



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo e Validazione di una Metodologia Progettuale per Sistemi di Rimozione e Trasporto della Potenza Termica

M. De Salve, C. Bertani, B. Panella, M. Caramello,
N. Falcone, A. Bersano



SVILUPPO E VALIDAZIONE DI UNA METODOLOGIA PROGETTUALE PER SISTEMI DI RIMOZIONE E TRASPORTO DELLA POTENZA TERMICA

M. De Salve, C. Bertani, B. Panella, M. Caramello, N. Falcone, A. Bersano – CIRTEN: POLITO

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

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



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia

**Sviluppo e validazione di una metodologia progettuale per
sistemi di rimozione e trasporto della potenza termica**

Progettazione di una facility sperimentale per lo studio di sistemi passivi per la rimozione del calore
di decadimento

Autori

Mario De Salve

Cristina Bertani

Bruno Panella

Marco Caramello

Nicolò Falcone

Andrea Bersano

CIRTEN - POLITO RL 1573/2016

Torino, Settembre 2016

Lavoro svolto in esecuzione dell'Attività LP1.C2.1

AdP MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico - Piano Annuale di Realizzazione 2015

Progetto C2.1 "Sviluppo e validazione di una metodologia progettuale per sistemi di rimozione e trasporto
della potenza termica"



Indice

Indice delle figure	2
Indice delle tabelle	3
Sommario	4
1 Introduzione	5
2 Descrizione di ALFRED e del sistema DHR2	7
2.1 ALFRED	7
2.2 Decay Heat Removal System	14
2.3 DHR1	15
2.4 DHR2	16
3 Metodologia di analisi	23
4 Progetto della facility sperimentale	25
4.1 Scambiatore di calore a baionetta	26
4.2 Condensatore	28
4.3 Tubazioni e flange	29
5 Nodalizzazione della facility sperimentale per il codice di calcolo RELAP5-3D	31
6 Risultati delle simulazioni RELAP5-3D	33
6.1 DHR2 - procedura di Start-up	33
6.2 Facility sperimentale - procedura di Start-up	37
6.3 Confronto DHR2 e facility sperimentale	40
6.4 Studi di sensibilità sulla massa di acqua iniziale nel circuito e sul livello di acqua nella piscina	41
7 Prove a freddo preliminari	46
7.1 Modifica della facility per le prove a freddo	46
7.2 Risultati preliminari delle prove a freddo	47
8 Conclusioni e lavori futuri	51
Riferimenti bibliografici	53
Breve curriculum gruppo di lavoro	55



Indice delle figure

Figura 2.1: ALFRED: vista in sezione [5].	8
Figura 2.2: ALFRED: Reactor Vessel [5].	9
Figura 2.3: ALFRED: Inner Vessel: vista (sinistra) e sezione (destra) [5].	9
Figura 2.4: ALFRED: Barretta di combustibile (sinistra) e sezione dell'elemento di combustibile (destra) [5].	10
Figura 2.5: ALFRED: Layout del nocciolo [5].	10
Figura 2.6: ALFRED: Pompa e generatore di vapore di ALFRED [5].	13
Figura 2.7: DHR1: Layout [5].	15
Figura 2.8: layout concettuale semplificato del sistema DHR2.	17
Figura 2.9: Layout della baionetta del DHR2 (non in scala.)	19
Figura 2.10: Isolation Condenser: sezione (sinistra) e vista laterale (destra.)	21
Figura 4.1: Vista frontale della facility	25
Figura 4.2: Schema concettuale del funzionamento dello scambiatore a baionetta.	26
Figura 4.3: Vista in sezione dello scambiatore di calore a baionetta (sinistra) e foto della baionetta finita (destra)	28
Figura 4.4: Vista in sezione del condensatore (sinistra) e foto del condensatore finito (destra)	29
Figura 4.5: Foto frontale della facility completa.	30
Figura 5.1: Schema R53D.	32
Figura 6.1: Sistema DHR2, potenza scambiata nella baionetta e nella piscina	35
Figura 6.2: Sistema DHR2, pressione	35
Figura 6.3: Sistema DHR2, portata	36
Figura 6.4: Sistema DHR2, temperature	36
Figura 6.5: Facility sperimentale, potenza scambiata nella baionetta e nella piscina.	38
Figura 6.6: Facility sperimentale, pressione	39
Figura 6.7: Facility sperimentale, portata all'uscita della baionetta	39
Figura 6.8: Facility sperimentale, livello di liquido nella piscina.	39
Figura 6.9: Facility sperimentale, temperature del circuito	40
Figura 6.10: Pressione.	42
Figura 6.11: Portata di circolazione naturale	43



Figura 6.12: Massima temperatura sulla superficie interna del tubo esterno.....	44
Figura 6.13: Livello di liquido nel ramo discendente	44
Figura 6.14: Grado di vuoto all’uscita della baionetta.....	45
Figura 7.1: Foto del bypass in posizione aperta (sinistra) e chiusa (destra)	46
Figura 7.2: Numerazione utilizzata per le prese di pressione	47
Figura 7.3: Cadute di pressione nel circuito: gamba calda, inversione, condensatore e gamba fredda, giunzione a T.....	48
Figura 7.4: Caduta di pressione nell'ingresso alla baionetta, downcomer e camera di inversione	49
Figura 7.5: Caduta di pressione per unità di lunghezza nella gamba fredda e nella gamba calda.....	50
Figura 7.6: Fattore di attrito nella gamba fredda e nella gamba calda.....	50

Indice delle tabelle

Tabella 1 ALFRED - Parametri principali.....	11
Tabella 2 Dimensioni dei tubi a baionetta di ALFRED.....	20
Tabella 3 Isolation Condenser: dati geometrici	21
Tabella 4 Linee di collegamento: dati geometrici.....	22
Tabella 5 Dimensioni geometriche scambiatore di calore a baionetta.....	27



Sommario

L'attività in oggetto, svolta presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, consiste nello studio numerico e sperimentale di un sistema passivo per la rimozione del calore di decadimento che opera in circolazione naturale, che è stato ad oggi progettato e costruito in una versione a potenza imposta. Il circuito in questione si ispira al sistema DHR2 del reattore di IV generazione raffreddato a piombo ALFRED.

Il circuito è costituito da uno scambiatore di calore a baionetta (sorgente termica) riscaldato con resistenze elettriche, un condensatore immerso in una piscina (pozzo termico) che simula un sistema Isolation Condenser, e le tubazioni di collegamento. Il sistema è stato progettato e costruito in moduli in modo da poter cambiare singole parti del circuito per studiarne gli effetti. La potenza termica coinvolta è dell'ordine di 1,5 kW.

Per progettare l'apparato sperimentale, prevederne il comportamento e fissare i parametri operativi è stato utilizzato il codice termoidraulico RELAP5 3D. Il modello utilizzato è stato affinato per permettere la miglior aderenza possibile al circuito fisico in esame. Sono state svolte numerose simulazioni utilizzando RELAP5 3D per analizzare ed ottimizzare il circuito sperimentale realizzato e per confrontarlo con il sistema di riferimento reale scelto (DHR2).

Il circuito sperimentale è stato ultimato e sono state iniziate prove a freddo del sistema con il fine di valutare e calibrare le cadute di pressione in monofase nel circuito ed ottimizzare la strumentazione convenzionale. Conclusa questa fase verranno iniziate le prove sperimentali a caldo per studiare, con l'ausilio di una matrice sperimentale, il regime di circolazione naturale che si instaura nel sistema e com'è influenzato dalla variazione dei parametri operativi.

I risultati delle prove sperimentali, in cui verranno misurate temperature e cadute di pressione, saranno utilizzati per studiare la circolazione naturale del sistema e per validare il codice RELAP5 3D per applicazioni riguardanti sistemi in circolazione naturale e scambiatori di calore immersi in piscine con pelo libero.



1 Introduzione

I sistemi passivi di rimozione del calore sono largamente utilizzati in tutti i nuovi progetti di reattori nucleari innovativi. In generale, molti reattori nucleari cosiddetti della IV generazione, che sono attualmente in fase di progetto, prevedono il grande utilizzo di sistemi passivi sia in condizioni di normale funzionamento che in condizioni incidentali. La funzione di sicurezza è rappresentata dalla capacità di rimuovere la potenza termica desiderata con una definita velocità di raffreddamento/riscaldamento all'interno di un intervallo di temperatura fissato per il fluido e le strutture termiche. Naturalmente la potenza termica da rimuovere deve essere trasportata dalla sorgente termica al pozzo termico.

IAEA definisce un sistema passivo come un sistema composto interamente di componenti o strutture passive o come un sistema che utilizza componenti attivi in modo molto limitato e solamente con il fine di avviare la successiva operazione passiva [1]. A sua volta, un componente passivo è definito come un componente che non necessita di alcun input esterno per operare. Normalmente il funzionamento di questi componenti si basa su semplici fenomeni naturali sempre validi come gravità, circolazione naturale, radiazione, ecc. L'utilizzo di sistemi passivi è molto importante nell'ambito dei sistemi che svolgono funzioni di sicurezza poiché questi sono in grado di funzionare in quelle situazioni in cui è necessario che il sistema possa funzionare anche senza un apporto di energia dall'esterno (es. energia elettrica).

Dal momento che la definizione di sistema passivo è molto generica, una classificazione della cosiddetta “passività” è stata realizzata da IAEA [1]. Questa classificazione divide i sistemi in quattro categorie, ognuna basata su un diverso livello di passività; la maggiore passività è associata alla categoria A mentre la minore passività è relativa alla categoria D. Le categorie sono le seguenti:

- A: nessuna sorgente di energia o forza esterna, nessuna parte meccanica o fluido operativo in movimento
- B: nessuna sorgente di energia o forza esterna, nessuna parte meccanica in movimento ma movimento di fluido operativo
- C: nessuna sorgente di energia o forza esterna, presenza di parti meccaniche in movimento
- D: questa categoria contiene i sistemi che funzionano in maniera passiva ma che necessitano di un segnale esterno per entrare in funzione. Questa categoria viene denominata



“passive execution, active initialization”. L’energia necessaria per avviare il processo deve provenire da sorgenti di accumulo (es. batterie o fluidi compressi o elevati).

Il sistema passivo considerato in questo lavoro è il back up del sistema di rimozione del calore residuo chiamato DHR2 che è presente nel reattore prototipo ALFRED che verrà descritto successivamente.

ALFRED (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator) è un reattore a spettro neutronico veloce refrigerato a piombo fuso che è stato progettato come parte del progetto europeo LEADER (Lead European Advanced DEMonstrator Reactor). Questa tipologia di reattore nucleare avanzato è una delle sei proposte nel Generation IV International Forum (GIF) [2]. Tra i vari progetti presentati, le sei tipologie selezionate come reattori di IV Generazione sono:

- Gas-Cooled Fast Reactor System (GFR),
- Lead-Cooled Fast Reactor System (LFR),
- Molten Salt Reactor System (MSR),
- Sodium-Cooled Fast Reactor System (SFR),
- Supercritical-Water-Cooled Reactor System (SCWR),
- Very-High-Temperature Reactor System (VHTR).

L’approccio metodologico di questo studio è connesso alla formulazione del problema della circolazione naturale, analizzando le risposte spazio-temporali di temperature e portate simulate con il codice RELAP5 3D e confrontandole con futuri risultati sperimentali associati a definite procedure sperimentali.

I risultati ottenuti sono confrontati con quelli di un sistema reale (DHR2) per poter affrontare in futuro il problema della scalatura tra sistemi che operano basandosi sugli stessi principi fisici.



2 Descrizione di ALFRED e del sistema DHR2

2.1 ALFRED

ALFRED rappresenta un passaggio importante negli sforzi di ricerca Europei nella direzione dei reattori refrigerati a piombo della Generazione IV. L’obiettivo principale che sta alla base di ALFRED e dello sviluppo della tecnologia dei reattori a piombo è quello di mantenere e sostenere l’energia nucleare quale importante contributo dei piani energetici Europei e non solo, soprattutto in un’ottica di sistemi energetici a bassa emissione di anidride carbonica.

ALFRED è stato concepito e progettato all’interno del progetto LEADER (Lead European Advanced DEMonstrator Reactor) [3]. Recentemente, nel 2013, è stato istituito il Consorzio FALCON (Fostering ALfred CONSortium) tra Ansaldo Nucleare, ENEA e il Nuclear Research Institute “ICN” (Institutul de Cercetari Nucleare - Pitesti). Questo ha rappresentato il primo passo verso la realizzazione di un dimostratore per il reattore della Generazione IV refrigerato a piombo in Romania [4].

ALFRED è un reattore ridimensionato rispetto al prototipo industriale ELFR proposto nel progetto LEADER [3]. ALFRED ha una potenza relativamente contenuta (125 MWe) con un design compatto che permette di ridurre i costi pur preservando i caratteri rappresentativi della tecnologia. È refrigerato con piombo puro e, per la protezione degli investimenti, è progettato il più possibile basandosi su componenti semplici e rimovibili ed è progettato per funzionare alle temperature più basse compatibili con il refrigerante a piombo puro.

La configurazione del sistema primario è della tipologia “a piscina”: questo permette di contenere tutta la massa di piombo primario all’interno del Reactor Vessel, eliminando quindi ogni eventuale problema relativo alla circolazione di masse di piombo al di fuori del vessel. Lo schema del reattore è lo schema tipico dei reattori a ciclo indiretto, nel quale il fluido termovettore, in questo caso il piombo, cede il calore asportato dal nocciolo al fluido motore, in questo caso l’acqua, attraverso i generatori di vapore, il quale a sua volta evolve in una turbina collegata ad un generatore elettrico. Nel caso specifico, il sistema contenente il piombo è detto sistema primario; il sistema contenente l’acqua, invece, è detto sistema secondario. Una vista in sezione della configurazione di ALFRED è riportata in Figura 2.1.

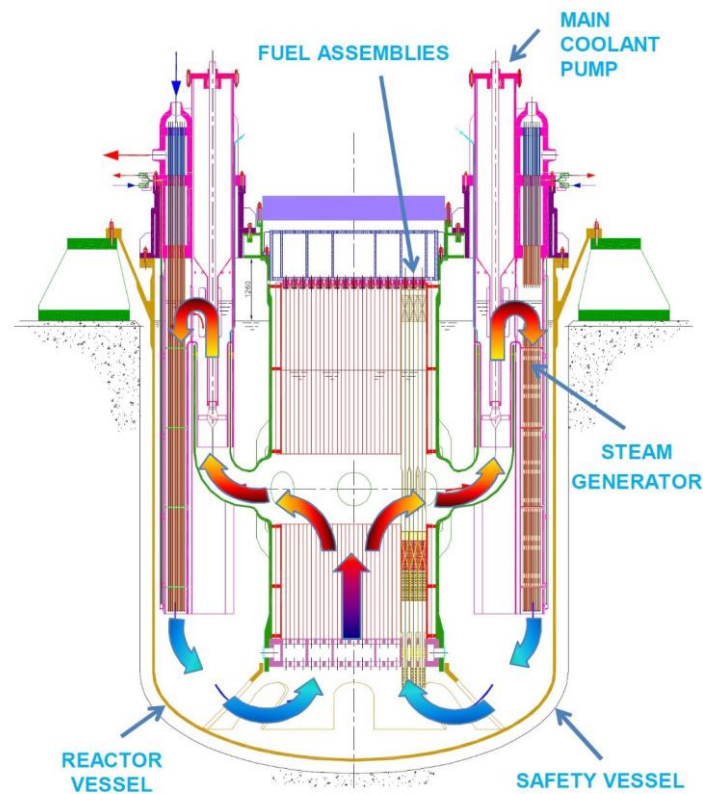


Figura 2.1: ALFRED: vista in sezione [5].

Il Reactor Vessel è cilindrico con un fondo torosferico. È ancorato alla cavità del reattore dalla cima, mediante un supporto apposito. Uno strato di acciaio ricopre la cavità del reattore e costituisce il Safety Vessel (SV). La funzione del Safety Vessel è quella di limitare le conseguenze dovute ad una rottura del Reactor Vessel con perdita di piombo primario verso l'esterno. Il Reactor Vessel e il Safety Vessel sono progettati in modo tale che, nel caso di un'eventuale fuoriuscita di piombo, il refrigerante primario rimanente sia sempre in grado di coprire l'ingresso dei generatori di vapore e il percorso del piombo sia mantenuto indefinitamente. In Figura 2.2 è riportata una vista assonometrica del Reactor Vessel.



Figura 2.2: ALFRED: Reactor Vessel [5].

L’Inner Vessel svolge la doppia funzione di sostegno e supporto per gli elementi di combustibile e rappresenta una separazione fisica tra il plenum caldo e il plenum freddo. Il piombo è guidato dall’uscita degli elementi di combustibile all’ingresso dei rami in cui sono alloggiati le pompe primarie tramite un collettore ad anello. La Figura 2.3 riporta una rappresentazione dell’Inner Vessel.

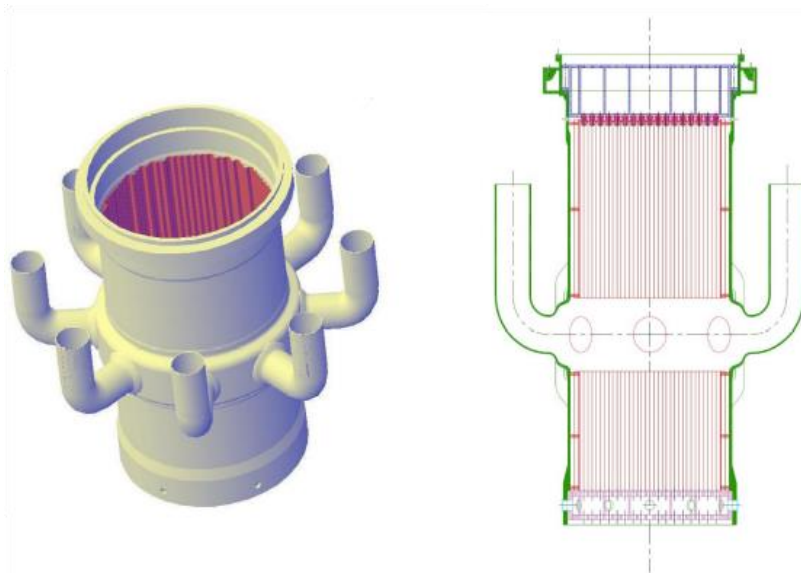


Figura 2.3: ALFRED: Inner Vessel: vista (sinistra) e sezione (destra) [5].

La configurazione del core è realizzata da elementi di combustibile esagonali, come rappresentato in Figura 2.4. Il combustibile è di tipo MOX e si adottano pastiglie anulari e una ridotta lunghezza

attiva del nocciolo al fine di favorire la circolazione naturale. La potenza termica totale è di 300 MWth. Lo schema del nocciolo è costituita da 171 elementi di combustibile, 12 barre di controllo CR (Control Rods) e 4 barre di sicurezza SR (Safety Rods), circondati da 108 elementi fittizi che schermano l’Inner Vessel. Il layout del nocciolo è riportato in Figura 2.5. Ogni elemento di combustibile è lungo circa 8 metri e consiste in 127 barrette di combustibile mantenute in posizione tramite apposite griglie. Una zavorra in tungsteno (Ballast) previene forze di galleggiamento nel piombo. Elementi elastici posti superiormente (cup spring) prevengono il sollevamento indotto dai carichi idrodinamici e assecondano le espansioni termiche assiali. L’estremità superiore degli elementi di combustibile si estende oltre la superficie libera nel gas inerte di copertura così da rendere più semplice l’ispezione e la manipolazione. In questo modo è possibile effettuare la ricarica del combustibile senza l’ausilio di una macchina per la ricarica del combustibile posta all’interno del vessel.

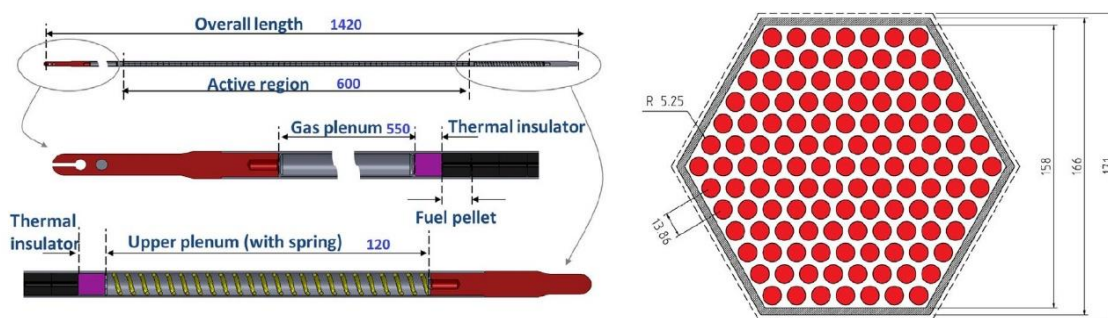


Figura 2.4: ALFRED: Barretta di combustibile (sinistra) e sezione dell'elemento di combustibile (destra) [5].

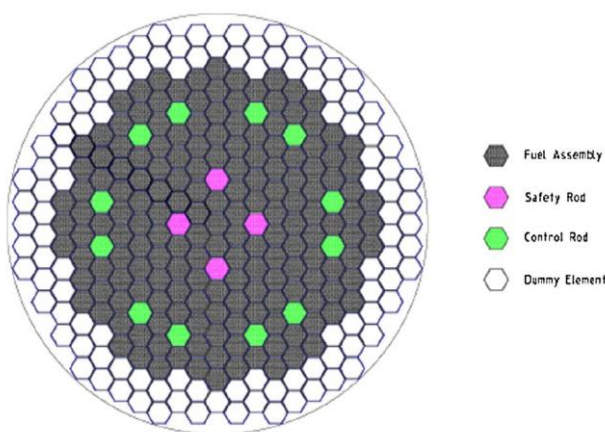


Figura 2.5: ALFRED: Layout del nocciolo [5].



Nella Tabella 1 sono riportati brevemente i principali parametri di ALFRED [4].

Tabella 1 ALFRED - Parametri principali

Potenza Termica [MWth]	300
Potenza Elettrica [MWe]	125
Refrigerante Primario	Piombo puro
Sistema Primario	Piscina, Compatto
Circolazione del Refrigerante Primario	
- Normale funzionamento	Forzata
- Condizioni di emergenza	Naturale
Massima velocità del piombo consentita [m/s]	2
Temperatura di ingresso nel nocciolo [°C]	400
Temperatura di ingresso nei generatori di vapore [°C]	480
Refrigerante del Sistema Secondario	Acqua-Vapore surriscaldato
Temperatura acqua di alimento/vapore [°C]	335 / 450
Pressione del vapore [MPa]	18
Efficienza del sistema secondario [%]	40
Massimo danneggiamento neutronico dei materiali strutturali [dpa]	2
Tipo di combustibile	MOX (arr. Max Pu 20%)
Massimo burn-up [MWd/kg-HW]	90÷100
Massimo danneggiamento neutronico della guaina [dpa]	100
Temperatura massima dalla guaina in condizioni normali [°C]	550

Sono presenti otto pompe primarie e otto generatori di vapore, uno per ogni pompa. Le pompe primarie sono di tipo assiale e sono poste all'interno dei condotti che si diramano dall'Inner Vessel: le pompe dunque aspirano il piombo caldo dal collettore ad anello posto all'uscita dal nocciolo. Per



la realizzazione della girante sono stati proposti materiali ceramici o acciai rivestiti da materiali ceramici per far fronte al problema dell'erosione/corrosione dovuta all'interazione meccanica con la portata di piombo.

I generatori di vapore sono realizzati da un fascio verticale costituito da 510 scambiatori di calore a baionetta immersi nel piombo contenuto nel Reactor Vessel per una lunghezza pari a 6 metri. In Figura 2.6 è riportata la configurazione del generatore di vapore accoppiato alla pompa primaria associata. Il singolo tubo a baionetta è un tubo verticale con un tubo esterno di sicurezza e uno strato isolante interno, composto da 4 tubi concentrici. Lo strato isolante interno è stato introdotto per assicurare la produzione di vapore surriscaldato: infatti senza lo strato isolante, l'elevata differenza di temperatura tra il vapore e l'acqua di alimento favorirebbe la condensazione del vapore nella parte più alta del generatore di vapore [6][7]. Il gap tra i due tubi più esterni è riempito con elio pressurizzato e polveri ad elevata conducibilità per migliorare lo scambio termico. In caso di rottura di un tubo esterno, questa soluzione garantisce che il piombo primario non interagisca con l'acqua secondaria per evitare di avere trasporto di vapore nella parte attiva del core; ciò permette di mantenere l'integrità del sistema nel caso si dovesse verificare una rottura, garantendo così una separazione fisica tra il sistema primario e il sistema secondario. Inoltre, un'eventuale rottura può essere facilmente individuata monitorando la pressione dell'elio contenuto nel gap. Questi generatori di vapore alimentano in condizioni di funzionamento normale il circuito secondario (turbina a vapore) e sono alimentati dal Balance of Plant.

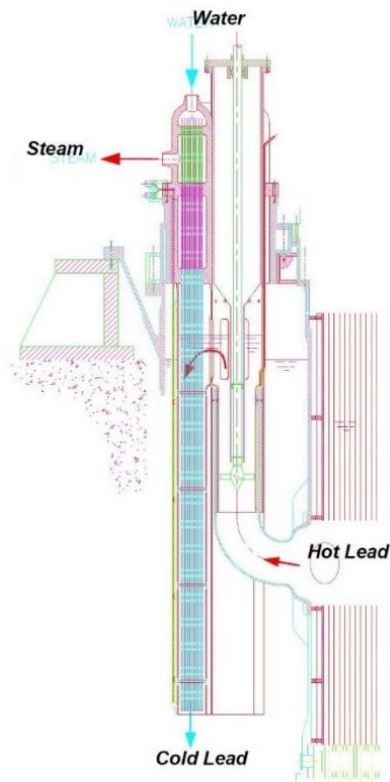


Figura 2.6: ALFRED: Pompa e generatore di vapore di ALFRED [5].

Il sistema di rimozione del calore residuo di decadimento, il Decay Heat Removal system o DHR, consiste in due sistemi passivi, indipendenti, diversi e ridondanti, DHR1 e DHR2. La descrizione del sistema DHR verrà illustrata successivamente.

Il sistema secondario proposto per ALFRED è basato su una configurazione a doppia turbina con tre spillamenti nella turbina di alta pressione e altri tre spillamenti nella turbina di bassa pressione. La temperatura dell'acqua di alimento viene controllata mediante sei preriscaldatori, ognuno alimentato con il vapore proveniente da uno dei sei spillamenti. Per quanto riguarda le pompe del condensato e le pompe di alimento, è stata applicata la ridondanza “2x100%”, quindi in caso di malfunzionamento di una delle due pompe, la rimanente è in grado di fornire il 100% della portata nominale. È presente un sistema ausiliario per il riscaldamento del piombo: questo sistema funzionerebbe quando il ciclo di potenza non è attivo, in moto tale da garantire la minima temperatura del piombo fornendo calore dal sistema secondario se necessario. Un bypass completo della turbina (100%) permette di trasferire direttamente il calore dal reattore al condensatore, se necessario.



2.2 Decay Heat Removal System

In condizioni incidentali, dopo che è avvenuto lo SCRAM del reattore è ancora necessario rimuovere il calore dal core. Questo calore è causato dal calore di decadimento dei prodotti di fissione che si accumulano durante il normale funzionamento del reattore. Dopo lo SCRAM la potenza di decadimento è circa il 7% della potenza nominale, dopodiché decresce esponenzialmente. A causa di ciò, è necessario rimuovere calore dal core per un lungo periodo anche in caso di insite blackout. Si può osservare come un sistema passivo che non richieda elettricità per funzionare soddisfi bene questi requisiti. Questo sistema è chiamato Decay Heat Removal System (DHRS). In ALFRED sono presenti due sistemi di rimozione del calore residuo separati e indipendenti.

Il DHR è uno dei sistemi di sicurezza dell'impianto, dunque sono state applicate le comuni strategie relative ai sistemi di sicurezza. Siccome ogni sistema di sicurezza deve rispondere alle regole di ridondanza e diversificazione, il DHR è costituito da due sistemi differenti, il DHR1 e il DHR2, ognuno di questi costituito a sua volta da quattro circuiti. Anche solo tre circuiti attivi sono sufficienti per rimuovere il calore di decadimento.

ALFRED è un reattore della IV generazione e dunque la passività ha un ruolo molto importante: entrambi i sistemi DHR sono sistemi passivi e sono sistemi dedicati, che non vengono quindi utilizzati nel normale funzionamento del reattore. L'entrata in funzione di questi sistemi è subordinata ad un attuatore attivo (rientrano dunque nella categoria D secondo la classificazione IAEA) tramite valvole equipaggiate con batterie.

Il DHR entra in funzione in seguito al raggiungimento di alcuni valori di set point (temperatura e pressione). Il DHR1 è il primo sistema che viene attivato, mentre il DHR2 viene messo in stand by. In caso di guasto del DHR1 viene attivato il DHR2. Non devono entrare in funzione più di quattro circuiti contemporaneamente per evitare un'eccessiva rimozione del calore e conseguentemente un eccessivo raffreddamento del refrigerante primario il quale potrebbe solidificarsi. I sottosistemi del DHR2 non vengono attivati simultaneamente ma ognuno di essi entra in funzione in caso di guasto di un sottosistema del DHR1.

2.3 DHR1

Il sistema DHR1 consiste in quattro sistemi Isolation Condenser (ICs), ciascuno collegato a uno dei quattro generatori di vapore sul lato secondario [8][9][10]. Il progetto del sistema soddisfa il criterio di single failure, quindi tre dei quattro Isolation Condenser sono sufficienti a rimuovere il calore di decadimento. Una rappresentazione schematica del sistema DHR1 è riportata in Figura 2.7.

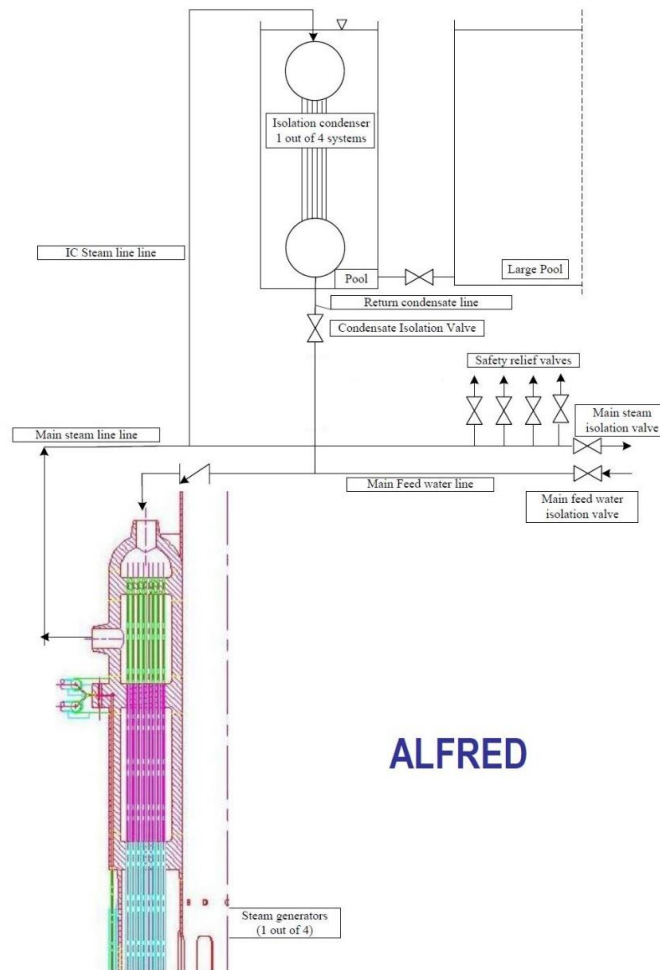


Figura 2.7: DHR1: Layout [5].

Ognuno dei quattro sotto sistemi Isolation Condenser è composto da:

- Uno scambiatore di calore (Isolation Condenser), costituito da un fascio verticale di tubi con un plenum sferico superiore ed un plenum sferico inferiore.
- Una piscina d’acqua, dove l’Isolation Condenser è inserito; il quantitativo d’acqua contenuta è sufficiente a garantire tre giorni di operazione di rimozione del calore residuo.



- Una valvola di isolamento del condensato posta a valle dell’Isolation Condenser.
- Una valvola di isolamento posta a monte dell’Isolation Condenser (non rappresentata in Figura 2.7).
- Un serbatoio per l’aria (non rappresentato in Figura 2.7) collegato al plenum inferiore dell’Isolation Condenser, previsto secondo la configurazione brevettata da Ansaldo Nucleare [11].

Ogni Isolation Condenser è collegato ad un generatore di vapore: il plenum superiore dell’Isolation Condenser è collegato alla linea principale del vapore e il plenum inferiore dell’Isolation Condenser è collegato alla linea principale dell’acqua di alimento. Quando il DHR1 si trova in condizioni di standby, questo è riempito con aria ad una pressione di circa 110 bar la quale viene poi raccolta nel serbatoio per l’aria una volta che il sistema entra in funzione; il serbatoio inoltre ha la funzione di regolazione della potenza termica scambiata tra il piombo e l’acqua.

2.4 DHR2

Il sistema DHR2 è il sistema di sicurezza che entra in funzione in caso di malfunzionamento di uno o più sottosistemi del sistema DHR1. Per ogni DHR1 guasto entra in funzione un sistema DHR2. Il sistema DHR2 si rifà al sistema DHR2 concepito inizialmente per ELSY [12][13] ed è basato sulla configurazione brevettata da Ansaldo Nucleare [11].

Il sistema DHR2 è costituito da quattro sottosistemi identici e indipendenti costituiti da (Figura 2.8):

- Uno scambiatore di calore (Isolation Condenser) costituito da fascio verticale di tubi con un plenum sferico superiore ed un plenum sferico inferiore.
- Una piscina d’acqua, all’interno della quale l’Isolation Condenser è immerso; il quantitativo d’acqua contenuto della piscina è sufficiente a garantire tre giorni di operazioni di rimozione del calore di decadimento.
- Un serbatoio (Water Storage Tank) riempito con acqua sotto raffreddata a temperatura ambiente. Il quantitativo d’acqua contenuto nel serbatoio deve essere tale da consentire la pressurizzazione del sotto sistema DHR2 una volta chiamato in funzione.
- Una valvola di isolamento del serbatoio d’acqua.

- Uno scambiatore di calore acqua-piombo (Dip Cooler) costituito da un fascio verticale di tubi a baionetta. Il Dip Cooler è immerso nel piombo contenuto nel sistema primario.
- Una linea collegante l’uscita del Dip Cooler al plenum superiore dell’Isolation Condenser (linea in ingresso all’Isolation Condenser).
- Una linea collegante l’uscita dell’Isolation Condenser all’ingresso del Dip Cooler (linea di scarico dell’Isolation Condenser).
- Una linea collegante la sommità del serbatoio d’acqua con la linea di ingresso nell’Isolation Condenser in modo tale da uguagliare la pressione del serbatoio d’acqua alla pressione dell’Isolation Condenser.
- Una linea collegante il fondo del serbatoio d’acqua alla linea di scarico dell’Isolation Condenser; questa connessione include la valvola di isolamento del serbatoio d’acqua.
- Un serbatoio per l’aria collegato al plenum inferiore dell’Isolation Condenser, previsto secondo la configurazione brevettata da Ansaldo Nucleare [11].

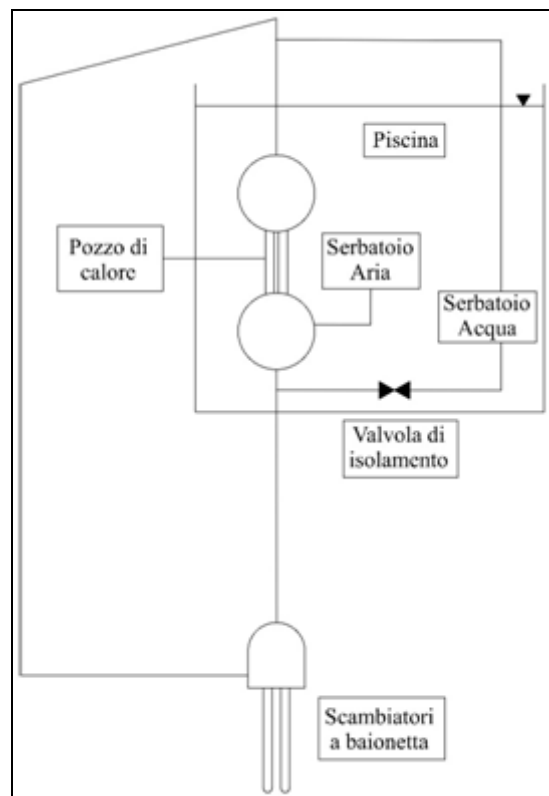


Figura 2.8: layout concettuale semplificato del sistema DHR2



Il sistema DHR2 è un sistema dedicato e risulta separato dal Balance of Plant: non è quindi utilizzato durante il normale funzionamento dell'impianto; lo stesso non si può dire per il sistema DHR1 che risulta invece collegato ai generatori di vapore. Durante il normale funzionamento del reattore il DHR2 non è attivo ed essendo riempito con aria a bassa pressione la quota di calore rimossa dal piombo primario è ritenuta trascurabile.

In caso di incidente il DHR2 entra in funzione in seguito al trip del reattore, isolamento delle linee principali di alimento e del vapore, e dal segnale di guasto del sistema DHR1. Per attivare il DHR2 la valvola di isolamento viene aperta e l'acqua contenuta nella Water Storage Tank entra nel sistema per gravità. L'acqua incomincia ad evaporare nel Dip Cooler e il vapore formatosi condensa nell'Isolation Condenser. La circolazione del fluido è resa possibile dalla differenza di densità tra la gamba calda, nella quale è presente prevalentemente vapore con bassa densità, e la gamba fredda, nella quale è presente acqua con una maggiore densità. La gamba calda va dal Dip Cooler all'Isolation Condenser mentre la gamba fredda va dall'Isolation Condenser al Dip Cooler.

Quando l'acqua viene introdotta nel sistema, si verifica un transitorio iniziale di pressurizzazione dovuto al fatto che nei primi istanti il vapore prodotto è maggiore di quello che si riesce a condensare. Il transitorio si esaurisce nel momento in cui il calore rimosso dal piombo primario dal Dip Cooler è uguale al calore trasferito dall'Isolation Condenser alla piscina. Durante tale transitorio la massa d'aria, che riempie il sistema in condizioni di standby, viene raccolta nell'apposito serbatoio per evitare la presenza di incondensabili nella massa di acqua/vapore poiché andrebbero ad inficiare lo scambio termico.

Il sistema DHR2, così come il DHR1, non ha parti meccaniche in movimento ma solamente fluidi. Nonostante tutti i componenti del DHR2 rientrino nella categoria di passività B, l'intero sistema rientra nella categoria D perché l'attivazione del sistema è subordinato all'apertura della valvola di isolamento la quale necessita di energia dall'esterno.

DESIGN DEL DHR2

Considerando l'importanza che ricopre ALFRED nel campo dei reattori refrigerati a piombo, il suo design è in continua evoluzione in modo tale da poterne migliorare prestazioni e livello di sicurezza. Lo stesso discorso ovviamente vale anche per i suoi sistemi e componenti, dunque anche per il sistema DHR2.

Nell’ottica di poter ridurre i costi e le tempistiche di realizzazione, il progetto di ALFRED è basato per quanto più possibile su componenti semplici. Nel DHR2, anche se lo scambiatore a baionetta differisce leggermente da quello utilizzato per il generatore di vapore, l’Isolation Condenser rimane identico a quello del DHR1.

Dip Cooler

Il Dip Cooler è un fascio di scambiatori a baionetta immerso nel downcomer del circuito primario. Sono presenti 80 scambiatori disposti secondo un reticolo triangolare.

La lunghezza attiva è di 5,5 m e per riuscire a garantire un discreto flusso di piombo nel reticolo, il rapporto passo/diametro è posto pari a 1,35. Nei progetti precedenti la geometria della baionetta del DHR2 era identica a quella utilizzata per i generatori di vapore. Nei vecchi progetti era presente uno strato isolante tra il downcomer e l’anulo di risalita che riduceva fortemente lo scambio termico; a causa di questo l’acqua fredda che arrivava nella camera di inversione causava una parziale solidificazione del piombo a contatto con quella zona. Per evitare questo fenomeno è stato rimosso lo strato di isolante interno e dunque è accettata una certa quota di scambio di calore rigenerativo che fa sì che l’acqua arrivi nella regione di inversione ad una temperatura superiore rispetto alla configurazione precedente. A causa di questo il vapore in uscita dal Dip Cooler non è più in condizione surriscaldato ma dal momento che il vapore non deve successivamente espandere in turbina, questo cambiamento non rappresenta un problema.

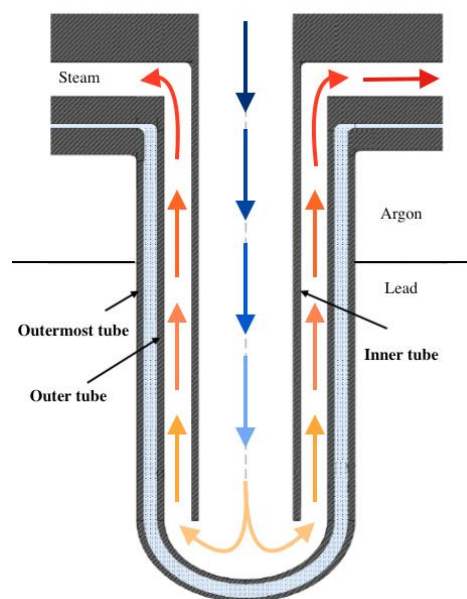


Figura 2.9: Layout della baionetta del DHR2 (non in scala.)

L'eliminazione dello strato isolante e del tubo esterno che lo delimitava fanno sì che l'anulo di risalita sia più grande e provochi minori cadute di pressione per attrito. Lo scambiatore è dunque formato da tre tubi coassiali a differenza dei quattro presenti nelle baionette dei generatori di vapore. (Figura 2.9)

L'intercapedine tra i due tubi più esterni è riempita con elio alla pressione di 4 bar invece di elio e polvere ad alta conducibilità. Questo riduce lo scambio termico tra piombo e acqua e di conseguenza anche l'entità del flashing nella fase iniziale che si verifica quando l'acqua dalla Water Storage Tank entra a contatto con le superfici calde dal Dip Cooler. Così come nel caso del generatore di vapore, il monitoraggio della pressione dell'elio permette di rilevare eventuali guasti e perdite.

Il nome dei tre tubi che compongono il Dip Cooler sono, in ordine crescente di diametro:

- Inner Tube (IT)
- Outer Tube (OT)
- Outermost Tube (OMT)

La superficie esterna dell'OMT è rivestita con uno strato di 50 μm di tantalio per ridurre l'effetto corrosivo del piombo sui tubi. Nella Figura 2.9 è riportata una rappresentazione schematica della baionetta nella quale si può osservare il percorso dell'acqua al suo interno, mentre in Tabella 2 sono riportati i principali dati geometrici degli scambiatori.

Tabella 2 Dimensioni dei tubi a baionetta di ALFRED

	Diametro esterno [mm]
Lunghezza arriva [m]	5
Diametro interno IT [mm]	7.38
Spessore IT [mm]	1.07
Diametro esterno IT [mm]	9.52
Diametro esterno OT [mm]	25.40
Spessore OT [mm]	1.88
Diametro esterno OMT [mm]	31.74
Spessore OMT [mm]	2.11
Spessore gap elio [mm]	1.06
Diametro idraulico anulo [mm]	12.02
Materiale	T91

Isolation Condenser

L'Isolation Condenser (IC) è identico a quello utilizzato nel sistema DHR1. È uno scambiatore di calore costituito da un fascio verticale di tubi collegati a due plenum sferici, uno superiore ed uno inferiore. Questo definisce il pozzo termico rappresentato dalla capacità condensante del vapore prodotto.

Il fascio è costituito da 16 tubi (AISI 316 LN) lunghi 2 m. Il vapore arriva dal plenum superiore e il condensato esce dal plenum inferiore. L'IC è immerso in una piscina d'acqua alla quale trasferisce il calore. La Figura 2.10 rappresenta il design dell'Isolation Condenser mentre in Tabella 3 sono riportati i principali dati geometrici.

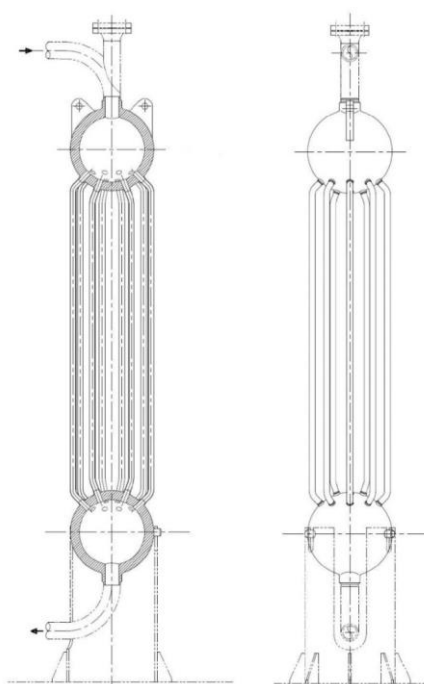


Figura 2.10: Isolation Condenser: sezione (sinistra) e vista laterale (destra)[5].

Tabella 3 Isolation Condenser: dati geometrici

Geometria	Fascio verticale di tubi (passo triangolare $P/D=1.36$)
Numero di tubi	16
Lunghezza dei tubi [m]	2
Diametro esterno / spessore [mm]	38.1 / 3
Materiale	AISI 316 LN
Volume plenum sferici [m³]	0.046
Diametro interno [mm]	440



Water Storage Tank

La Water Storage Tank è il serbatoio che contiene l'acqua che viene introdotta nel sistema quando questo viene attivato. Il volume è di $0,132 \text{ m}^3$ dei quali $0,120 \text{ m}^3$ sono occupati da acqua in condizioni sotto raffreddate alla pressione ambiente. Sulla tubazione che collega la Water Storage Tank alla parte inferiore dell'Isolation Condenser è presente la valvola di isolamento che ha un tempo di apertura di 50 s e una sezione di passaggio massima di 0.87 cm^2 .

Serbatoio d'aria

Il serbatoio d'aria è collegato all'Isolation Condenser e raccoglie l'aria che è presente nel sistema durante la fase di non utilizzo. Il volume del serbatoio è di 0.035 m^3 .

Tubazioni di collegamento

Le tubazioni utilizzate per collegare il Dip Cooler all'Isolation Condenser, sia per la gamba fredda sia per la gamba calda, sono realizzate con tubi 4" SCH 120 in accordo con la classificazione Nominal Pipe Size (NPS). I dati geometrici sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4 Linee di collegamento: dati geometrici

Linea di ingresso all'Isolation Condenser	
Diametro esterno / spessore [mm]	114.30 / 11.13
Lunghezza [m]	10
Linea di scarico all'Isolation Condenser	
Diametro esterno / spessore [mm]	114.30 / 11.13
Lunghezza [m]	18.05

In sintesi il DHR2 è un circuito in cui una sorgente termica trasferibile dal circuito primario al fluido termovettore dipende dal tipo di fluido che circola (gas o liquido), dalle pressioni e dal campo di temperatura. Il dimensionamento del circuito in termini di cadute di pressione e dislivello tra sorgente termica e pozzo termico deve tener conto dei livelli massimi e minimi di temperatura stabiliti per il funzionamento.



3 Metodologia di analisi

Nell'analisi riguardante lo studio di una metodologia progettuale per sistemi di rimozione e trasporto della potenza termica sono stati stabiliti e seguiti alcuni passaggi fondamentali; inizialmente con riferimento al problema in oggetto si è cercato di valutare quali sistemi reali, in particolare tra quelli in fase di progettazione, potessero essere significativi per i fenomeni di interesse. Successivamente si è scelto un sistema ritenuto significativo e rappresentativo del problema (in questo caso il decay heat removal system DHR2 del reattore ALFRED), il sistema è stato quindi studiato ed analizzato per comprenderne il comportamento ed i principi di funzionamento. Si è poi passati alla semplificazione del sistema ed alla sua modellizzazione utilizzando sia il codice di calcolo RELAP5 3D che le equazioni di conservazione applicate a macro volumi di controllo.

In particolare il sistema DHR2 a cui ci si ispira in modo semplificato può essere suddiviso in quattro componenti: scambiatore di calore a baionetta, gamba calda (tubazione di collegamento tra la baionetta ed il condensatore), condensatore, gamba fredda (tubazione di collegamento tra il condensatore e la baionetta). Questi quattro componenti verranno analizzati applicando a ciascuno le equazioni di conservazione della massa e dell'energia nella forma riportata nel seguito.

1) Equazione di conservazione della massa (o equazione di continuità):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dA = 0$$

CV: volume di controllo

CS: superficie di controllo

ρ : densità

V: volume

\vec{v} : velocità

\hat{n} : versore normale alla superficie di passaggio del fluido

A: superficie di passaggio del fluido



2) Equazione di conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CS} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dA = \dot{Q}_{in}$$

CV: volume di controllo

CS: superficie di controllo

e: energia specifica, dove $e = u + \frac{v^2}{2} + gz$

u: energia interna specifica

ρ : densità

V: volume

h: entalpia specifica

g: accelerazione di gravità

z: quota geometrica

\vec{v} : velocità

\hat{n} : versore normale alla superficie di passaggio del fluido

A: superficie di passaggio del fluido

\dot{Q}_{in} : potenza termica netta entrante nel volume di controllo

Nell'ambito di questo modello, saranno caratterizzate temperature, velocità, frazioni di vuoto, cadute di pressione localizzate e continue.

Il codice di calcolo RELAP5 3D contiene naturalmente al suo interno le equazioni di conservazione ed i modelli termofluidodinamici necessari per simulare correttamente il sistema. Le equazioni precedenti vengono applicate ai quattro macro volumi di controllo descritti all'inizio di questo capitolo in particolare per valutazioni d'insieme, come ad esempio la potenza termica dispersa dalle fasce riscaldanti (vedere capitolo successivo).

4 Progetto della facility sperimentale

La progettazione della facility sperimentale è stata compiuta utilizzando i risultati preliminari del codice di calcolo RELAP5 3D per ottimizzare progressivamente il design. L’obiettivo è stato cercare di riprodurre il sistema DHR2 in modo semplificato e modulare per permettere la sostituzione di singoli componenti in modo rapido ed economico, senza modificare l’intero circuito. In Figura 4.1 è riportata la vista frontale della facility in cui si può osservare la disposizione dei vari componenti oltre che le loro dimensioni geometriche.

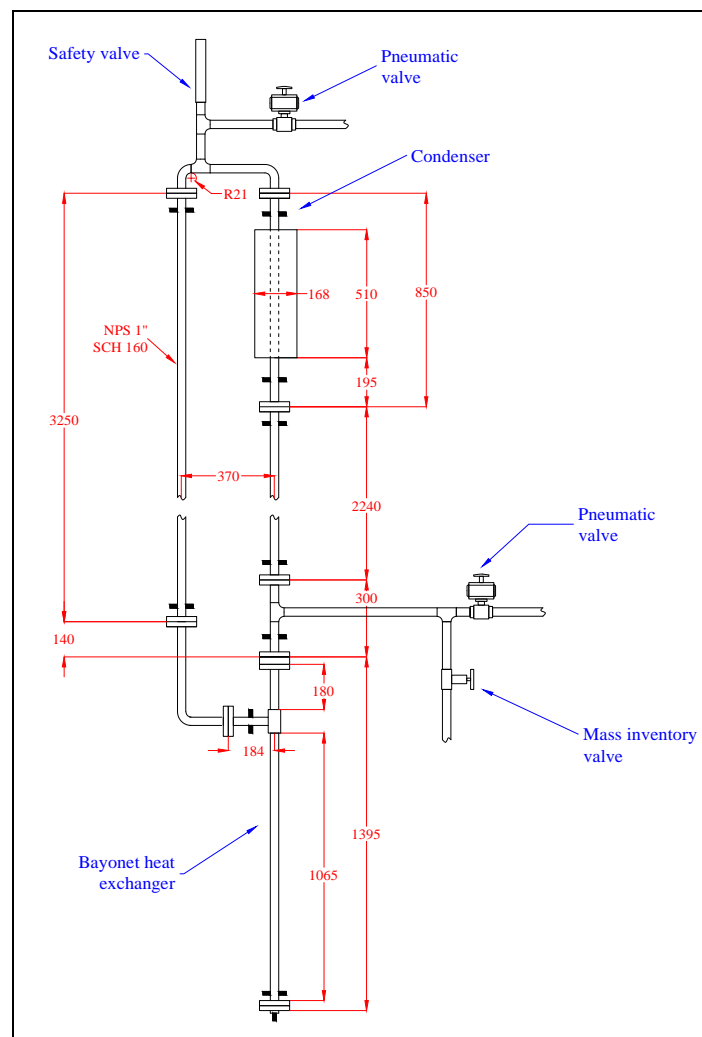


Figura 4.1: Vista frontale della facility

La facility è composta da due componenti fondamentali: uno scambiatore di calore a baionetta (sorgente termica), posto nella parte inferiore, ed un condensatore per il vapore prodotto nella baionetta (pozzo termico) posto all'estremità superiore. Si è scelto di progettare il circuito in modo che potesse sopportare pressioni relativamente elevate, quindi le tubazioni di collegamento tra i due scambiatori, così come il tubo esterno della baionetta e quello del condensatore, sono state realizzate in acciaio inossidabile AISI 304 NPS 1” SCH 160.

4.1 Scambiatore di calore a baionetta

Il componente a cui è stata rivolta maggiore attenzione è lo scambiatore di calore a baionetta, che mantiene le sezioni di passaggio dell'acqua presenti nelle baionette del sistema DHR2, ma che per ragioni di altezza complessiva è stata scalata da 6 m a 1 m.

Nella Figura 4.2 si può osservare uno lo schema di funzionamento dello scambiatore a baionetta.

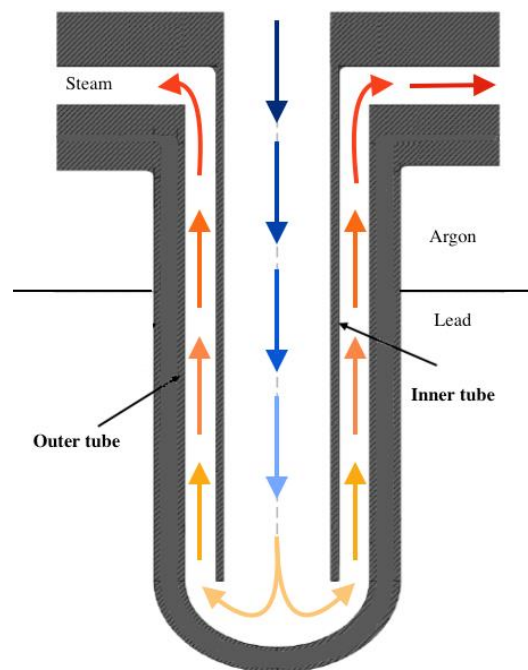


Figura 4.2: Schema concettuale del funzionamento dello scambiatore a baionetta

Nel sistema reale lo scambiatore trasferisce la potenza termica dal piombo liquido all'acqua; considerate le difficoltà nell'utilizzare il piombo liquido come sorgente termica, inizialmente era stato proposto un sistema di riscaldamento ad olio diatermico per mantenere lo scambio termico a temperatura imposta come nel sistema reale. Questa soluzione è stata accantonata perché, a causa



dei limiti di temperatura dell’olio stesso, la differenza di temperatura era troppo ridotta per avere una potenza scambiata significativa, e, inoltre, a causa delle problematiche di tossicità e costo dell’olio diatermico.

La soluzione adottata è stata l’utilizzo di fasce elettriche riscaldanti per alte temperature (OMEGALUX STH), che sono state avvolte all’esterno della baionetta e collegate ad un variatore di tensione per poterne modulare la potenza. La potenza massima complessiva delle due fasce installate è pari a 1.57 kW.

Come già riportato precedentemente la baionetta è stata progettata e realizzata in moduli sostituibili singolarmente; in particolare è possibile modificare facilmente il diametro del downcomer centrale e l’altezza della camera di inversione.

In Tabella 5 sono riportate le dimensioni geometriche dello scambiatore a baionetta.

Tabella 5 Dimensioni geometriche scambiatore di calore a baionetta

Diametro interno downcomer [mm]	8
Diametro esterno downcomer [mm]	10
Diametro interno tubo esterno [mm]	20.7
Diametro esterno tubo esterno [mm]	33.4
Lunghezza [m]	1.02

Nella Figura 4.3 si può apprezzare una vista in sezione dello scambiatore e la foto della baionetta nella sua posizione finale in cui si possono osservare le fasce riscaldanti.

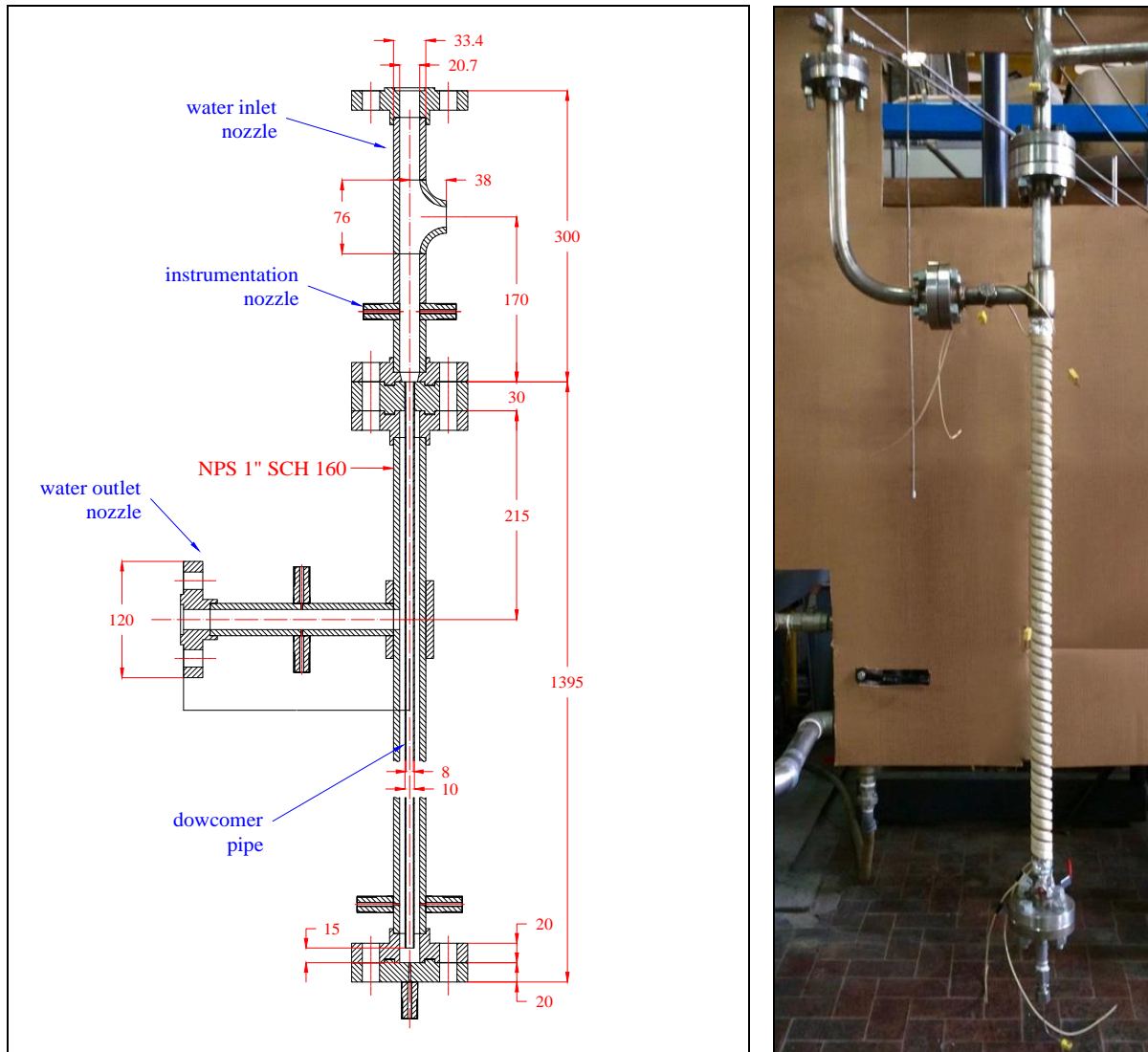


Figura 4.3: Vista in sezione dello scambiatore di calore a baionetta (sinistra) e foto della baionetta finita (destra)

4.2 Condensatore

Il condensatore costituisce il pozzo termico del sistema in cui il vapore prodotto nella baionetta viene condensato. È costituito da due tubi coassiali, nel tubo interno passa il vapore che viene condensato, all'esterno è presente acqua liquida che costituisce una piscina a pelo libero. Il condensatore è collegato ad una vasca d'acqua più grande che permette di variare il livello lato mantello dello scambiatore e successivamente di mantenere un livello d'acqua costante durante la procedura sperimentale.

La decisione iniziale prevedeva di operare a pressioni elevate, ma da calcoli effettuati si è osservato come nel componente del condensatore gli stress meccanici dovuti alle sollecitazioni termiche siano elevati a causa della presenza contemporanea di condensazione all'interno ed evaporazione all'esterno. In via cautelativa, per le prove iniziali, si è quindi deciso di ridurre la pressione massima al valore di 30 bar.

In Figura 4.4 si può apprezzare una vista in sezione del condensatore e la foto del condensatore nella sua posizione finale.

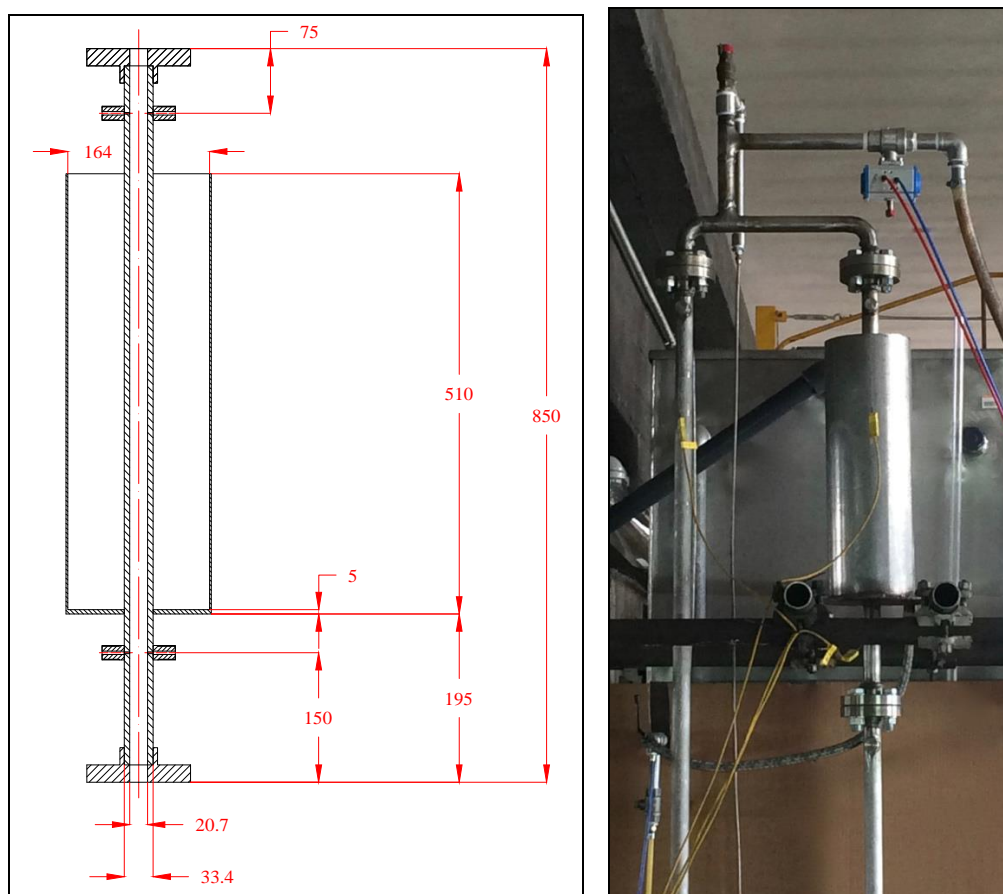


Figura 4.4: Vista in sezione del condensatore (sinistra) e foto del condensatore finito (destra)

4.3 Tubazioni e flange

Le tubazioni utilizzate per il collegamento dei componenti hanno dimensione NPS 1” SCH 160; le flange utilizzate possono sopportare pressioni elevate e sono sigillate con guarnizioni per alta temperatura prive di amianto.

Alle estremità di ogni componente e tubazione sono state predisposte prese di pressione e di temperatura per permettere la misura delle grandezze desiderate nelle posizioni più significative.

In Figura 4.5 è possibile osservare la facility sperimentale completata.

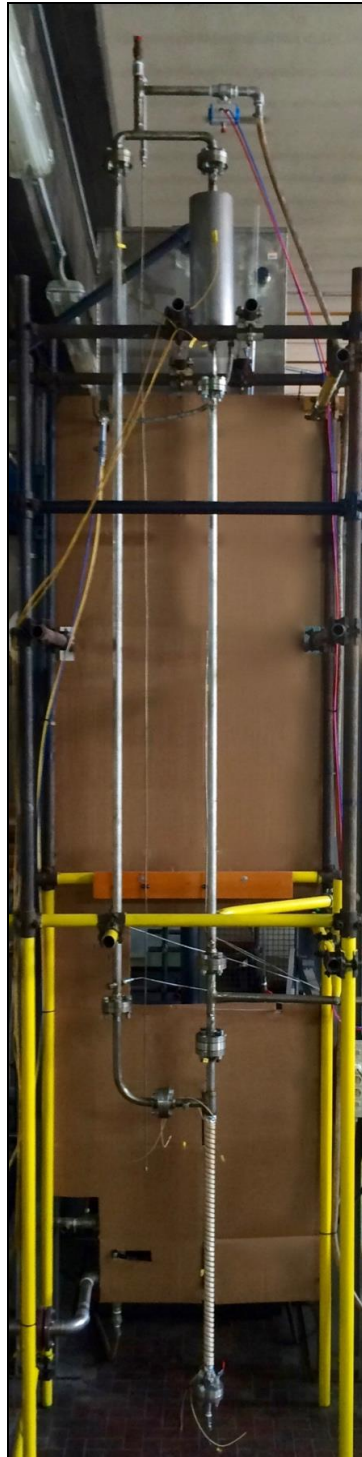


Figura 4.5: Foto frontale della facility completa



5 Nodalizzazione della facility sperimentale per il codice di calcolo RELAP5-3D

La Figura 5.1 riporta la nodalizzazione RELAP5-3D della facility sperimentale insieme con le condizioni al contorno adottate. Il modello si distingue in due sottosistemi: il circuito sperimentale e la piscina di rimozione della potenza. Il circuito sperimentale può ancora essere suddiviso in tre volumi di controllo principali:

- Scambiatore di calore a baionetta,
- Condensatore,
- Piping di collegamento.

La baionetta è collocata nella regione inferiore del circuito. L'acqua di ritorno dal condensatore entra nel tubo più interno (PIPE 208), raggiunge il serbatoio di inversione (SINGLE VOLUME 210) e risale nella regione anulare tra il tubo esterno ed il tubo interno (ANNULUS 212) prima di uscire trasversalmente dal volume costituito dalla giunzione a T (ANNULUS 214). Lo scambio termico del fluido è modellizzato mediante le strutture termiche che rappresentano il tubo esterno (HS 002) ed il tubo interno (HS 001, HS 004). Il tubo esterno è dotato di una condizione al contorno interna di scambio termico convettivo con l'anulo ed una esterna di flusso termico imposto, implementato nell'input con una tabella. Il tubo interno è rappresentato mediante due strutture termiche per separare la regione di scambio termico rigenerativo in prossimità della lunghezza attiva con la regione di scambio termico tra fluido discendente e fluido ascendente in prossimità della giunzione a T. Entrambe le strutture termiche sono collegate ai volumi idrodinamici del fluido mediante una condizione di scambio termico convettivo.

Il condensatore si trova nella parte superiore del circuito, ed è modellizzato mediante un singolo condotto (PIPE 224) che scambia calore con la piscina di rimozione della potenza (PIPE 306) attraverso una struttura termica (HS 003).

Il piping di collegamento unisce l'uscita della baionetta con il condensatore (PIPES 216, 218, 220 e 222) e l'uscita del condensatore con l'ingresso della baionetta (PIPES 226, 202, 204). In questa prima fase di studio non si è considerato l'apporto alla soluzione delle capacità termiche del piping a cui pertanto non sono associate strutture termiche.

La piscina di rimozione della potenza è rappresentata mediante il PIPE 306 che rappresenta il volume nel quale si forma il livello di liquido. Il volume è collegato ad una condizione al contorno (TIME DEPENDENT VOLUME 308) impostata con aria in condizioni ambientali. La condizione al contorno collegata al fondo della piscina (TIME DEPENDENT VOLUME 304) mediante la valvola 305 permette di mantenere il livello della piscina ad un valore di set-point. La logica di regolazione prevede un insieme di variabili di controllo che, considerato il grado di vuoto nel volume al di sopra del quale si vuole mantenere il livello, agisce sulla posizione della valvola.

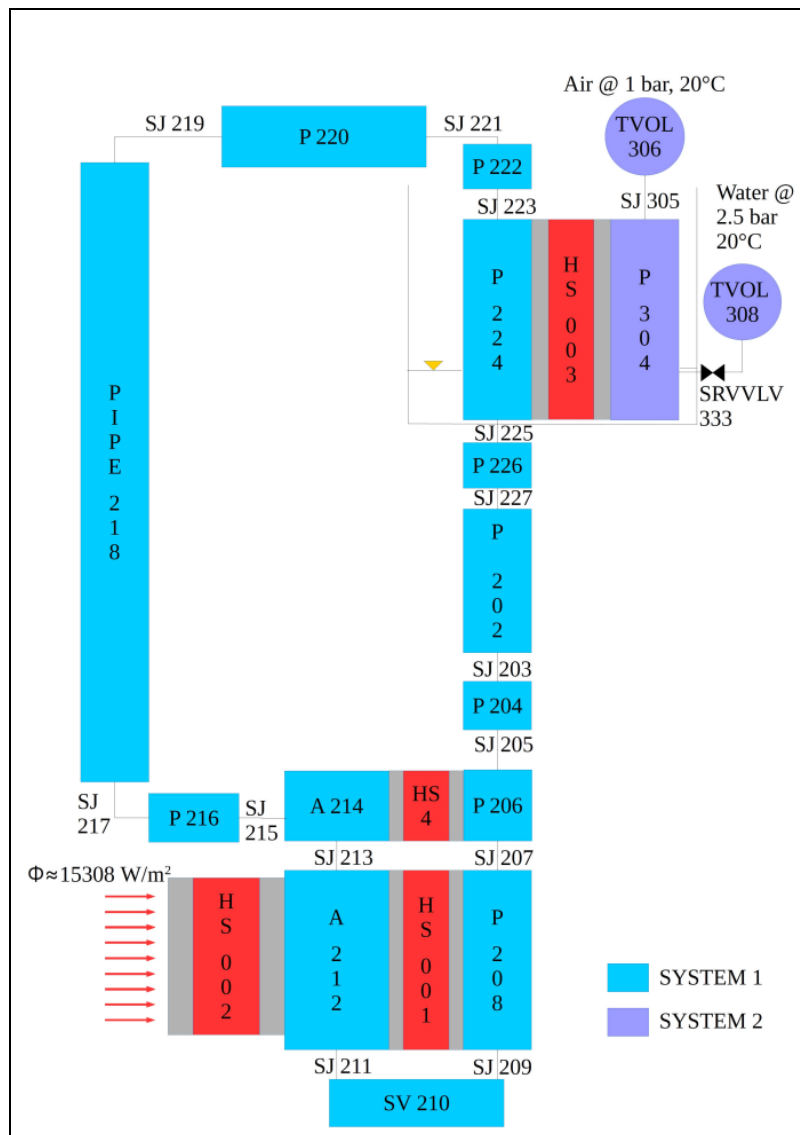


Figura 5.1: Schema R53D



6 Risultati delle simulazioni RELAP5-3D

In questo capitolo vengono descritti i risultati ottenuti utilizzando il codice RELAP5 3D considerando un sistema analogo al DHR2 e la facility sperimentale realizzata (nel secondo caso il modello utilizzato è quello presentato nel capitolo 5). Per quanto riguarda la facility sperimentale, oltre alle simulazioni riguardanti un transitorio rappresentativo delle condizioni di startup, viene anche presentato uno studio di sensibilità in funzione della massa di acqua contenuta nel sistema e del livello di acqua contenuto in piscina.

Nei risultati si farà spesso riferimento ad un “grado di vuoto iniziale” α : esso rappresenta la frazione di vapore totale contenuta nel circuito alla pressione di 1 bar, ed è intimamente correlato con la massa di acqua contenuta nel sistema (quando questo valore tende a 0, il circuito è inizialmente riempito di acqua liquida) [14].

6.1 DHR2 - procedura di Start-up

È stato considerato un sistema geometricamente analogo al DHR2 prima descritto: il sistema risulta quindi costituito da un fascio di 80 scambiatori a baionetta e da un Isolation Condenser immerso in una piscina che funziona da pozzo di calore. Tuttavia, la potenza termica viene fornita dall'esterno nella forma di flusso termico imposto sulla superficie esterna delle baionette.

La potenza termica fornita complessivamente è di 1 MW alla quale, tenuto conto della superficie totale delle baionette, corrisponde un flusso termico di 22720 W/m².

Il valore di potenza è stato calcolato a partire dalla curva del calore di decadimento generato nel nocciolo: assumendo che il sistema DHR2 entri in funzione dopo circa 2 ore dallo SCRAM del reattore, a quell'istante temporale corrisponde una potenza generata di circa 4 MW. Ipotizzando tutti e quattro i sistemi funzionanti e l'assenza di maldistribuzioni di portata, la potenza termica associata ad ognuno di essi è di circa 1 MW.

Il sistema viene riempito inizialmente per il 50% da acqua in condizioni di saturazione ad 1 bar mentre il rimanente 50% è vapore in equilibrio con la fase liquida. Non è presente aria all'interno del sistema. La massa d'acqua contenuta all'interno del circuito è di circa 310 kg.

Il transitorio simulato è analogo a quello simulato per la facility:

$t \in [0-50]$ s: la potenza fornita è nulla e la piscina di rimozione del calore è piena d'aria



- $t \in (50-110]$ s: la potenza termica viene attivata. La potenza segue una rampa lineare fino a 1 MW
- $t \in (110-170]$ s: la potenza viene mantenuta costante e la piscina rimane piena d'aria
- $t \in (170-230]$ s: la piscina di rimozione viene riempita di acqua ad 1 bar e 30°C con un andamento esponenziale fino a un livello di 2 m
- $t \in (230-6000]$ s: la potenza imposta sulle baionette e il livello della piscina sono mantenuti costanti

Il ritardo nell'introduzione dell'acqua nella piscina è stato simulato per poter meglio apprezzare la fase iniziale di pressurizzazione del sistema. Tuttavia, dato che nel sistema DHR2 la piscina risulta sempre riempita con acqua, si ritiene che questa assunzione sia conservativa ai fini dei risultati.

L'obiettivo della simulazione è quello di verificare che il sistema si porti in una condizione di funzionamento stazionaria e di valutare il contributo della circolazione naturale. Dal momento che si simula lo stesso transitorio temporale in termini di eventi e data la somiglianza concettuale esistente tra il sistema simulato e il circuito sperimentale realizzato, si intende inoltre analizzare il comportamento del sistema in modo tale da verificare:

- se siano presenti similitudini fenomenologiche tra di essi in particolare nell'andamento temporale delle proprietà termodinamiche, tenendo conto delle diverse costanti di tempo di ciascun sistema;
- in quale misura sia possibile prevedere il comportamento di uno dei due sistemi a partire dall'altro, note le caratteristiche geometriche e le condizioni al contorno di entrambi.

Nel modello del DHR2 è presente un volume d'acqua della piscina molto grande che non è stato modificato (132 m³). Questo fa sì che dopo 6000 s non si raggiungano le condizioni di saturazione nella piscina e a questo è dovuto al non raggiungimento di una condizione stazionaria per quanto riguarda le grandezze coinvolte (in particolare pressione e temperatura). A $t=6000$ s la temperatura della piscina è di circa 40°C e infatti in essa non si osserva alcuna generazione di vapore.

Nonostante alcuni valori non siano perfettamente stazionari il loro rateo temporale di variazione risulta molto limitato permettendo di compiere alcune osservazioni, in particolare riguardo alla scala temporale dei fenomeni in oggetto.

In Figura 6.1 si può osservare l'andamento della potenza scambiata nel fascio di baionette e nell'Isolation Condenser. Dopo circa 2000 s vengono raggiunte condizioni pressoché stazionarie.

In Figura 6.2 è riportato l'andamento della pressione nel sistema, che si porta in condizioni quasi stazionarie al valore di 25.6 bar.

In Figura 6.3 è possibile osservare l'andamento della portata circolante nel sistema, che mostra una fase iniziale di circa 500 s caratterizzata da forti oscillazioni legate a fenomeni di redistribuzione di massa. Viene poi raggiunto un valore stazionario di circa 5.2 kg/s.

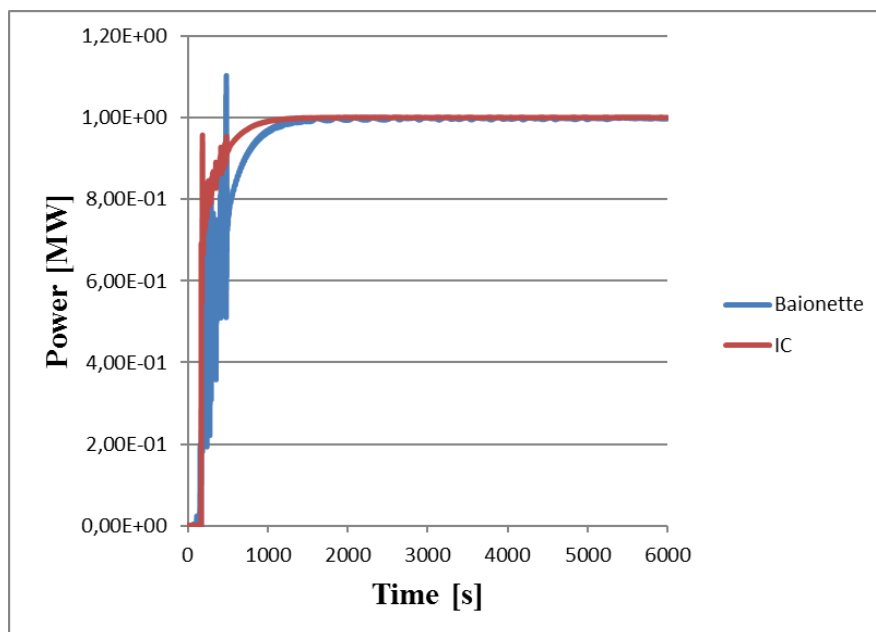


Figura 6.1: Sistema DHR2, potenza scambiata nella baionetta e nella piscina

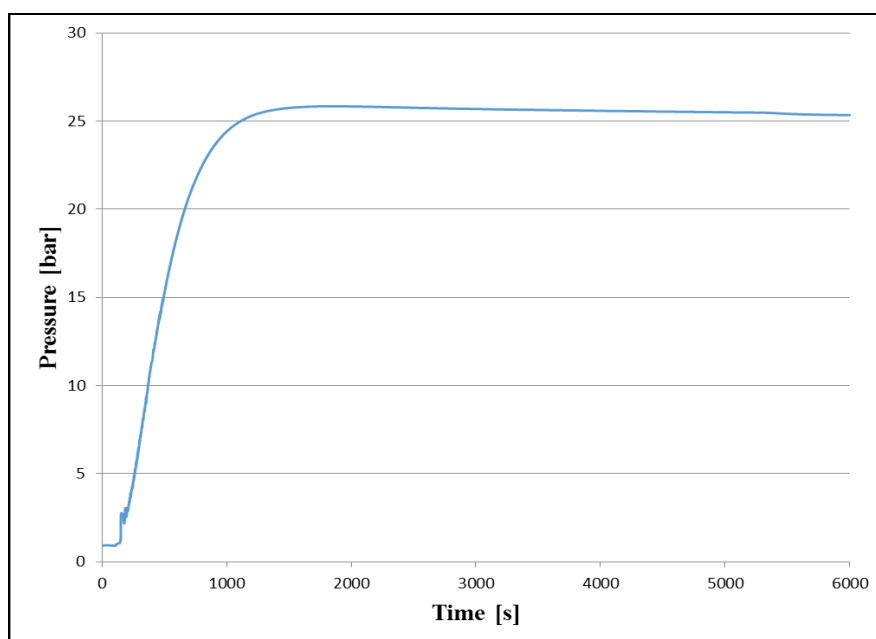


Figura 6.2: Sistema DHR2, pressione

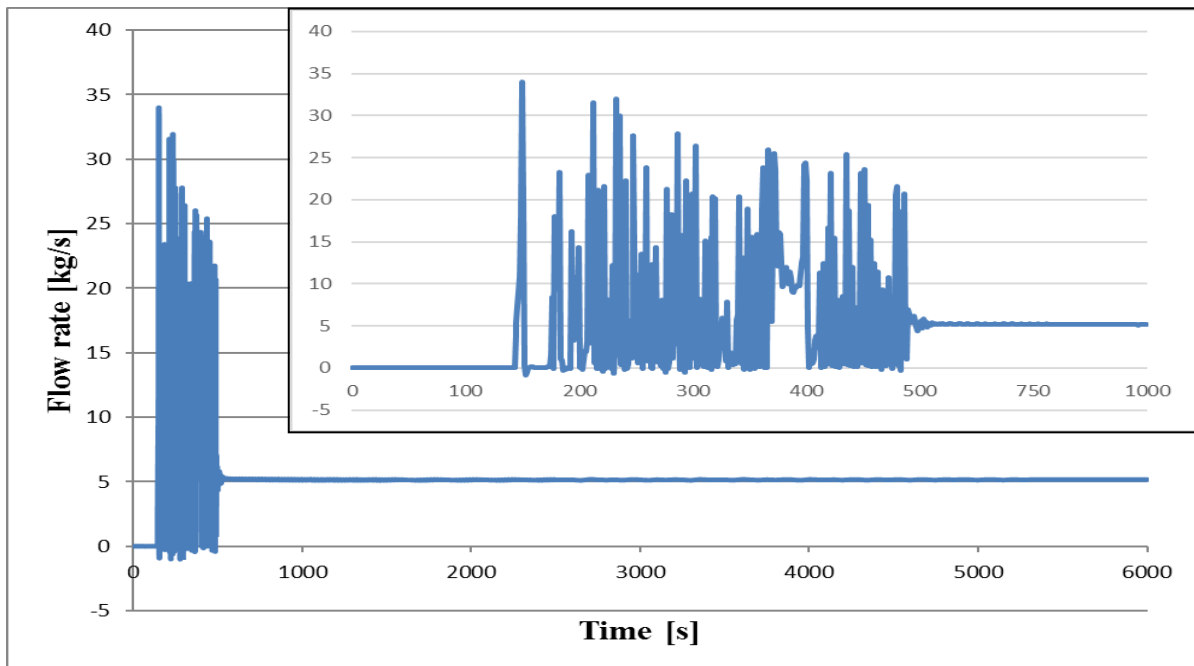


Figura 6.3: Sistema DHR2, portata

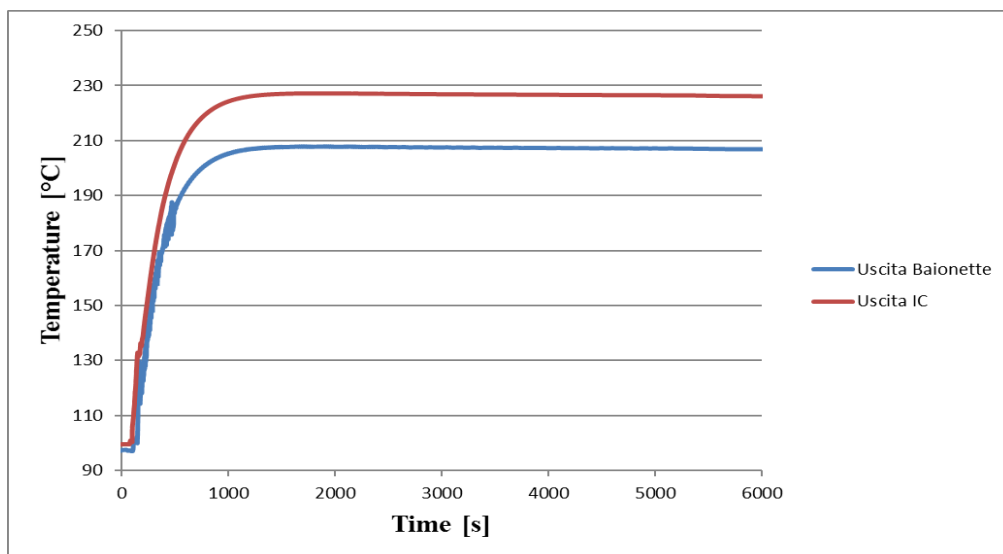


Figura 6.4: Sistema DHR2, temperature

In Figura 6.4 sono infine riportate le temperature all'uscita della baionetta ed all'uscita dell'Isolation Condenser, pari rispettivamente in condizioni stazionarie a 226.5°C e 207.3°C. La fase transitoria iniziale si esaurisce in circa 1500 s.



6.2 Facility sperimentale - procedura di Start-up

La condizione iniziale del circuito è quella di saturazione alla pressione di 1 bar. Si ipotizza che l'aria inizialmente contenuta nel circuito prima e durante il riempimento sia stata completamente estratta, o, in alternativa, che la quantità ancora contenuta nel sistema non impatti sulla fluidodinamica e sullo scambio termico. Il grado di vuoto iniziale della facility è del 50%, e la fase liquida si trova ad un livello di 2.7 metri. Gli eventi descritti dal transitorio (analogamente al caso precedente) sono i seguenti:

$t \in [0-50]$ s: i cavi scaldanti sono spenti e la piscina di rimozione del calore è piena d'aria

$t \in (50-110]$ s: i cavi scaldanti vengono accesi. La potenza segue una rampa lineare fino a 1.5 kW

$t \in (110-170]$ s: la potenza viene mantenuta costante e la piscina rimane piena d'aria

$t \in (170-230]$ s: la piscina di rimozione viene riempita di acqua ad 1 bar e 30°C con un andamento esponenziale fino a un livello di 14 cm

$t \in (230-6000]$ s: la potenza imposta sulla baionetta e il livello della piscina sono mantenuti costanti

L'obiettivo della simulazione è quello di verificare che il sistema si porti in una condizione di funzionamento stazionaria e sostenibile dal punto di vista delle temperature e della pressione, e che si osservi il moto di circolazione naturale.

Quando la potenza viene immessa sulla superficie esterna della baionetta la pressione del circuito comincia a salire mentre il livello di liquido si riduce. La potenza viene rimossa dalla baionetta attraverso l'ebollizione dell'acqua e il vapore prodotto ascende nel ramo di risalita attraverso il livello di liquido con un flow pattern di tipo slug.

Quando l'acqua viene inserita nella piscina la circolazione naturale nel circuito si stabilizza intorno ad un valore di circa 13 g/s. Dopo un primo momento, le condizioni dell'acqua in piscina raggiungono la saturazione e la potenza rimossa eguaglia la potenza immessa nella baionetta; parallelamente, la pressione del circuito si stabilizza intorno a 17.5 bar.

In seguito, il circuito opera in condizioni di saturazione, ad eccezione del ramo di discesa in uscita dal condensatore dove l'acqua ha un sottoraffreddamento di circa 6°C. La pressione raggiunta è tale da permettere la rimozione di potenza dal circuito con la portata di circolazione naturale che si

instaura. Le Figura 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 mostrano l’andamento delle grandezze di interesse durante il transitorio.

È interessante notare come nel momento in cui l’acqua contenuta nella piscina raggiunge la saturazione ($t \approx 1100s$) la potenza rimossa subisce un incremento considerevole causato da un miglioramento del coefficiente di scambio termico convettivo, mentre la pressione del circuito subisce una variazione considerevole della propria derivata temporale prima di raggiungere le condizioni stazionarie.

Come si può facilmente osservare i valori di portata sono molto bassi, dell’ordine dei grammi al secondo; questo fatto pone seri problemi nell’identificazione della metodologia migliore per la misura della portata circolante.

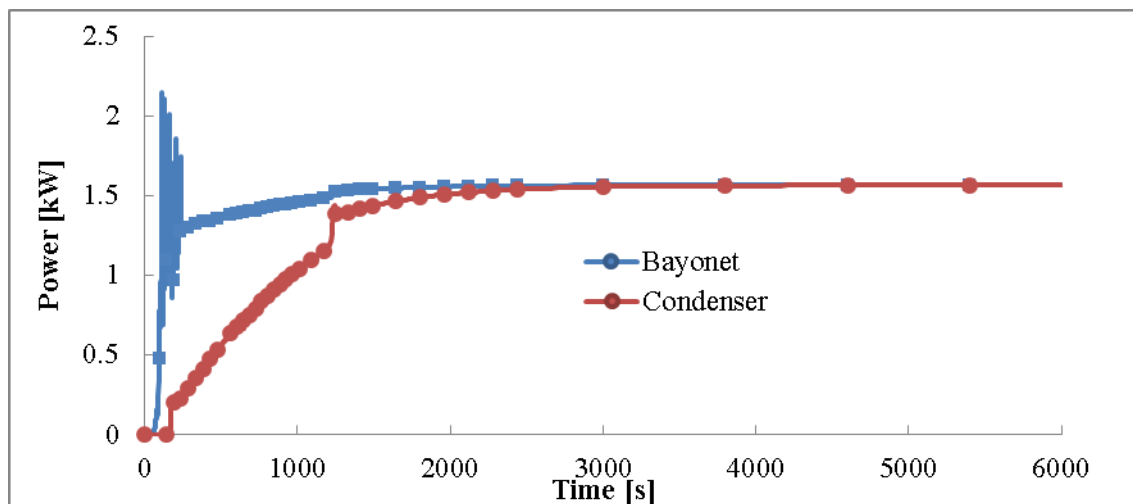


Figura 6.5: Facility sperimentale, potenza scambiata nella baionetta e nella piscina

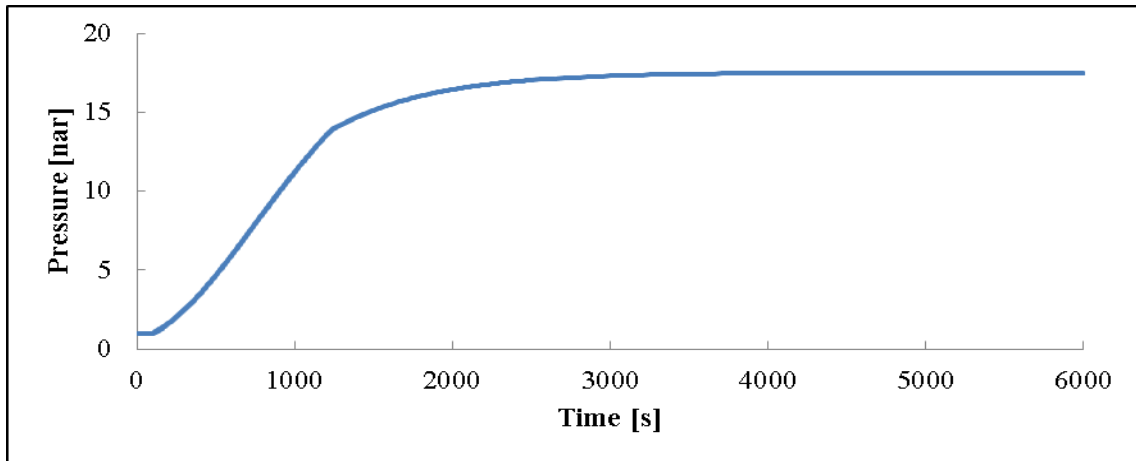


Figura 6.6: Facility sperimentale, pressione

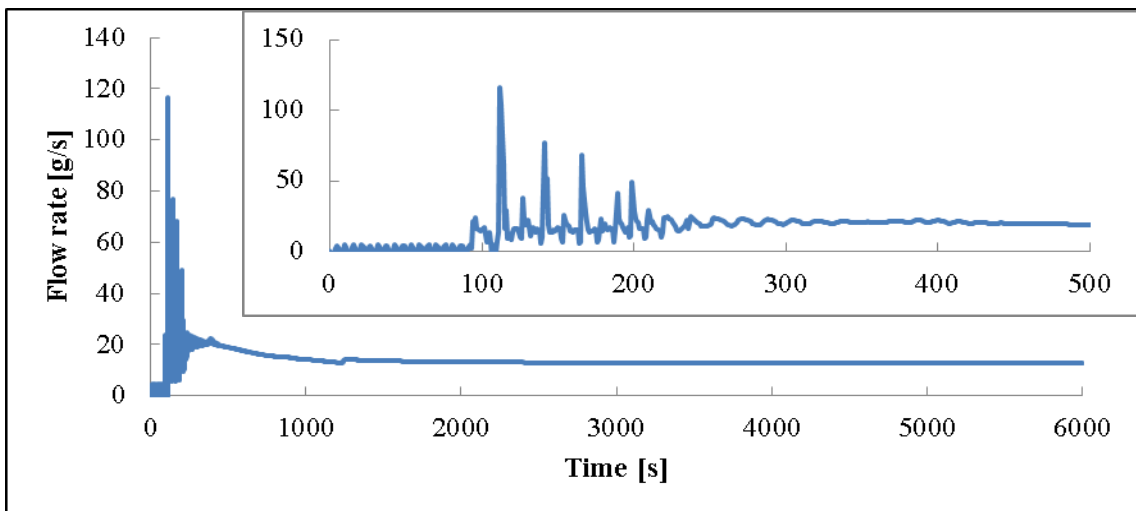


Figura 6.7: Facility sperimentale, portata all'uscita della baionetta

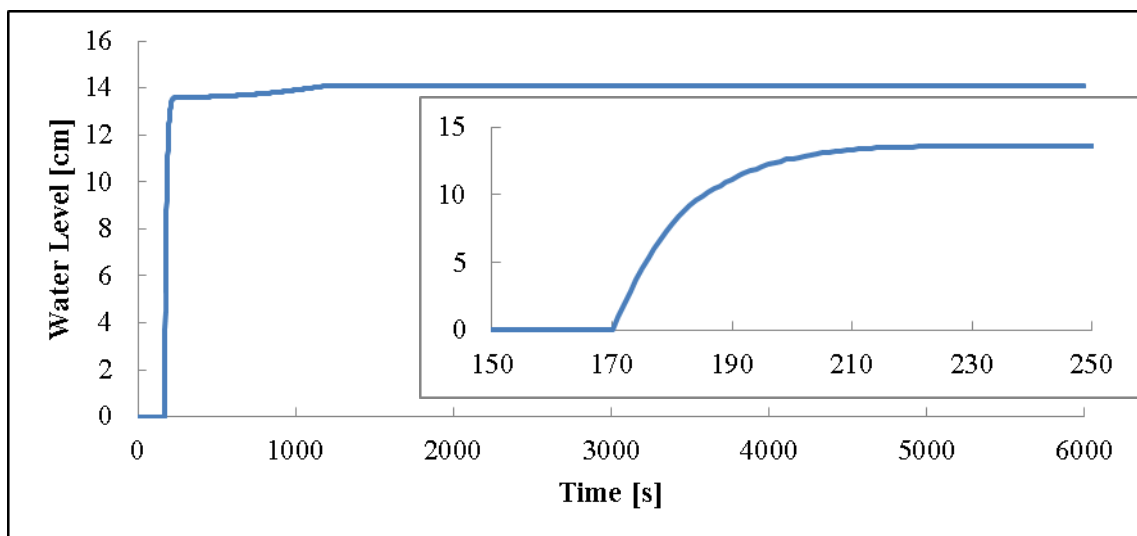


Figura 6.8: Facility sperimentale, livello di liquido nella piscina

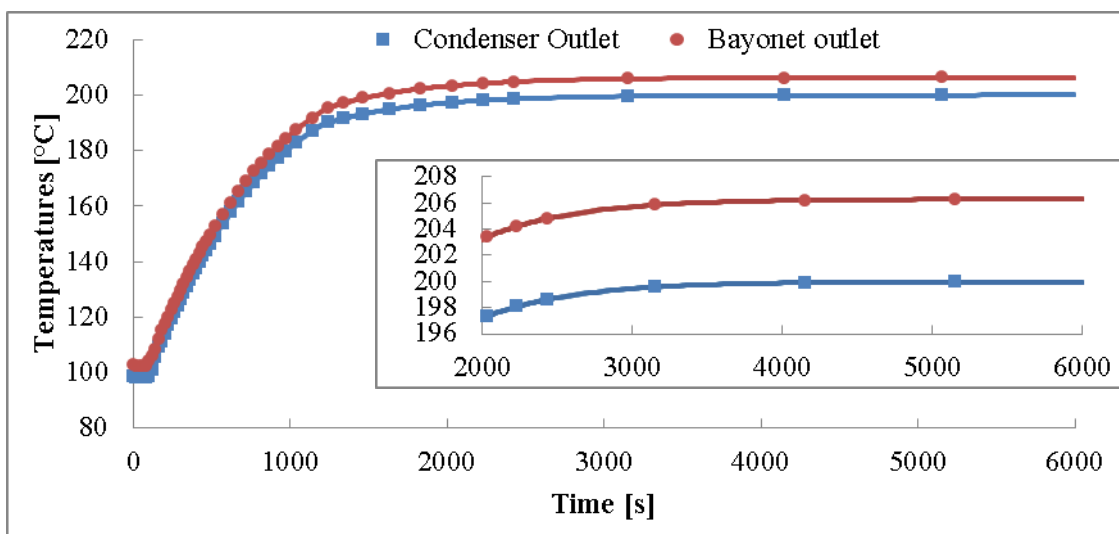


Figura 6.9: Facility sperimentale, temperature del circuito

6.3 Confronto DHR2 e facility sperimentale

Analizzando e confrontando i risultati ottenuti per il sistema che riproduce il DHR2 e per la facility sperimentale è possibile fare alcune osservazioni che, se confermate sperimentalmente, potranno essere utili nello sviluppo di una metodologia progettuale per lo studio di sistemi per la rimozione del calore.

Come si può osservare infatti, nonostante i due sistemi non siano perfettamente scalati nel senso geometrico del termine, molti fenomeni riprodotti sono analoghi; gli andamenti delle grandezze riportate sono infatti molto simili ed in particolare le scale temporali sono pressoché le stesse.

Le differenze maggiori negli andamenti delle grandezze analizzate sono ricollegabili al diverso rapporto tra le masse presenti e, in particolare, al volume della piscina dell'Isolation Condenser che, essendo in proporzione nettamente maggiore nel caso del circuito DHR2, presenta una maggiore inerzia termica e non raggiunge le condizioni di saturazione rapidamente come accade nel caso della facility sperimentale.

Confrontando le figure 6.1 e 6.5, relative rispettivamente al singolo circuito del DHR2 e alla facility sperimentale, si osserva che in entrambi casi si raggiungono valori pressoché stazionari dopo circa 2000 s. Tuttavia nel caso del DHR2 la potenza scambiata nell'Isolation Condenser converge più velocemente a quella scambiata nelle baionette, grazie ad una maggior efficacia dello scambio termico nel pozzo di calore; infatti la massa d'acqua contenuta nella piscina in cui è immerso l'Isolation Condenser è molto maggiore nel caso del DHR2 e conseguentemente la temperatura



media dell'acqua nella piscina dopo 6000 s è di circa 40°C (a fronte di circa 100°C nel caso della facility sperimentale).

Anche il transitorio di pressione mostra andamenti simili nei due casi (figure 6.2 e 6.6), sebbene si osservino lievi differenze nelle scale temporali (durata del transitorio di circa 1500 s nel caso del DHR2, a fronte di circa 2000 s nella facility sperimentali) e nei valori finali in stazionario (25.6 bar nel DHR2 a fronte di 17.5 bar nella facility).

Per ciò che riguarda la portata circolante nel sistema (figure 6.3 e 6.7), in entrambi i casi si osservano iniziali forti oscillazioni sino al raggiungimento di un valore stazionario, che si verifica dopo 500 s nel caso del DHR2 e 400 s nel caso della facility.

Il valore in stazionario della portata circolante è di 5.2 kg/s nel DHR2 e di 13 g/s nel caso della facility, valori che dipendono dai diversi valori di pressione nei due sistemi, dalle diverse aree di passaggio del fluido e dal dislivello tra i centri termici di baionetta e Isolation Condenser, che assume valori decisamente minori nella facility come conseguenza delle caratteristiche geometriche del laboratorio in cui è installata.

Infine anche l'andamento delle temperature all'uscita della baionetta e dell'Isolation Condenser presentano una forte similitudine con quanto si osserva per la facility sperimentale (Figura 6.9). Tuttavia si osserva una lieve differenza di durata della fase di transitorio (1500 s nel caso del DHR, a fronte di quasi 2000 s nella facility) e differenti valori stazionari. In particolare il valore della temperatura all'uscita della baionetta è legato alla temperatura di saturazione (maggiore nel caso del DHR2).

6.4 Studi di sensibilità sulla massa di acqua iniziale nel circuito e sul livello di acqua nella piscina

Per quanto riguarda gli studi di sensibilità, il lavoro si concentra sulla massa di acqua contenuta nel circuito e sul livello di acqua nella piscina. Il livello di acqua definisce la lunghezza attiva di scambio termico per la piscina di rimozione. L'obiettivo prefissato è di osservare le condizioni operative che si instaurano, in termini di campo di temperatura, pressione e portata di circolazione naturale. Queste grandezze hanno anche lo scopo di verificare i limiti di funzionamento dell'impianto con riferimento alle tensioni massime ammissibili del piping e alla misurabilità dei parametri.

Le simulazioni sono state svolte con la procedura seguente. Il modello è inizializzato in condizioni di saturazione alla pressione di 1 bar con una miscela di liquido e vapore in equilibrio. Il circuito è riscaldato nella regione attiva della baionetta con una potenza di 1.56 kW immessa mediante flusso termico imposto sulla superficie esterna mentre la piscina contiene un livello di acqua costante. A partire da queste condizioni, la pressione, le temperature e la circolazione naturale si modificano fino a raggiungere una condizione stazionaria. Raggiunta la condizione stazionaria, il circuito lavora in una condizione bifase di saturazione in cui il liquido evapora nella baionetta e condensa nella regione superiore. La Figura 6.10 mostra la pressione raggiunta dal circuito in condizioni stazionarie in funzione del suo grado di vuoto e del livello di acqua nella piscina.

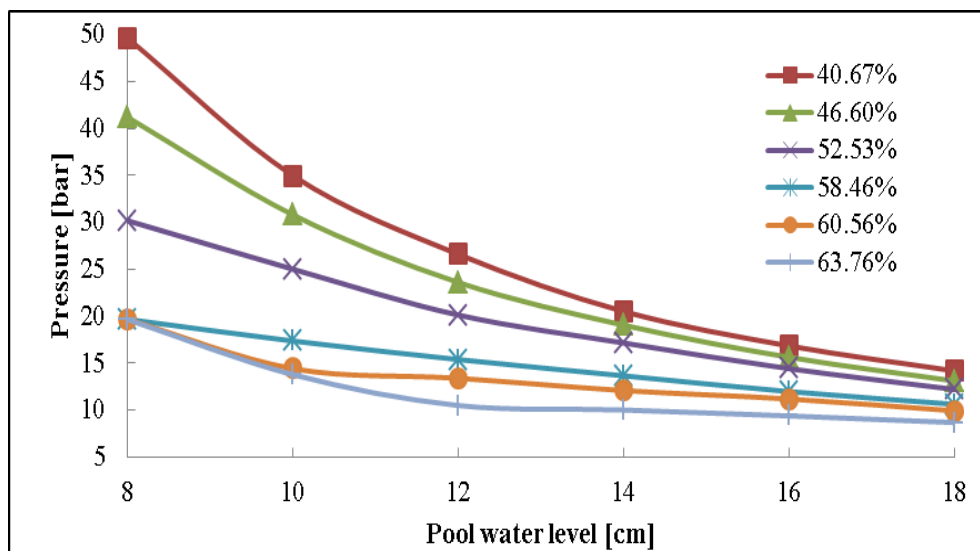


Figura 6.10: Pressione

Le pressioni massime si registrano per il minimo livello di acqua nella piscina e variano tra 20 e 50 bar: a causa di una minore superficie di scambio termico il circuito deve portarsi a temperature superiori (e quindi pressioni superiori) per evacuare la potenza all'esterno. All'aumentare della massa di acqua nel circuito anche la pressione finale aumenta, avendo il vapore un volume minore per espandere.

La Figura 6.11 mostra la portata di circolazione naturale. Un aumento della lunghezza attiva della piscina o della massa di acqua contenuta nel sistema comportano un aumento di portata. Per capire questo comportamento sono necessarie alcune considerazioni. La portata di circolazione naturale dipende dalla differenza di densità tra la gamba calda e la gamba fredda, dalla distanza tra la sorgente e il pozzo termico e dal grado di vuoto. Variando il livello tra 8 e 18 cm la distanza tra

pozzo freddo e sorgente termica si modifica di circa il 3%, pertanto il suo impatto è limitato. D'altra parte, fissata la massa di acqua nel circuito, la portata aumenta con la lunghezza attiva del condensatore, perché a pressioni minori il rapporto di densità tra le fasi sature aumenta. Considerando invece un valore costante per la lunghezza attiva della piscina, all'aumentare dell'inventario di acqua nel circuito anche la portata aumenta, perché il grado di vuoto nei rami bifase è maggiore. Dai risultati ottenuti si evince come i valori assoluti di portata di circolazione naturale sono bassi: sarà pertanto necessario limitare per quanto possibile l'incertezza nella misura di questa grandezza durante le prove sperimentali.

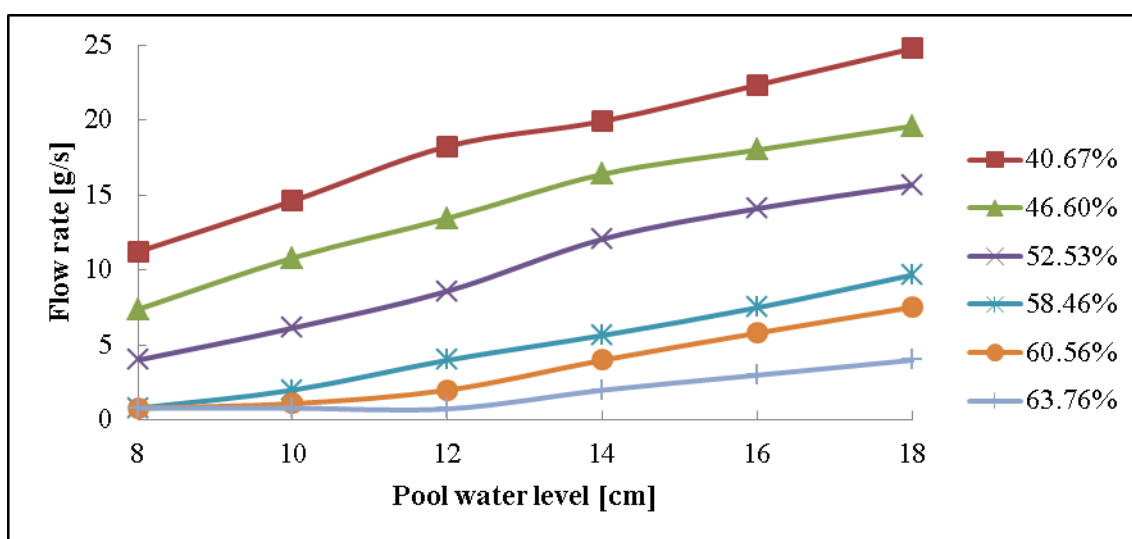


Figura 6.11: Portata di circolazione naturale

Un'ulteriore figura di merito è la massima temperatura di parete raggiunta dalla baionetta. La sua valutazione permette di valutare la presenza di problemi meccanici associati al piping. La Figura 6.12 mostra la temperatura massima della parete interna per il tubo più esterno. Come si può notare il valore massimo non supera 270°C , pertanto non si prospettano problemi meccanici alle strutture. Considerati poi la conducibilità dell'acciaio e il flusso termico imposto sulla superficie esterna il gradiente termico nello spessore è di circa 8°C .

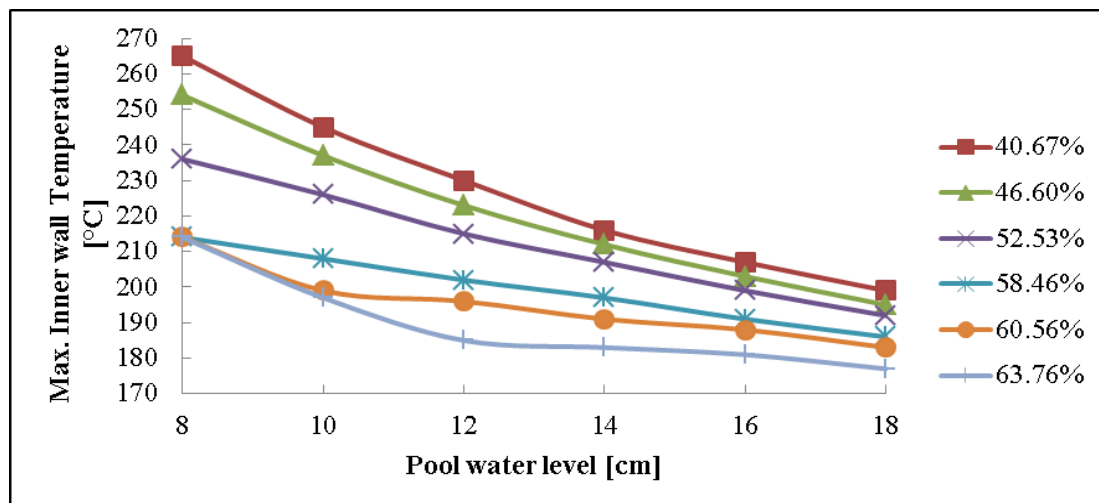


Figura 6.12: Massima temperatura sulla superficie interna del tubo esterno

La Figura 6.13 mostra il livello di liquido nel ramo di discesa in uscita dal condensatore. Esso è proporzionale alla massa di acqua contenuta nel sistema ed è debolmente dipendente dal livello di acqua nella piscina.

La Figura 6.14 mostra il grado di vuoto in uscita dalla baionetta. Esso dipende debolmente dal livello di acqua contenuto nella piscina, mentre diminuisce all'aumentare di liquido contenuto nel circuito.

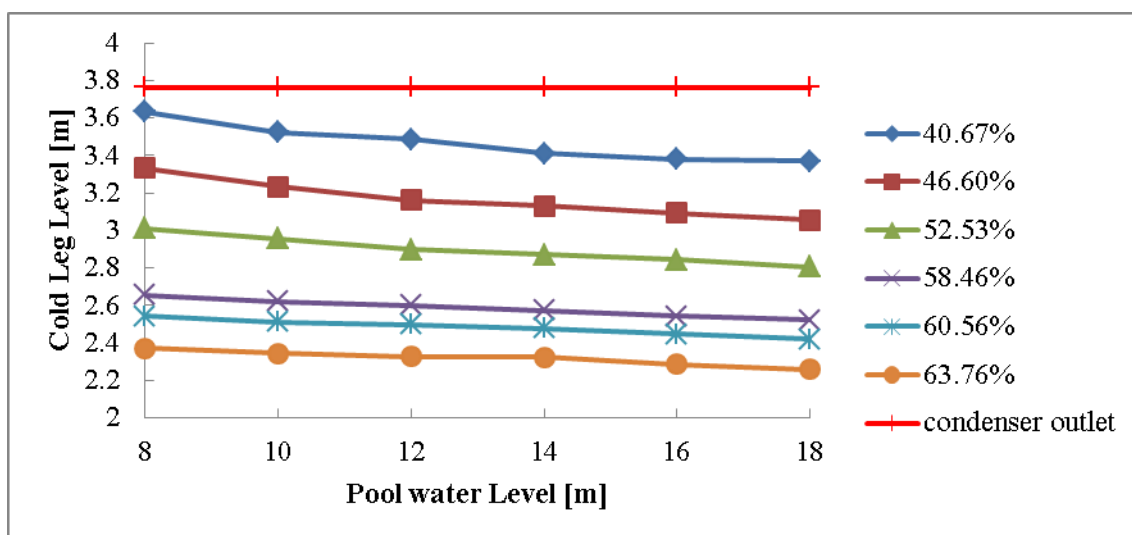


Figura 6.13: Livello di liquido nel ramo discendente

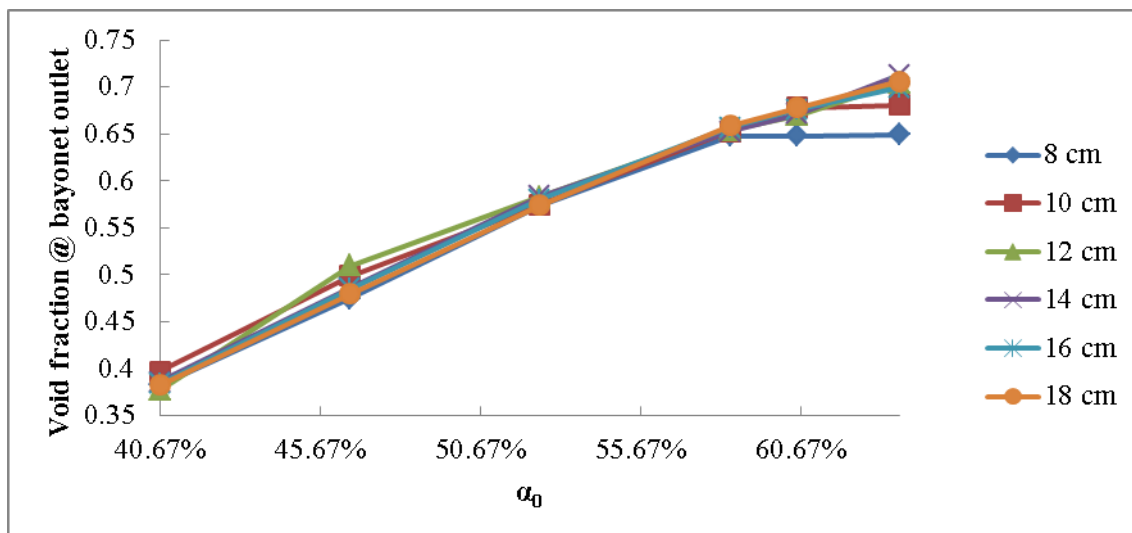


Figura 6.14: Grado di vuoto all'uscita della baionetta

7 Prove a freddo preliminari

La misura e la caratterizzazione delle cadute di pressione nella facility sperimentale ha grande importanza in particolare quando il sistema lavora in regime di circolazione naturale. Viste infatti le difficoltà collegate alla misura della portata, ad oggi la derivazione della portata a partire da misure di cadute di pressione pare la soluzione più fattibile.

7.1 Modifica della facility per le prove a freddo

Con lo scopo di eseguire prove a freddo della facility, il circuito è stato leggermente modificato con l’inserimento di un bypass all’uscita dello scambiatore di calore a baionetta per permettere il collegamento ad una pompa (Figura 7.1).

La pompa fa circolare acqua fredda nel circuito e la misura della caduta di pressione è effettuata in punti significativi del circuito.

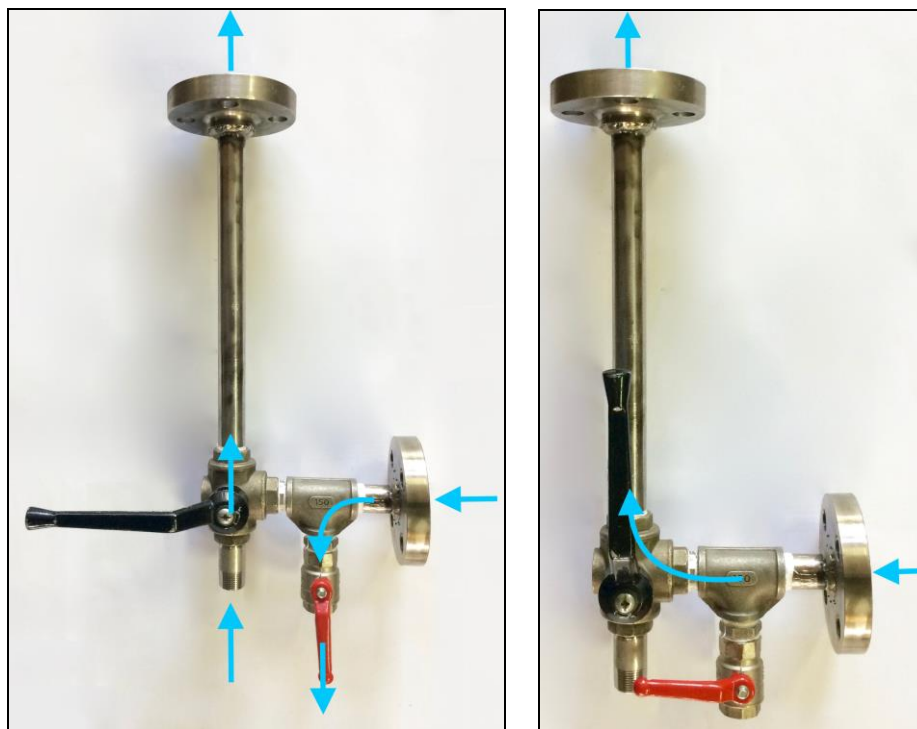


Figura 7.1: Foto del bypass in posizione aperta (sinistra) e chiusa (destra)

Mantenendo il bypass chiuso è possibile riempire il circuito con acqua; quando il circuito è completamente pieno il bypass viene aperto e la portata circolante è controllata con una valvola a sfera posta a monte dell’ingresso del bypass.

7.2 Risultati preliminari delle prove a freddo

Le cadute di pressione misurate nel circuito sono (Figura 7.2):

- Caduta di pressione nella gamba fredda (p_1-p_2)
- Caduta di pressione nella giunzione tra gamba fredda e gamba calda (p_2-p_3)
- Caduta di pressione nel condensatore e nella gamba calda (p_3-p_4)
- Caduta di pressione nella giunzione a T (p_4-p_5)
- Caduta di pressione nell'ingresso, nel downcomer e nella camera di inversione dello scambiatore di calore a baionetta (p_5-p_6)

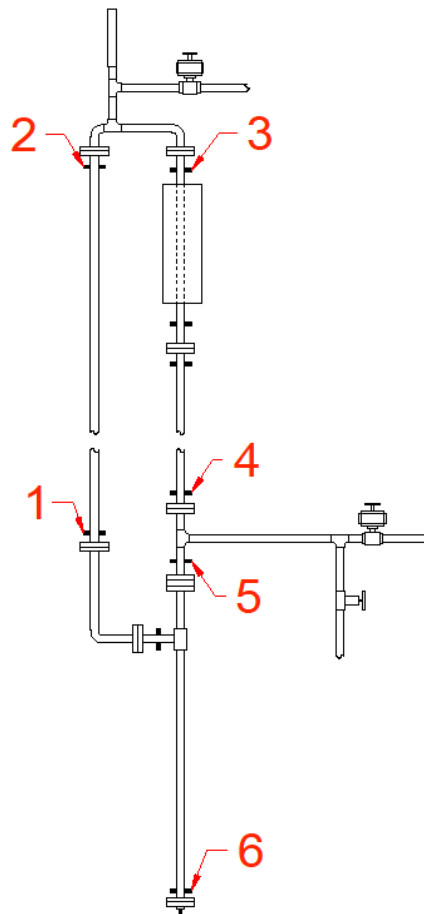


Figura 7.2: Numerazione utilizzata per le prese di pressione

I risultati sperimentali seguenti sono presentati senza banda di errore in quanto, per ragioni di tempo, il numero di misure sperimentali effettuate non consente l'analisi accurata degli errori.

In Figura 7.3 sono riportate le cadute di pressione relative alla gamba fredda, al tratto orizzontale di inversione tra gamba calda e gamba fredda, condensatore e gamba fredda e giunzione a T. Come si può osservare le cadute di pressione aumentano quadraticamente con la portata come da previsioni, con l'eccezione della caduta di pressione nella giunzione a T; infatti questo valore è molto piccolo ed è presente un incremento molto contenuto. Le cadute di pressione più significative si riscontrano nei tratti diritti (gamba calda e gamba fredda) a causa delle predite per attrito continuo. La caduta di pressione relativa al condensatore e alla gamba fredda è leggermente più bassa poiché la lunghezza di questo tratto è un po' più corta rispetto alla gamba fredda.

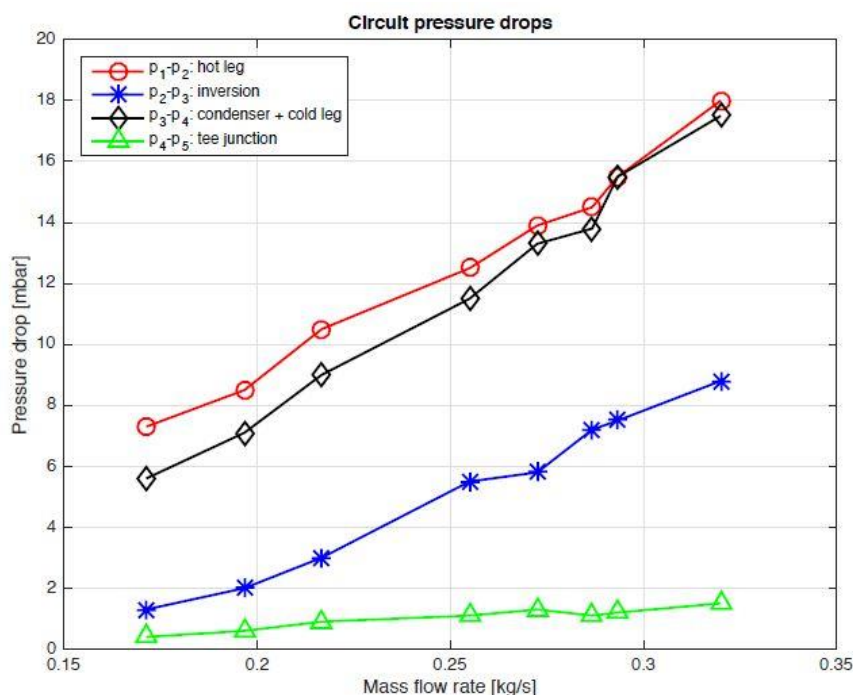


Figura 7.3: Cadute di pressione nel circuito: gamba calda, inversione, condensatore e gamba fredda, giunzione a T

La caduta di pressione nella giunzione a T è molto bassa, dunque sarà complicato misurarla nelle prove a piena potenza dato che la portata in massa dovrebbe essere di un ordine di grandezza più basso e in condizioni bifase; d'altro canto, la caduta di pressione nella gamba fredda dovrebbe rimanere grande abbastanza da permettere di misurarla e di usarla per provare a ricavare la portata in massa circolante nel circuito.

La Figura 7.4 riporta la caduta di pressione totale dell'ingresso nella baionetta, del downcomer e dalla camera di inversione. Come si può constatare, i valori associati sono di un ordine di grandezza più grandi di quelli visti precedentemente, fornendo una misura più semplice e precisa con minori oscillazioni. Come da aspettative, la maggior caduta di pressione è localizzata nello scambiatore a

baionetta dal momento che i diametri in gioco sono minori e le perdite localizzate sono maggiori, in particolare all'ingresso (riduzione della sezione di passaggio) e nella camera di inversione.

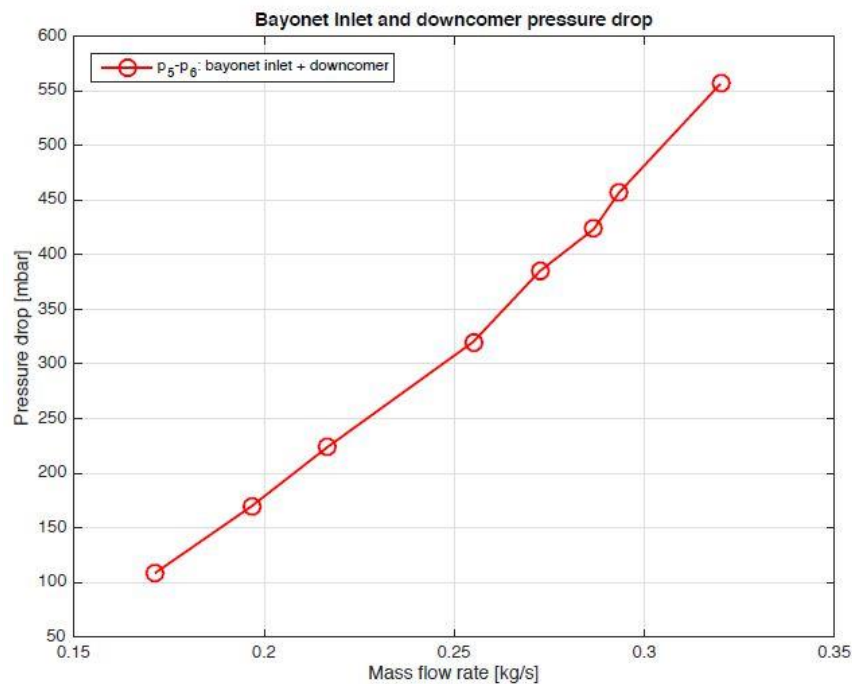


Figura 7.4: Caduta di pressione nell'ingresso alla baionetta, downcomer e camera di inversione

Nella Figura 7.5 sono riportate le cadute di pressione per unità di lunghezza associate alla gamba calda, al condensatore e alla gamba fredda. Come si può osservare, i valori sono molto simili come ci si poteva aspettare. Per tutti i punti misurati, la caduta di pressione per unità di lunghezza relativa alla gamba calda è leggermente più bassa poiché tra condensatore e gamba fredda è presente un collegamento effettuato tramite flange che aumenta leggermente la caduta di pressione.

In Figura 7.6 si possono osservare i fattori di attrito calcolati per la gamba calda e la gamba fredda a partire dalle misurazioni delle cadute di pressione. I valori sono prossimi a 0.03 che è in accordo con il valore ricavato dal diagramma di Moody. Inoltre, come ci si aspettava, il fattore di attrito diminuisce all'aumentare della portata in massa circolante.

In conclusione, i risultati mostrano che la caduta di pressione più significativa del circuito è associata allo scambiatore di calore a baionetta. I test preliminari a freddo sono stati molto importanti per calibrare e ottimizzare gli strumenti di misure per le cadute di pressione e per valutare quali valori si prevede siano grandi a sufficienza da poter essere misurati anche durante le prove a caldo.

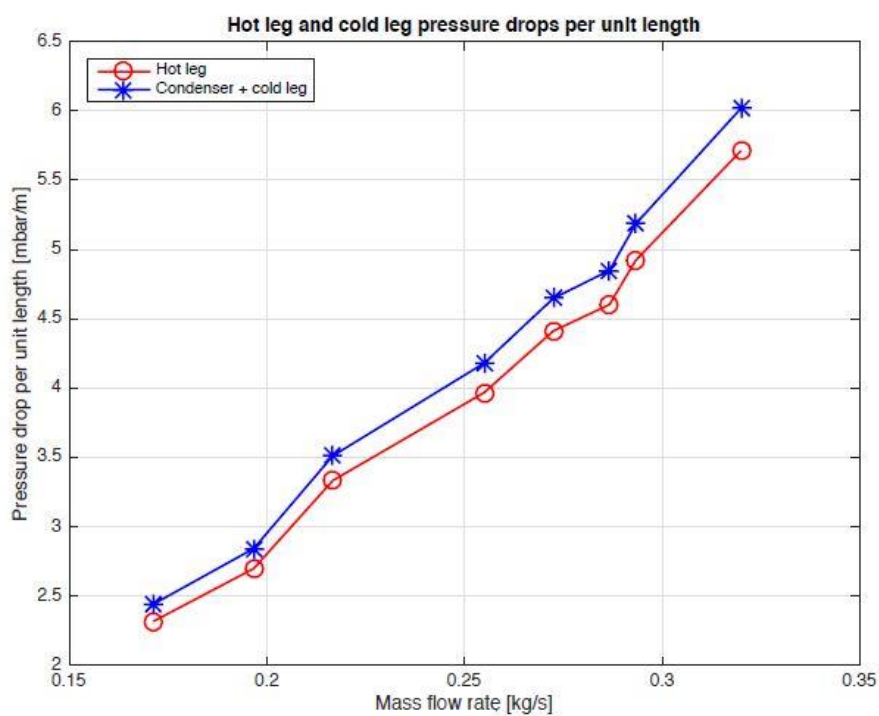


Figura 7.5: Caduta di pressione per unità di lunghezza nella gamba fredda e nella gamba calda

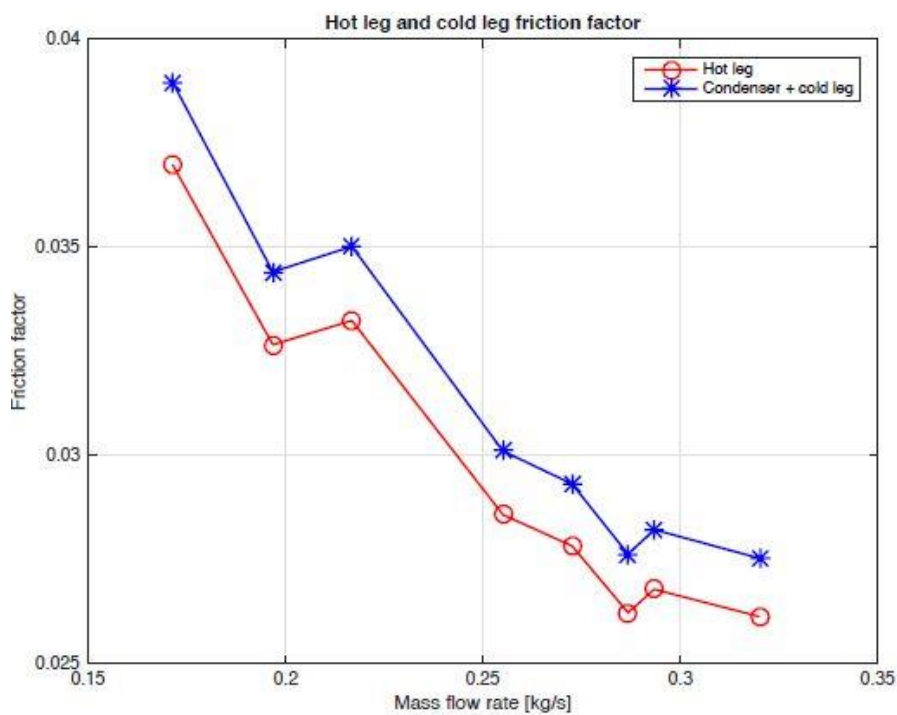


Figura 7.6: Fattore di attrito nella gamba fredda e nella gamba calda



8 Conclusioni e lavori futuri

Nel periodo tra gennaio e luglio 2016, presso il dipartimento Energia del Politecnico di Torino, è stata progettata, ottimizzata e realizzata una facility sperimentale per lo studio dei sistemi passivi per la rimozione del calore che operano in circolazione naturale. L'apparecchiatura sperimentale è stata ispirata dal sistema di rimozione del calore di decadimento DHR2 del reattore di quarta generazione raffreddato a piombo liquido ALFRED.

I componenti più significativi sono uno scambiatore di calore a baionetta che è la sorgente termica del circuito ed un condensatore che rappresenta il pozzo termico.

Il comportamento transitorio della facility, così come un'analisi di sensitività sui parametri liberi del sistema (massa d'acqua iniziale e livello d'acqua lato mantello nel condensatore), sono stati simulati e studiati utilizzando il codice di sistema termoidraulico RELAP5 3D. Le simulazioni sono state realizzate fissando il livello d'acqua nel condensatore e la massa d'acqua iniziale nel sistema o la pressione massima ammissibile. Entrambe le soluzioni portano a risultati concordanti. Il modello utilizzato è stato progressivamente raffinato per permettere una maggiore aderenza al comportamento del sistema fisico reale.

I risultati numerici mostrano come per ogni pressione operativa (o massa d'acqua iniziale), esiste uno specifico range entro il quale deve trovarsi il livello d'acqua nel condensatore lato mantello per avere in condizioni stazionarie il sistema in condizione bifase liquido-vapore. Complessivamente la facility rimuove la potenza termica fornita come da aspettative; la criticità maggiore emersa dalle simulazioni riguarda la misura della portata il cui valore è molto piccolo (ordine di grandezza $10^{-2} \div 10^{-3}$ kg/s).

Con l'obiettivo di tarare la strumentazione convenzionale (termocoppie e misuratori di pressione) e valutare la possibilità di misurare la portata circolante a partire da misure di caduta di pressione, il circuito è stato parzialmente modificato con l'aggiunta di un bypass all'uscita dello scambiatore a baionetta per permettere l'inserimento di una pompa. Numerose misure sono state compiute a valori di portata dell'ordine di 10^{-1} kg/s, mostrando come la caduta di pressione nel downcomer dello scambiatore a baionetta sia l'unica potenzialmente utilizzabile per ricavare la portata in regime di circolazione naturale. Ulteriori analisi devono essere compiute per valutarne la fattibilità e sviluppare l'eventuale metodologia di scalatura.



Terminata questa fase di prove a freddo si inizieranno le prove a piena potenza del circuito in cui, con l’ausilio di una matrice sperimentale, verrà studiato il regime di circolazione naturale che si instaurerà nel sistema. I risultati ottenuti verranno inoltre utilizzati per la validazione del codice di calcolo RELAP5 3D con particolare attenzione al componente del condensatore che contiene una piscina a pelo libero e che è stato il più complesso da modellizzare con aderenza alla realtà fisica del sistema.

Utilizzando i dati sperimentali raccolti ed i risultati delle simulazioni numeriche si intendono validare le leggi di scalatura che permettono di passare dai sistemi sperimentali a taglia ridotta ai sistemi reali a taglia commerciale.

In futuro si vorrebbe applicare questa metodologia progettuale ad altri sistemi per la rimozione ed il trasporto della potenza termica con particolare attenzione all’analisi di scambiatori di calore compatti che trovano applicazioni negli Small Modular Reactors (SMR).



Riferimenti bibliografici

- [1] International Atomic Energy Agency, «Safety related terms for advanced nuclear reactors - IAEA-TECDOC-626» Vienna, 1991.
- [2] Generation IV International Forum, «A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems», 2002.
- [3] «Progetto LEADER - Lead-cooled European Advanced DEMonstration Reactor» [Online]. Available: <http://www.leader-fp7.eu/>.
- [4] A. Alemberti, G. Villabruna, P. Agostini, G. Grasso, I. Turcu e M. Constantin, «ALFRED and the FALCON Consortium».
- [5] Ansaldo Nucleare, «Future of LFR in Europe: the ALFRED Reactor», 2014.
- [6] L. Damiani, M. Montecucco and A. Pini Prato, «Conceptual design of a bayonet-tube steam generator for the ALFRED lead-cooled reactor» Nuclear Engineering and Design, pp. 154-163, 2013.
- [7] M. Caramello, M. Gregorini, M. De Salve, C. Bertani, A. Alemberti and B. Panella, «Thermal hydraulic analysis of ALFRED bayonet tube steam generator» in Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP) 2015, Nizza (Francia), 2015.
- [8] Ansaldo Nucleare, «Conceptual design of the DHR system of the ETDR (ALFRED)» 2011.
- [9] Ansaldo Nucleare, «Task 3.5 - DHR system conceptual design of the ALFRED».
- [10] Ansaldo Nucleare, «Task 3.5 - DHR system conceptual design of the ETDR (ALFRED)».
- [11] Ansaldo Nucleare, «Sistema e metodo di scambio termico con regolazione passiva della quantità di calore asportata». Brevetto MI2013A001779, 2014.
- [12] Ansaldo Nucleare, «Review and justification of the main design options of the LFR reference plant» 2012.



- [13] A. Alemberti, M.L. Frogheri, S. Hermsmeyer, L. Ammirabile, V. Smirnov, M. Takashi, C.F. Smith, Y. Wu e I.S. Hwang, «Lead-cooled Fast Reactor (LFR) Risk and Safety Assessment White Paper», 2014.
- [14] C. Bertani, M. De Salve, M. Caramello, N. Falcone, A. Bersano e B. Panella, «Preliminary numerical studies of an experimental facility for heat removal in natural circulation», in Proceedings of 34th UIT Heat Transfer Conference, Ferrara (Italia), 2016.



Breve curriculum gruppo di lavoro

Il gruppo di lavoro impegnato nell'attività è costituito da un professore senior (Bruno Panella), un professore ordinario (Mario De Salve), un ricercatore confermato e professore aggregato (Cristina Bertani), un dottorando (Marco Caramello), un borsista di ricerca (Nicolò Falcone) ed un tesista (Andrea Bersano).

Panella, De Salve e Bertani lavorano da numerosi anni al Politecnico nel campo della Ingegneria nucleare, con particolare riferimento alla termoidraulica e alla sicurezza e hanno portato avanti molte ricerche sperimentali nel laboratorio di termoidraulica del Dipartimento di Energetica (ora Dipartimento Energia) del Politecnico di Torino, pubblicando i risultati su riviste internazionali o in atti di Congresso nazionali e internazionali. Sono anche autori di diversi rapporti nell'ambito dei PAR precedenti.

Marco Caramello, nell'ambito del dottorato, svolge attività di ricerca nella simulazione con codici di sistema (RELAP) dei sistemi di rimozione della potenza degli impianti nucleari con sistemi passivi ed attivi. E' attivo anche nella ricerca sperimentale nel contesto della termo fluidodinamica bifase. E' coautore di articoli presentati a Congressi nazionali e internazionali e proposti a riviste internazionali.

Falcone è laureato in Ingegneria Energetica e Nucleare ed è borsista di ricerca da gennaio 2016 presso il dipartimento Energia.

Bersano è laureato in Ingegneria Energetica e Nucleare.

Maggiori dettagli e l'elenco delle pubblicazioni si possono trovare nella rubrica del sito Web del Politecnico di Torino (<http://www.polito.it>).