato adattato e utilizzato per testare una sezione di prova a due tubi a baionetta chiamata HERO-2. SIET si è occupata negli anni successivi del montaggio, della realizzazione di prove termoidrauliche e della collezione dei dati scaturiti da una serie di campagne sperimentali.

La campagna condotta nella presente annualità PAR2017 aveva lo scopo di superare alcune incertezze che si sono manifestate nei dati sperimentali delle precedenti campagne, soprattutto riguardo ai bilanci termici dei test in circolazione naturale, grazie all'uso di nuova strumentazione.

Nella stessa annualità del PAR2017, l'analisi post-test effettuata con il codice RELAP5mod3.3 si era concentrata sui test stazionari a circuito chiuso con lo scopo di ottenere uno strumento di calcolo univoco in grado di interpretare l'intera campagna. Il modello calibrato con test in configurazione aperta estesa aveva fornito risultati incoraggianti, sufficienti a una corretta comprensione delle diverse fenomenologie presenti nella matrice di test, con buone stime nella valutazione delle pressioni di saturazione ma con portate generalmente sovrastimate. Questi risultati sono stati però ottenuti a fronte di un incremento del coefficiente di scambio termico del condensatore, che ha determinato un incremento eccessivo della differenza di temperatura attraverso il componente.

L'oggetto delle simulazioni presentate in questo documento prodotto nell'estensione dell'attività del PAR2017 è stata una prima analisi post-test delle prove dinamiche di start up della circolazione naturale prodotti nella medesima campagna sperimentale. Infatti, prima di procedere a ulteriori test o campagne sperimentali si è ritenuto utile procedere con un approfondimento numerico attraverso una prima analisi dei test transitori. La campagna forniva informazioni sul comportamento termoidraulico di un sistema di raffreddamento di emergenza (Emergency Heat Removal System, EHRS) per la rimozione passiva del calore di decadimento in condizioni rappresentative di reattori SMR ad acqua pressurizzata.

A causa degli onerosi tempi di calcolo e del tempo limitato dall'estensione dell'attività, le simulazioni sono state ottenute senza un consistente intervento di calibrazione al modello sviluppato in precedenza. I risultati approssimano in modo accettabile i valori sperimentali, soprattutto da un punto di vista qualitativo, con una tendenza alla sovrastima delle pressioni di saturazione degli stazionari finali dovuti alla sovrastima dei FR che si vengono a creare nel circuito primario durante il passaggio dalla configurazione aperta a quella chiusa. Nella fase precedente il transitorio, le temperature dell'acqua nel condensatore, in piscina e nella cold leg sono leggermente sovrastimate a causa dei lunghi tempi richiesti all'acqua per raggiungere la temperatura ambiente con il solo contributo delle perdite termiche. Questo ha un notevole effetto sull'evoluzione del transitorio.

In future attività si potranno ottenere migliori risultati con una migliore procedura di inizializzazione, ma anche con una migliore calibrazione del modello, in particolare delle condizioni di scambio termico tubo/piscina e delle perdite di carico.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP1 – 128	0	L	26	32

ACRONIMI

CL	Cold Leg (gamba fredda)
EHR	Emergency Heat Removal System
FR	Filling Ratio
GV	Generatore di Vapore
HL	Hot Leg (gamba calda)
HX	Heat Exchanger (scambiatore termico)
SAD	Sistema di Acquisizione Dati
SGTR	Steam Generator Tube Rupture
SMR	Small Modular Reactor
TC	Termocoppia/e
TS	Test Section (sezione di prova)

BIBLIOGRAFIA

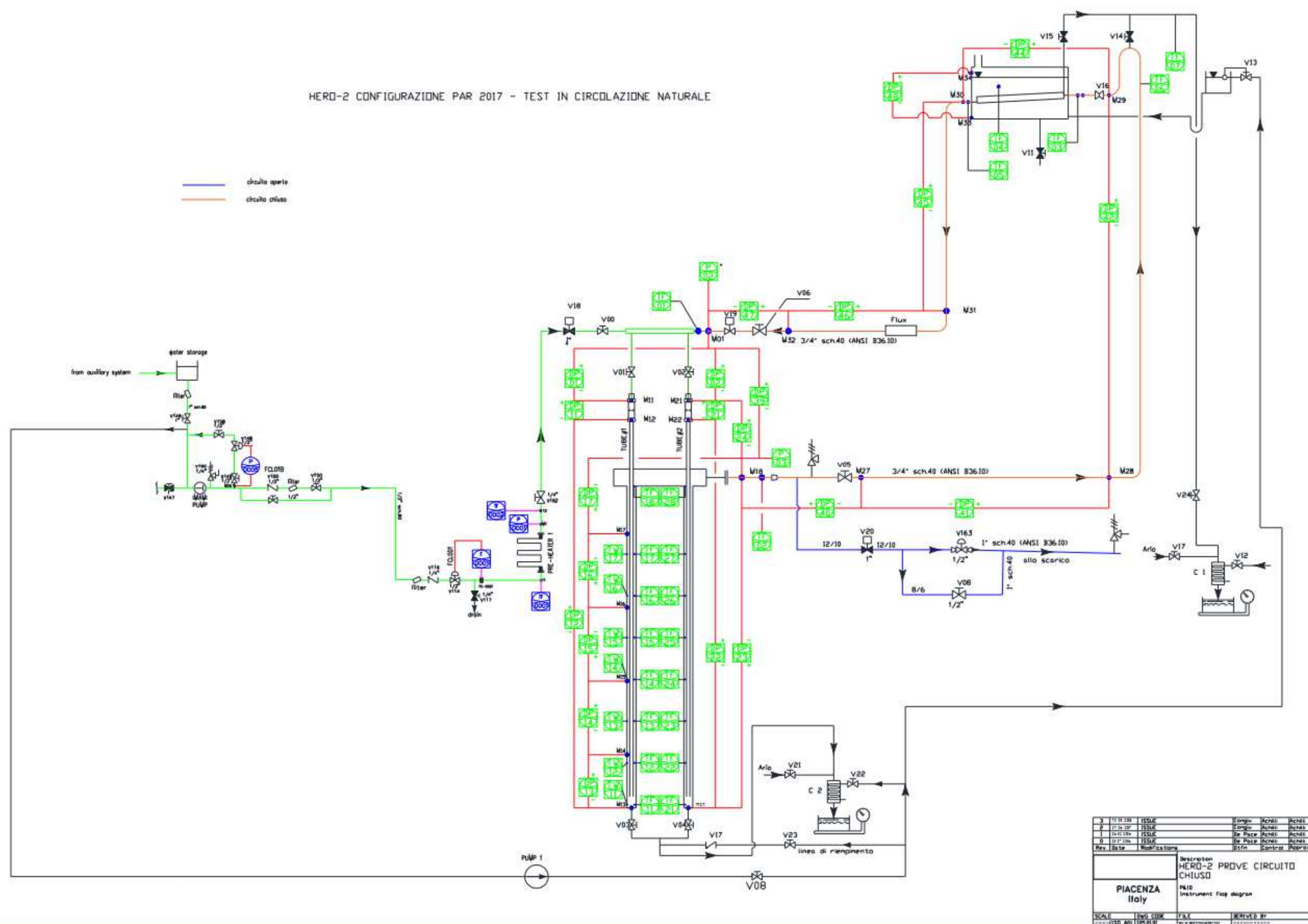
- [1] M. Polidori, O. De Pace, D. Balestri e A. Achilli, «Progettazione, realizzazione ed interpretazione di prove termoidrauliche di base su generatori di vapore con tubi a baionetta,» ADPFISS – LP1 – 049, 2015.
- [2] M. Polidori, O. De Pace, D. Balestri e A. Achilli, «Progettazione, realizzazione ed interpretazione di prove sperimentali per la simulazione del comportamento di un sistema passivo con scambiatore a baionetta per la rimozione del calore di decadimento,» ADPFISS – LP1 – 069, 2016.
- [3] C. Congiu e C. Randaccio, «Ripetizione di prove di scambio termico su generatori di vapore a tubi a baionetta della facility HERO-2,» SIET 03127 RP 17 rev.0, ADPFISS-LP1-098, 2017.
- [4] C. Congiu, «Ripetizione ed estensione di prove di scambio termico su generatori di vapore a tubi a baionetta della facility Hero-2 nell'ambito del PAR2017,» SIET 03353 RP 18 rev. 0, ADPFISS-LP1-116, 2018.
- [5] M. Polidori, O. De Pace, D. Balestri e A. Achilli, «Validazione dei modelli RELAP5 dello scambiatore di calore HERO-2,» ADPFISS – LP1 – 068, 2016.
- [6] M. Polidori, M. Santinello e M. E. Ricotti, «Validazione del modello RELAP5 di un sistema DHR in circolazione naturale tramite analisi di post-test ed analisi del comportamento di tale sistema in SMR di tipo PWR,» ADPFISS – LP1 – 090, 2017.
- [7] M. Polidori, E. Santinello e M. Ricotti, «Verifica e valutazione del modello RELAP5 di un sistema DHR basato su tubi a baionetta tramite analisi di post-test, e supporto allo sviluppo di un design concettuale per SMR di tipo PWR,» ADPFISS – LP1 – 112, 2018.
- [8] D. Rozzia, A. D. Nevo e M. Tarantino, «Fornitura scambiatore di calore a tubi a baionetta (HERO-2),» 2015.
- [9] C. D. Fletcher e R. Schultz, «RELAP5/MOD3.3 Code manual,» NUREG/CR-5535, INEL-95/174, Idaho National Engineering Laboratory, Gennaio 2002.
- [10] I. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd a cura di, Jaico Publishing House, 2003.

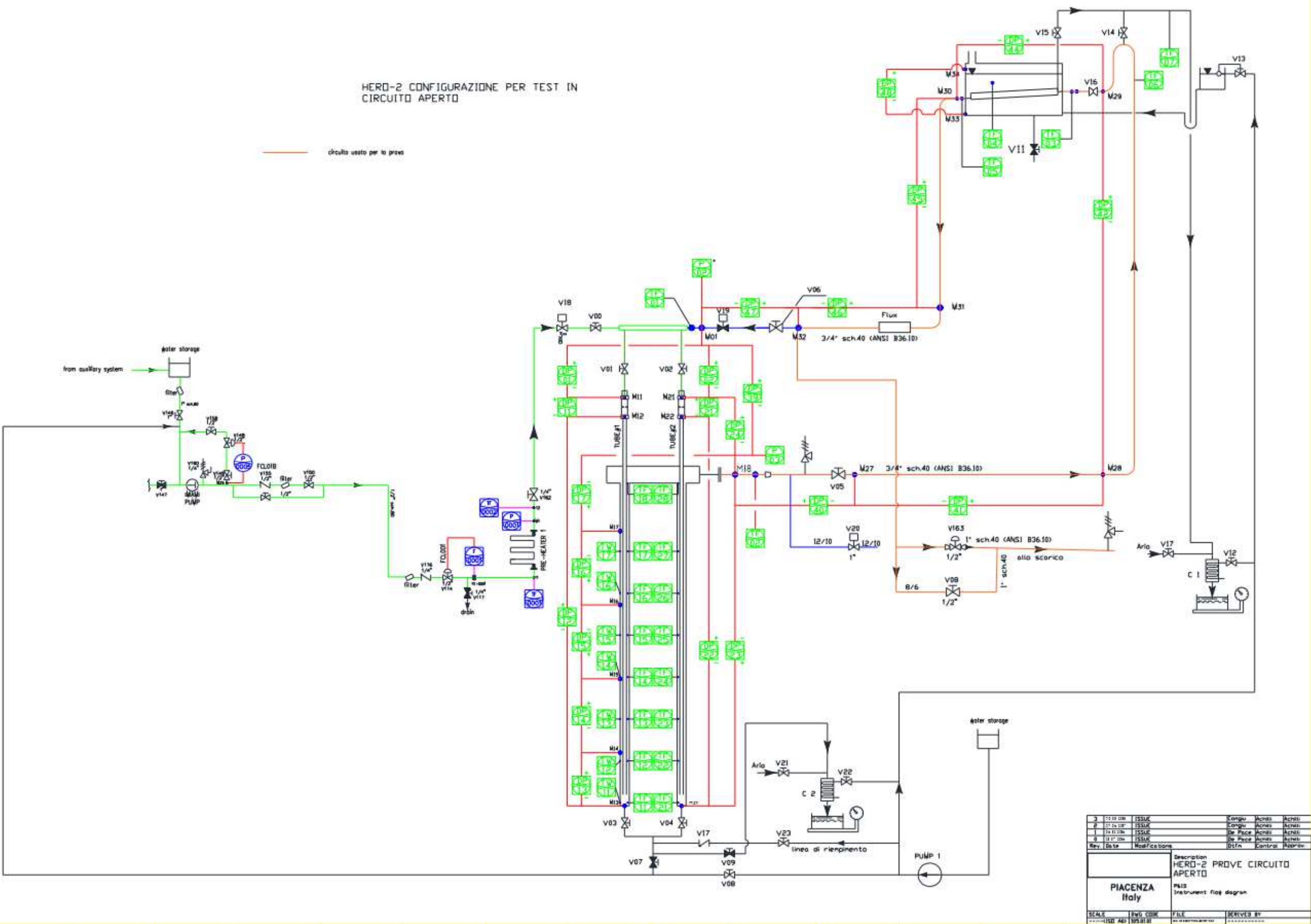
 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP1 – 128	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 27	di 32
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

APPENDICE A – INFORMAZIONI DI IMPIANTO

Sono riportati di seguito:

- ❖ P&I per test in circolazione naturale (circuito chiuso)
- ❖ P&I per test in circolazione forzata (circuito aperto)
- ❖ Elenco strumentazione
- ❖ Disegno della piscina e tubo di condensazione
- ❖ Vista plano-altimetrica di impianto





0	26/09/03	ISSUED DRAFT			
Rev.	Date	Modify	Dttn.	Control.	Appro.
-----	-----	-----			
			Circuito di prova tubi elicoidali		
			IRISb (fase 2)		
			Scambiatore passivo		
Scale	Dwg code	File	Derived from		
-----	068.00.01	068.00.01-0001.dwg	-----		

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFIS – LP1 – 128	0	L	31	32

POS.	Posizione	Instrument type	Plant code	SIET code	TYPE	CONSTR.	HP tap (+)	LP tap (-)	P1	P1 el.	P2	P2 el.	Head	Head	Unit	SPAN	LRV	URV	code	M	Q	Certificato di taratura
1	PRESSIONE INGRESSO SEZIONE DI PROVA	Rel. pressure transmitter	P02	S14728	STG-170	Honeywell		M01	M01	9.298			9.298	0.912	bar	150	0	150	P02	37.5	-37.5	P02-2017-LAT 096 P0168 2017 1.pdf
2	ORIFIZIO MIS.PORTATA tubo 1	Diff. pressure transmitter	DP11	S16077	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M11	M12	M11	8.904	M12	8.883	0.021	0.206	kPa	190	-40	150	DP11	47.5	-87.5	DP11-2017-LAT 096 P0172 2017 1.pdf
3	TRATTO DISCENDENTE tubo 1	Diff. pressure transmitter	DP12	S16079	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M12	M13	M12	8.883	M13	1.61	7.273	71.3	kPa	150	-40	110	DP12	37.5	-77.5	DP12-2017-LAT 096 P0208 2017 1.pdf
4	PARZIALE tubo 1 ascendente 1° tratto bottom	Diff. pressure transmitter	DP13	S2638	STD-120	Honeywell	M14	M13	M13	1.61	M14	3.01	1.4	13.73	kPa	30	-15	15	DP13	7.5	-22.5	DP13-2017-LAT 096 P0184 2017 1.pdf
5	PARZIALE tubo 1 ascendente 2° tratto bottom	Diff. pressure transmitter	DP14	S16082	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M15	M14	M14	3.01	M15	4.41	1.4	13.73	kPa	60	-30	30	DP14	15	-45	DP14-2017-LAT 096 P0185 2017 1.pdf
6	PARZIALE tubo 1 ascendente 3° tratto bottom	Diff. pressure transmitter	DP15	S14729	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M15	M16	M15	4.41	M16	5.81	1.4	13.73	kPa	80	-20	60	DP15	20	-40	DP15-2017-LAT 096 P0223 2017 1.pdf
7	PARZIALE tubo 1 ascendente 4° tratto bottom	Diff. pressure transmitter	DP16	S14731	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M16	M17	M16	5.81	M17	7.21	1.4	13.73	kPa	80	-20	60	DP16	20	-40	DP16-2017-LAT 096 P0177 2017 1.pdf
8	PARZIALE tubo 1 ascendente 5° tratto bottom	Diff. pressure transmitter	DP17	S14732	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M17	M18	M17	7.21	M18	8.813	1.603	15.72	kPa	100	-20	80	DP17	25	-45	DP17-2017-LAT 096 P0224 2017 1.pdf
9	ORIFIZIO MIS.PORTATA tubo 2	Diff. pressure transmitter	DP21	S16078	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M21	M22	M21	8.904	M22	8.883	0.021	0.206	kPa	190	-40	150	DP21	47.5	-87.5	DP21-2017-LAT 096 P0173 2017 1.pdf
10	TRATTO DISCENDENTE tubo 2	Diff. pressure transmitter	DP22	S16603	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M22	M23	M22	8.883	M23	1.61	7.273	71.3	kPa	150	-40	110	DP22	37.5	-77.5	DP22-2018-LAT 096 P0074 2018 1.pdf
11	RISER TUBO 2	Diff. pressure transmitter	DP23	S7103	STD-130	Honeywell	M23	M18	M23	1.61	M18	8.813	7.203	70.62	kPa	300	-100	200	DP23	75	-175	DP23-2017-LAT 096 P0171 2017 1.pdf
12	PERDITA DI CARICO IN-OUT SEZIONE DI PROVA	Diff. pressure transmitter	DP24	S16080	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M21	M18	M21	8.904	M18	8.813	0.091	0.892	kPa	600	-100	500	DP24	150	-250	DP24-2017-LAT 096 P0170 2017 1.pdf
13	PRESSIONE USCITA SEZIONE DI PROVA	Rel. pressure transmitter	P03	S16084	PMP51-151V0/0	Endress & Hauser		M18	M18	8.813			8.813	0.864	bar	100	0	100	P03	25	-25	P03-2017-LAT 096 P0169 2017 1.pdf
14	DP LINEA ANDATA-RITORNO EHRS	Diff. pressure transmitter	DP39	S16604	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M01	M18	M01	9.298	M18	8.813	0.485	4.755	kPa	150	-50	100	DP39	37.5	-87.5	DP39-2017-LAT 096 P0174 2017 1.pdf
15	DP LINEA USCITA VAPORE (1° TRATTO)	Diff. pressure transmitter	DP40	S16593	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M18	M27	M18	8.813	M27	8.813	0	0	kPa	50	0	50	DP40	12.5	-12.5	DP40-2018-LAT 096 P0117 2018 1.pdf
16	DP LINEA USCITA VAPORE (2° TRATTO)	Diff. pressure transmitter	DP41	S16594	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M28	M27	M27	8.813	M28	9.855	1.042	10.22	kPa	25	-5	20	DP41	6.25	-11.25	DP41-2018-LAT 096 P0126 2018 1.pdf
17	DP LINEA USCITA VAPORE (3° TRATTO) VERTICALE	Diff. pressure transmitter	DP42	S16595	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M29	M28	M28	9.855	M29	20.100	10.25	100.4	kPa	115	-5	110	DP42	28.75	-33.75	DP42-2018-LAT 096 P0122 2018 1.pdf
18	DP LINEA MONTE-VALLE EHRS	Diff. pressure transmitter	DP44	S16598	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M29	M30	M29	20.100	M30	19.945	0.155	1.520	kPa	5	0	5	DP44	1.25	-1.25	DP44-2018-LAT 096 P0124 2018 1.pdf
19	DP LINEA RITORNO DA EHRS (1° TRATTO)	Diff. pressure transmitter	DP45	S16599	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M30	M30	M30	19.945	M31	9.625	10.32	101.18	kPa	110	0	110	DP45	27.5	-27.5	DP45-2018-LAT 096 P0123 2018 1.pdf
20	DP LINEA RITORNO DA EHRS (2° TRATTO)	Diff. pressure transmitter	DP46	S16597	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M31	M32	M31	9.625	M32	9.308	0.317	3.108	kPa	15	0	15	DP46	3.75	-3.75	DP46-2018-LAT 096 P0125 2018 1.pdf
21	DP LINEA RITORNO DA EHRS (3° TRATTO) VERTICALE	Diff. pressure transmitter	DP47	S16583	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M32	M01	M32	9.308	M01	9.298	0.01	0.10	kPa	50	0	50	DP47	12.5	-12.5	DP47-2018-LAT 096 P0116 2018 1.pdf
22	DP LINEA INGRESSO ORIFIZIO 1	Diff. pressure transmitter	DP01	S16590	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M01	M11	M01	9.298	M11	8.904	0.394	3.863	kPa	30	-10	20	DP01	7.5	-17.5	DP01-2017-LAT 096 P0182 2017 1.pdf
23	DP LINEA INGRESSO ORIFIZIO 2	Diff. pressure transmitter	DP02	S16580	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M01	M21	M01	9.298	M21	8.904	0.394	3.863	kPa	30	-10	20	DP02	7.5	-17.5	DP02new-2018-LAT 096 P0180 2018 f f 1.pdf
24	LIVELLO PISCINA	Diff. pressure transmitter	DP48	S16596	Deltabar S PMD75	Endress & Hauser	M34	M33	M34	20.325	M33	19.915	0.41	4.02	kPa	10	0	10	DP48	2.5	-2.5	DP48-2018-LAT 096 P0073 2018 1.pdf
24	PORTATA DI REINTEGRO ALLA PISCINA	Coriolis flowmeter	F02	CPQ006	Promass A	Endress & Hauser																
25	TEMPERATURA INGRESSO SEZIONE DI PROVA	Thermocouple	TF01	S19139	K --- 1.5mm																	TF01-2018-LAT 096 T0200 2018 1.pdf
26	TEMPERATURA USCITA SEZIONE DI PROVA	Thermocouple	TF02	S16408	K --- 1.5mm																	TF02-2018-LAT 096 T0198 2018 1.pdf
27	TEMPERATURA INGRESSO CONDENSATORE	Thermocouple	TF03	S19731	K --- 1.5mm																	TF03-2018-LAT 096 T0201 2018 1.pdf
28	TEMPERATURA PISCINA DI RAFFREDDAMENTO	Thermocouple	TF04	S18535	K --- 1.5mm																	TF04-2018-LAT 096 T0199 2018 1.pdf
29	TEMPERATURA USCITA CONDENSATORE	Thermocouple	TF05	S19732	K --- 1.5mm																	TF05-2018-LAT 096 T0202 2018 1.pdf
30	Temperatua vapore uscita tubo 1	Thermocouple	TF18	S20214	K --- 1.5mm																	TF18-2017-LAT 096 T0248 2017 f f.pdf
31	Temperatua vapore uscita tubo 2	Thermocouple	TF28	S20213	K --- 1.5mm																	TF28-2017-LAT 096 T0247 2017 f f.pdf
	TEMPERATURA linea ingresso CONDENSATORE	Thermocouple	TF06	S20610	K --- 1.5mm																	TF06-2018-LAT 096 T0203 2018 1.pdf
	TEMPERATURA linea scarico piscina	Thermocouple	TF07	S20608	K --- 1.5mm																	TF07-2018-LAT 096 T0204 2018 1.pdf
25		Thermocouple	TF11		K --- 0.5mm																	
26		Thermocouple	TF12		K --- 0.5mm																	
20		Thermocouple	TF13		K --- 0.5mm																	
21		Thermocouple	TF14		K --- 0.5mm																	
22		Thermocouple	TF15		K --- 0.5mm																	
23		Thermocouple	TF16		K --- 0.5mm																	
24		Thermocouple	TF17		K --- 0.5mm																	
25		Thermocouple	TW11		K --- 0.5mm																	
26		Thermocouple	TW12		K --- 0.5mm																	
27		Thermocouple	TW13		K --- 0.5mm																	
28		Thermocouple	TW14		K --- 0.5mm																	
29		Thermocouple	TW15		K --- 0.5mm																	
30		Thermocouple	TW16		K --- 0.5mm																	
31		Thermocouple	TW17		K --- 0.5mm																	
32		Thermocouple	TF21		K --- 0.5mm																	
33		Thermocouple	TF22		K --- 0.5mm																	
34		Thermocouple	TF23		K --- 0.5mm																	
35		Thermocouple	TF24		K --- 0.5mm																	
36		Thermocouple	TF25		K --- 0.5mm																	
37		Thermocouple	TF26		K --- 0.5mm																	
38		Thermocouple	TF27		K --- 0.5mm																	
39	MISURA DI CORRENTE SUI CAVI DI ALIMENTAZIONE	Amperometer	n.a.	CPE023																		CPE023 LAT 046 343884

