



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Specifica di prova per la caratterizzazione in regime transitorio del sistema DHR prototipico

L. Cinotti, M. Tarantino, P. Gaggini

Report RdS/2012/055

SPECIFICA DI PROVA PER LA CARATTERIZZAZIONE IN REGIME TRANSITORIO DEL SISTEMA DHR PROTOTIPICO

L. Cinotti – MERIVUS, M. Tarantino, P. Gaggini - ENEA

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

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

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Titolo

Specifica di prova per la caratterizzazione in regime transitorio del sistema DHR prototipico.

Descrittori

Tipologia del documento: Specifica tecnica di componente
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca “Nuovo nucleare da fissione”
Argomenti trattati: Tecnologia dei metalli liquidi
 Termoidraulica dei reattori nucleari
 Scambio del calore
 Generation IV Reactors

Sommario

Il documento descrive lo scambiatore di calore immerso in piombo denominato W(ater)-D(ecay)H(eat)R(emoval) installato nell’impianto CIRCE in configurazione di prova ICE, e le ulteriori prove di funzionamento da effettuare tenendo presente le caratteristiche di ICE, i risultati sperimentali già disponibili a seguito della prima campagna sperimentale e la funzione del componente per l’evacuazione della potenza residua nell’ambito della filiera LFR.

Note

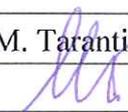
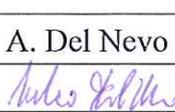
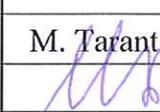
Report in collaborazione con M.E.Rivus Srl

Autori

 L. Cinotti (MERIVUS)
 M. Tarantino, P. Gaggini (ENEA)

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	18/09/2012	NOME	M. Tarantino	A. Del Nevo	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 038	0	L	2	15

Sommario

1. SCOPO	3
2. Concezione dei sistemi di evacuazione del calore residuo dei LFR.....	3
3. Lo scambiatore W-DHR.....	5
3.1. Circuiti di carico e scarico del secondario e dell'intercapedine	7
3.2. Strumentazione dello scambiatore	7
4. Analisi dei risultati disponibili	8
5. Elenco delle prove	11
5.1. Prima serie di prove.....	11
5.2. Seconda serie di prove	12
5.3. Terza serie di prove	12
5.4. Matrice di prova.....	14

1. SCOPO

Il W-DHR è un componente sviluppato a livello concettuale nel corso del progetto ELSY del 6° PQ della Comunità Europea come scambiatore immerso in piombo del circuito W-DHR1 per l'evacuazione della potenza residua.

E' costituito da un fascio di tubi a baionetta immerso in un bagno di piombo fuso. Ciascun tubo a baionetta è costituito da:

- un tubo esterno cieco all'estremità inferiore: il 'tubo in Pb'
- un tubo intermedio ugualmente cieco: il 'tubo in He'
- un tubo interno di adduzione dell'acqua di alimento: il 'tubo in acqua'.

Data la grande affidabilità riconosciuta al componente, ENEA ne ha realizzato un prototipo per utilizzarlo in CIRCE, come pozzo freddo nell'ambito del progetto ICE.

Al termine della campagna di prove previste dal progetto ICE, vi è l'opportunità di provare il W-DHR nelle condizioni di funzionamento previste per il sistema W-DHR1 che si differenziano significativamente da quelle già realizzate nel progetto ICE, ad esempio perché la circolazione lato piombo durante l'evacuazione della potenza residua è naturale anziché in forzata come in ICE.

La possibilità di effettuare una campagna di prova e nelle condizioni tipiche dell'evacuazione di potenza di decadimento era già stata prevista a livello preliminare durante la fase di progetto del W-DHR.

Il seguente documento ha lo scopo di riproporre le specifiche di esercizio e prova del W-DHR tenendo conto dell'aggiornamento delle condizioni operative del W-DHR1 avvenute durante l'evoluzione dei progetti LFR, della configurazione del W-DHR e della sua strumentazione come costruito, della configurazione in cui il W-DHR è inserito in CIRCE e dei risultati delle prove ICE già effettuate.

2. Concezione dei sistemi di evacuazione del calore residuo dei LFR.

Nel progetto europeo ELSY sono stati adottati tre distinti sistemi di evacuazione della potenza residua:

- il Reactor Vessel Air Cooling System (RVACS) che si basa sul trasferimento ad un circuito aria in circolazione naturale del calore trasmesso per irraggiamento dalla superficie esterna del vessel;
- circuiti W-DHR1 (Water-Decay Heat Removal) funzionanti con acqua stoccata all'interno dell'edificio reattore e muniti di scambiatore acqua-piombo immerso in piombo "dip cooler" (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)
- circuiti W-DHR2 funzionanti con acqua stoccata all'esterno dell'edificio reattore e connessi ai circuiti acqua-vapore principali e muniti di condensatore di vapore

Il RVACS è un sistema molto semplice ed affidabile, ma nel caso del progetto ELSY che è un reattore di grande taglia, le prestazioni del RVACS sono sufficienti solo nel lungo termine e nel breve tempo è necessario far ricorso anche a sistemi aggiuntivi che, data la relativa compatibilità del piombo con aria ed acqua, possono essere basati sul trasferimento del calore all'aria atmosferica od ad acqua stoccata in centrale.

Benché ambedue i sistemi W-DHR1 ed W-DHR2 di ELSY ricorrano all'acqua come pozzo freddo sono tra loro ben diversi:

- il W-DHR1 è molto affidabile, ma occupa dello spazio sul tetto reattore ed

all'interno del sistema primario ed in una configurazione d'impianto a tanca interna cilindrica, può funzionare solo quando la finestra di uscita piombo dal generatore di vapore si situa ben al di sopra della mezzeria della parte attiva del nocciolo (Figura 2).

- Il W-DHR2 non presenta l'inconveniente del precedente, ma è meno affidabile perché i circuiti secondari per la loro complessità sono normalmente poco affidabili, perché richiedono la perfetta chiusura di valvole d'isolamento operanti ad alta pressione, perché richiedono la perfetta chiusura di altre valvole dopo la loro apertura per scarico del vapore in eccesso. Il generatore di vapore deve inoltre operare a bassissima portata in un campo ben diverso da quello del suo normale funzionamento ed è improbabile che tutti i tubi possano essere alimentati in contemporanea. Altro inconveniente è la necessità di tempestiva individuazione del GV incidentato da depressurizzare in caso di Steam Generator Tube Rupture Accident (SGTRA) perché non è ammissibile lo svuotamento contemporaneo di tutti i generatori di vapore. La rinuncia all'utilizzo dei circuiti secondari per l'evacuazione del calore residuo permetterebbe invece, in caso di SGTRA, di effettuare indistintamente la depressurizzazione di tutti i circuiti secondari a fronte di un segnale di aumento della pressione o del tenore di vapore del gas di copertura del reattore.

Per quanto sopra esposto è pertanto necessario ottimizzare e qualificare un sistema compatto del tipo W-DHR1 e, per diversificazione, l'individuazione di una soluzione alternativa al W-DHR2.

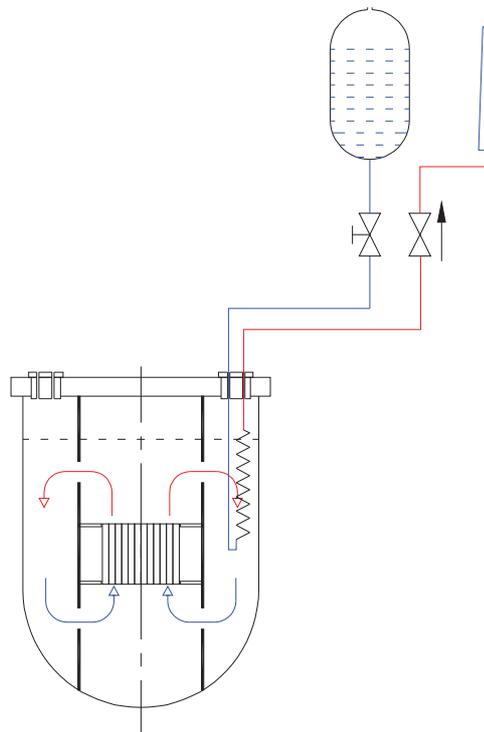


Figura 1 Schema semplificato del circuito WDHR1 di ELSY

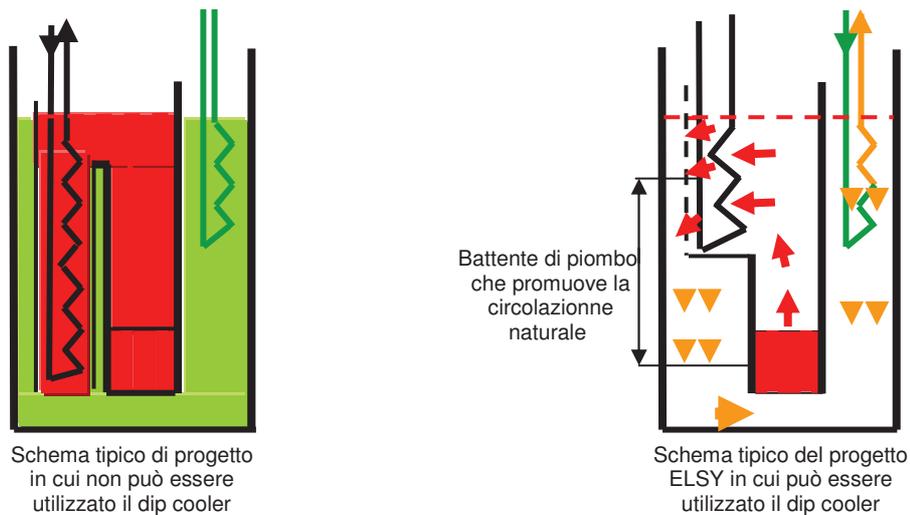


Figura 2. Schemi del sistema primario di impianti LFR

3. Lo scambiatore W-DHR

Per lo scambiatore W-DHR (dip cooler) è importante la compattezza perché occupa una superficie utile sul tetto del reattore ed al contempo deve essere molto affidabile data la sua funzione di sicurezza.

Per l'affidabilità è evidente l'interesse verso una soluzione come quella sviluppata in ELSY caratterizzata da una doppia parete metallica, con intercapedine riempita in elio, interposta tra il primario ed il secondario negli elementi di scambio termico dello scambiatore immerso (Figura 3). In tal modo si ottiene una barriera costituita da due pareti meccanicamente indipendenti, ciascuna delle quali dimensionata per resistere da sola ai carichi imposti. Il riempimento dell'intercapedine in elio fornisce un mezzo di monitoraggio in continuo dell'integrità di ciascuna delle due pareti. La scelta del gas di sbarramento risponde a due criteri: minimizzazione della penalizzazione delle prestazioni termiche (alta conducibilità dell'elio) da una parte, e dall'altra massimizzazione della sensibilità alle fughe determinate da danneggiamento in servizio di una o l'altra delle due pareti metalliche. La maggior parte del gradiente termico si situa nell'intercapedine in elio limitando fortemente i carichi termici sul componente.

Nonostante la resistenza termica offerta dal gap di elio, lo scambiatore resta compatto grazie all'importante differenza di temperatura tra piombo ed acqua in ebollizione a bassa pressione. Gli elementi di scambio termico del dip cooler e le valvole di isolamento del W-DHR1 lato acqua e lato vapore assicurano la funzione di contenimento analogamente ai tubi del generatore di vapore e le valvole di isolamento dei circuiti secondari. La doppia parete sugli elementi di scambio rafforza la funzione di contenimento tra sistema primario ed esterno, inoltre le valvole di isolamento del W-DHR1 sono normalmente chiuse e vengono aperte in funzione DHR solo se la pressione di elio assicura l'integrità delle due barriere degli elementi di scambio del W-DHR1

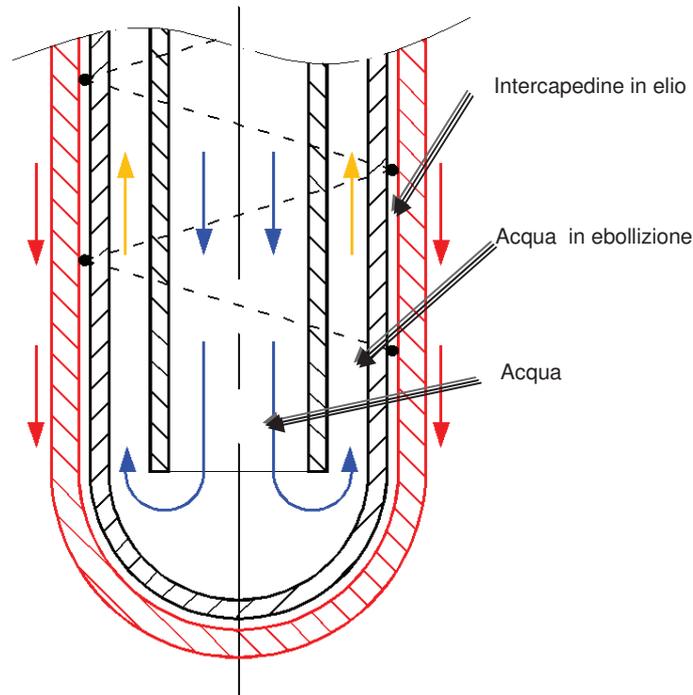


Figura 3 Schema di un elemento scambiante a tre pareti del dip-cooler del WDHR

Il circuito secondario dello scambiatore è alimentato da una riserva d'acqua disponibile in centrale che deve supplire in condizioni di sicurezza all'evacuazione della potenza residua senza richiedere il reintegro di acqua dall'esterno della centrale. Per questa ragione, e quindi per minimizzare il consumo d'acqua di raffreddamento, è opportuno massimizzare la frazione di acqua che viene vaporizzata all'interno dello scambiatore e fornirne una verifica sperimentale su modello. L'acqua del W-DHR1 sarà stoccata in centrale ad una trentina di metri al di sopra del livello del dip cooler permettendone quindi l'alimentazione per gravità. Lo scambiatore realizzato da ENEA per ICE si presta bene ad una prima qualifica di un componente da utilizzare su un sistema LFR, sia per il tipo e geometria degli elementi di scambio, che per il disegno del dip cooler, che per l'installazione all'interno di CIRCE.

Gli elementi di scambio hanno le seguenti caratteristiche geometriche (Figura 4):

- Tubo esterno (in Pb): 25.4 mm X 2.11 mm;
- Tubo intermedio (in Elio) 19.05 mm X 2.11 mm;
- Tubo interno (in Acqua): 12.7 mm X 3.404;
- Gap Elio: 1.07 mm
- Lunghezza Immersa Tubi: 3450 mm
- Diametro orifizio tubo acqua: 1 mm

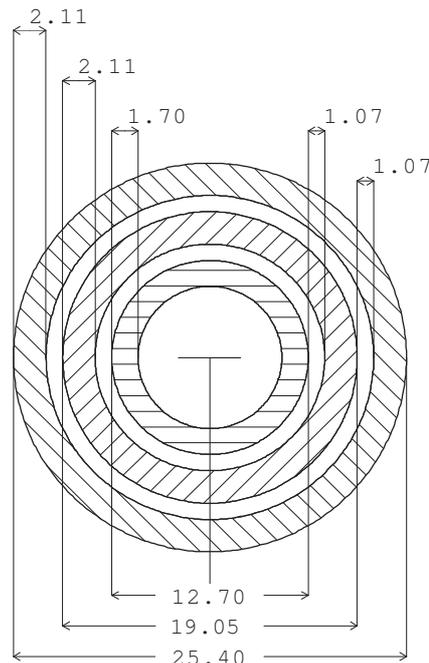


Figura 4. Geometria dell'elemento scalda a tre pareti del dip-cooler del WDHR

Lo scambiatore è costituito da 91 elementi di scambio disposti al passo di 31 mm con reticolo esagonale.

3.1. Circuiti di carico e scarico del secondario e dell'intercapedine

L'alimentazione in acqua dello scambiatore è effettuata tramite l'acqua del Centro Brasimone disponibile alla pressione massima di 6 barg. Il circuito di scarico è costituito da una tubazione di diametro 168 mm funzionante a pressione atmosferica, che conduce ad un serbatoio dove avviene la separazione tra l'acqua ed il vapore prodotto. Il vapore viene scaricato all'atmosfera e l'acqua inviata in sentina.

Tali circuiti sono strumentati (con registrazione continua dei segnali) come minimo con le misure seguenti:

- a) portata, pressione e temperatura dell'acqua all'ingresso dello scambiatore;
- b) sovrappressione all'uscita dello scambiatore (sulla testata) determinata dalle perdite di carico rispetto all'atmosfera;
- c) temperatura del vapore prodotto.

L'intercapedine è mantenuta ad una pressione in He di 4 barg tramite un pressurizzatore di cui sarà monitorato l'eventuale decadimento di pressione.

3.2. Strumentazione dello scambiatore

Il coefficiente di scambio termico tra il flusso di acqua-vapore in salita nello spazio anulare e la parete metallica del tubo intermedio (immerso in elio) è fortemente dipendente dal regime di flusso bifase e dal regime di ebollizione. Esso è molto elevato in regime di ebollizione nucleata (bassi titoli) e molto basso in regime di flusso a nebbia con asciugatura della parete metallica. La transizione, detta anche crisi termica o Departure from Nucleate Boiling (DNB),

tra i due regimi è nota per essere improvvisa ed è funzione di numerosi parametri. Come risultato si determinano delle forti variazioni di temperatura lungo l'asse del tubo. Inoltre la quota alla quale avviene la transizione può subire oscillazioni nel tempo, e ciò può determinare un cimento termomeccanico elevato.

Questi fenomeni sono stati tenuti in conto per via teorica durante la progettazione dello scambiatore, ma si intende ottenere una misurazione sperimentale degli stessi e una verifica delle teorie adottate.

A tale scopo sono installate delle termocoppie su tre tubi dello scambiatore. Esse sono delle termocoppie di superficie, accostate alla parete esterna del tubo intermedio, e posizionate nell'interstizio in elio.

Ogni tubo comporta cinque termocoppie, posizionate alle quote sottoindicate, con riferimento alla quota nominale del pelo libero di piombo.

Tubo 1: -500,-750,-1000,-1250,-1500 mm

Tubo 2: -1000,-1050,-1100,-1150,-1200 mm

Tubo 3: -1100,-1120,-1140,-1160,-1180

I tubi strumentati appartengono al gruppo centrale di sette tubi.

La proposta di posizionamento è determinata da un lato dall'incertezza sulla quota a cui avviene la transizione e dall'altro dalla necessità di cogliere gradienti elevati su altezze limitate.

L'idea è quella di individuare in una prima fase la quota della transizione tramite il primo tubo e poi di posizionarla nell'ambito del secondo e poi del terzo tubo variando opportunamente le condizioni di prova, in particolare la portata di acqua.

4. Analisi dei risultati disponibili

La potenza evacuata non è direttamente rilevabile perché non è misurato il titolo del vapore in uscita dal W-DHR. In figura 5 è riportata la potenza dello scambiatore ottenuta sulla base di misure di temperatura del LBE in uscita dallo scambiatore, valore poco attendibile a causa della diversa velocità in corrispondenza delle varie misure di temperatura. Poiché le temperature in ingresso ed uscita scambiatore diminuiscono leggermente durante il periodo di prova, si può conservativamente affermare che la potenza evacuata dal W-DHR è uguale alla differenza tra potenza elettrica e fughe termiche e che quindi si assesta attorno a 500-550 kW per una portata di acqua di circa 0,35 kg/s (Figura 6), valore di portata per il quale la potenza ottenuta sperimentalmente è superiore alla potenza di 450 kW prevista a progetto (Figura 7).

I risultati sperimentali confermano che con una portata di acqua di 0,35 kg/s lo scambio avviene in condizioni di crisi termica coerentemente con la soglia di crisi termica prevista in fase progetto a 0,42 kg/s.

Risultato di particolare rilievo è che l'andamento dei transitori termici è relativamente regolare e con frequenza piuttosto bassa di circa uno al minuto.

Il componente è stato esercito in regime di instabilità senza perdita di tenuta all'elio.

La bassa frequenza riduce l'impatto meccanico sui tubi, mentre il fenomeno resterebbe sicuramente molto più gravoso a livello della connessione tra tubo intermedio e piastra tubiera. Non vi è alcuna evidenza però, che durante la pregressa campagna di prove, del vapore surriscaldato abbia raggiunto il livello della piastra tubiera. Inoltre, anche in caso di formazione di vapore surriscaldato, il ponte termico con il tubo interno in acqua nel tratto fuori piombo, contribuirebbe fortemente a ridurre detto grado di surriscaldamento.

Sarebbe pertanto di particolare interesse poter aggiungere delle termocoppie per la misura

della temperatura acqua-vapore all'uscita dai relativi tubi di scambio.

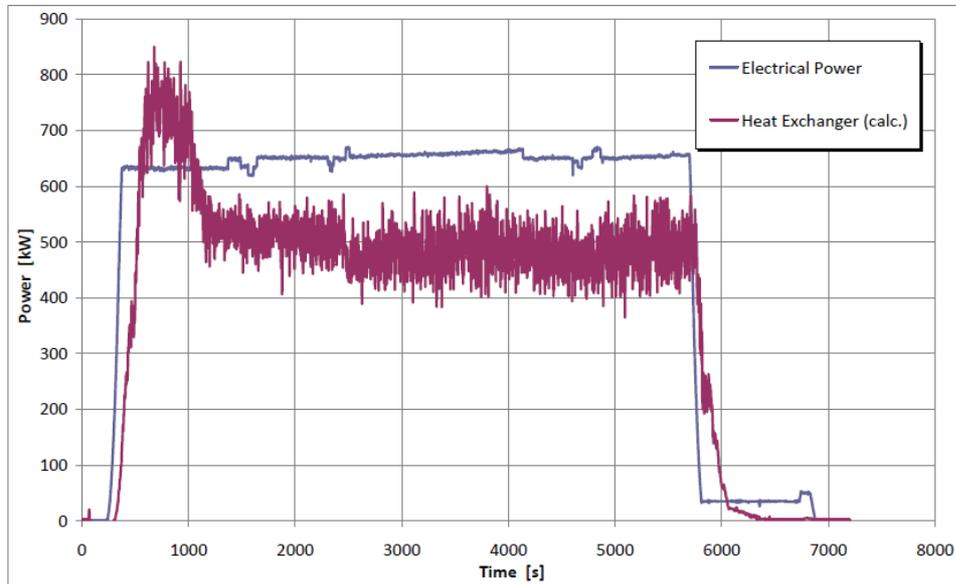


Figura 5. andamento della potenza elettrica e della potenza del W-DHR calcolata sulla base della distribuzione di temperatura del LBE in uscita.

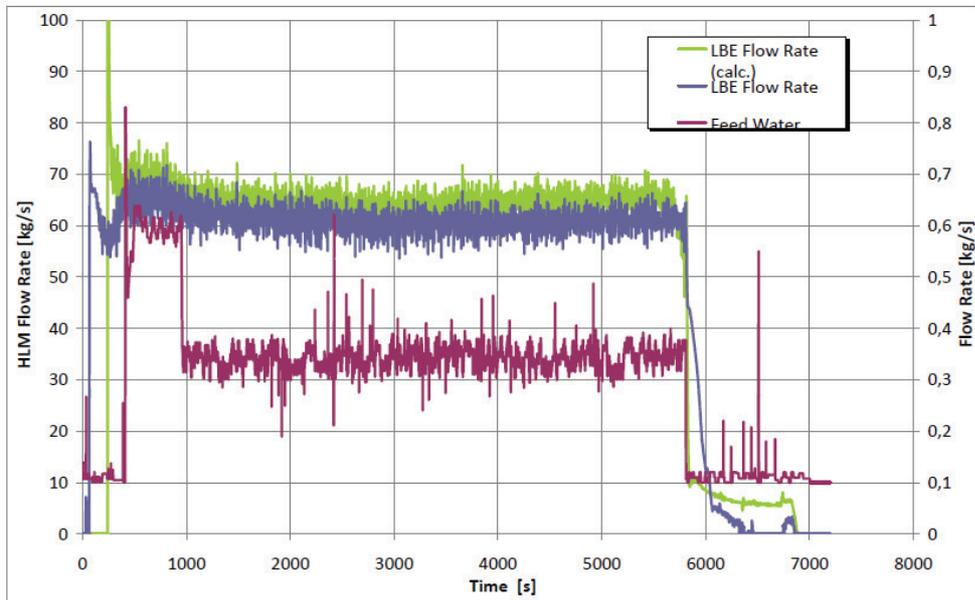


Figura 6. andamento della portata LBE e acqua

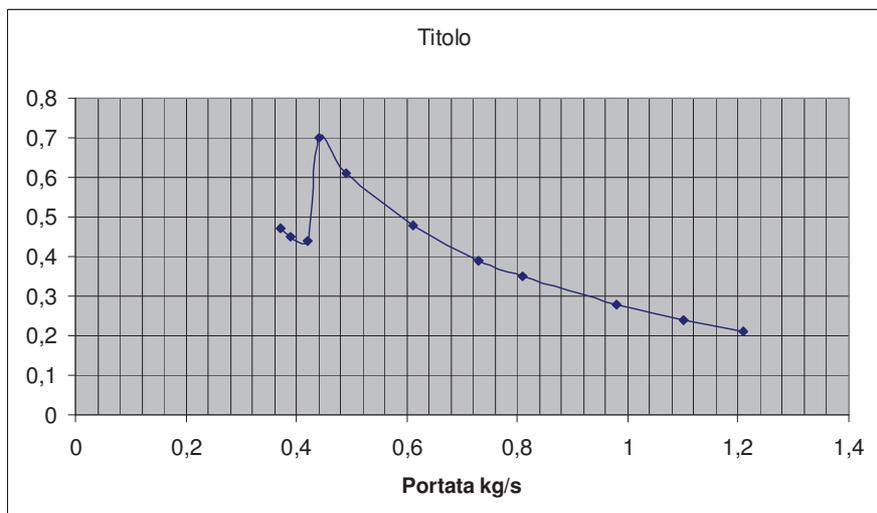
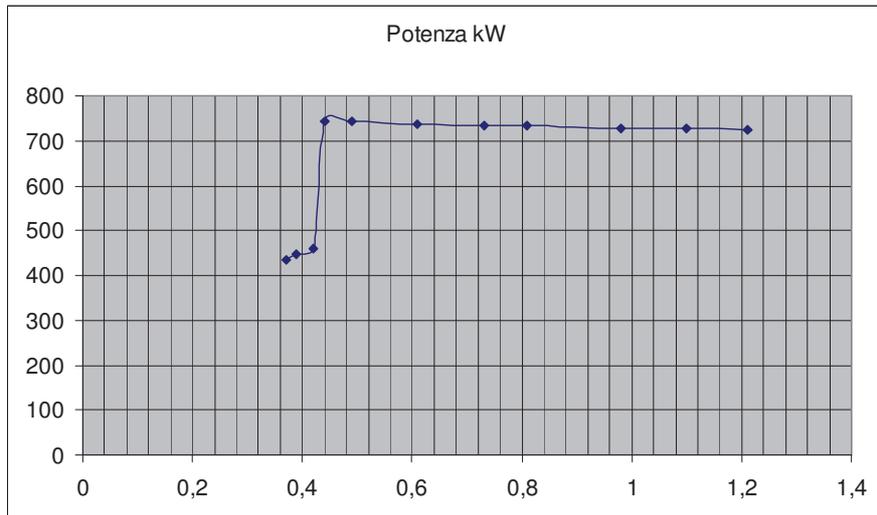
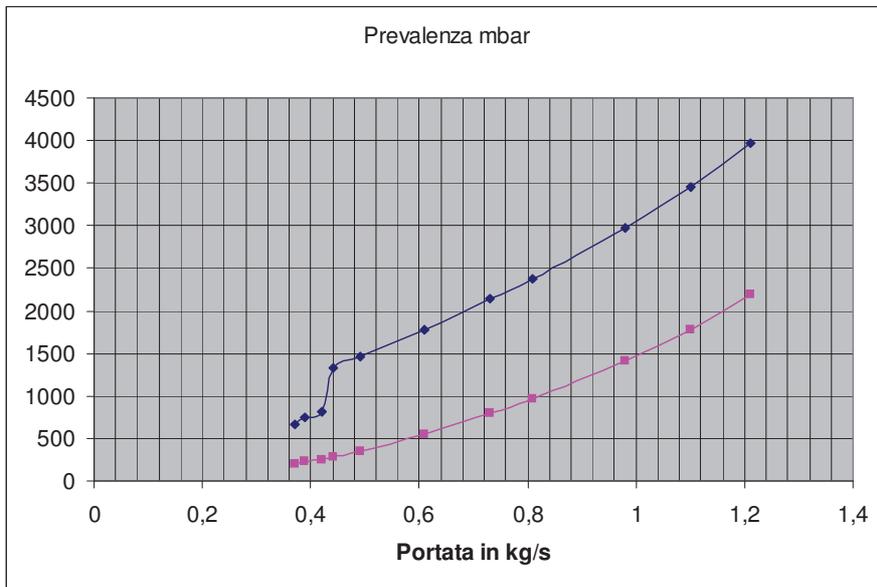


Figura 7. Correlazione a progetto tra portata acqua, perdita di carico e potenza del dip cooler

5. Elenco delle prove

Le prove hanno dimostrato il corretto dimensionamento funzionale, ma hanno anche confermato il raggiungimento della crisi termica al di sotto di una soglia di portata.

Inoltre le prove sono state fatte a circolazione forzata o naturale in accoppiamento col nocciolo, mentre la portata del W-DHR1 nel reattore è disaccoppiata da quella del nocciolo (ovvero sono diverse) mentre nello schema ICE sono forzatamente uguali.

Per una migliore comprensione del funzionamento di un tale tipo di componente sono da prevedere tre serie di prove aggiuntive con strumentazione aggiuntiva e con modifiche all'attuale configurazione ICE.

5.1. Prima serie di prove

Prima dell'effettuazione delle prove è necessario introdurre alcune termocoppie nel corpo del dip cooler per la misura della temperatura di uscita vapore da tubi posti a diverse posizioni radiali, preferibilmente anche dai tubi strumentati A, B e C.

La prima serie di prove consiste nella ricerca della zona di stabilità termoidraulica del componente e di eventuali condizioni per cui le sollecitazioni termiche saranno limitate alla parte corrente del fascio senza produrre eccessivi carichi termici nel collegamento dei tubi intermedi alla corrispondente piastra tubiera.

Le prove saranno effettuate in circolazione forzata con potenza iniziale nocciolo di circa 800 kW al netto delle fughe termiche e modulata (ridotta) sulla potenza del W-DHR per mantenere la temperatura d'ingresso allo scambiatore prossima ai 400°C.

La portata d'acqua allo scambiatore (prova n°1) verrà ridotta a partire dal valore di 0,7 kg/s per gradini di 0,025 kg/s. Ogni valore verrà mantenuto per un tempo sufficiente a confermare la stabilità dello stato di funzionamento (circa 10 minuti). Al raggiungimento dell'instabilità si procederà a progressive aumenti di portata per gradini di 0,01 kg/s fino al ritrovamento della stabilità (variazione ciclica di temperatura sulle termocoppie installate sui tubi inferiore indicativamente a 10°C).

A partire dalla portata di instabilità determinata al punto precedente, la portata d'acqua (prova n°2) sarà ridotta ancora per gradini di 0,025 kg/s (e mantenuta per circa 5 min per ogni gradino) fino all'apparire di instabilità a livello delle temperature di uscita vapore e ridotta ulteriormente fino in prossimità dell'azzeramento per verificare l'attenuazione delle variazioni di temperatura tra le letture sulle termocoppie dei tubi strumentati B e C e le TC1, TC2 e TC3 del tubo strumentato A, rispetto alle letture sulle termocoppie T4 e T5 del tubo strumentato A ed a livello dell'uscita vapore per effetto del ponte termico col tubo interno di mandata acqua. L'obiettivo della prova è di verificare la possibilità di ridurre la portata d'acqua fino ad un valore tale da ottenere vapore saturo secco o leggermente surriscaldato in uscita con sollecitazioni termiche accettabili per il componente.

Una tale possibilità sarebbe estremamente utile dal punto di vista progettuale per controllare la potenza estratta dal reattore e ridurre il consumo di acqua nel medio-lungo termine quando la potenza da asportare è ridotta. Ovviamente non è evidente che una tale condizione di funzionamento esista perché a basse portate l'acqua potrebbe alimentare solo un numero limitato di tubi e non l'intero fascio tubiero.

E' anche possibile che venga individuata una forchetta di portata di acqua particolarmente gravosa per la connessione tubi-piastra. Le precedenti considerazioni indicano l'importanza di una tale serie di prove i cui risultati non sono affidabilmente anticipabili con simulazioni

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 038	0	L	12	15

numeriche.

5.2. Seconda serie di prove

La seconda serie di prove è propedeutica alla ricerca di soluzioni meno sensibili ad instabilità procedendo ad aumentare la pressione di uscita vapore dallo scambiatore con l'introduzione di una valvola a saracinesca sulla tubazione da 168 mm.

La prova n°3 è costituita da una serie di prove con valori di portata ridotti a gradini di 0,5 kg/s a partire dalla portata di stabilità individuata con la prima serie di prove ridotta di 0,5 kg/s. Durante ogni prova viene chiusa progressivamente la valvola a saracinesca fino al raggiungimento della stabilità od al raggiungimento della pressione di 3 barg dell'acqua di alimento. Il raggiungimento della pressione di 3 barg dell'acqua di alimento senza raggiungimento della stabilità determina l'arresto della serie di prove.

La prova n°4, analogamente alla prova n°2 è effettuata con valori di portata ridotti a gradini di 0,025 kg/s (mantenuta per circa 5 m per ogni gradino), fino all'apparire di instabilità a livello delle temperature di uscita vapore e ridotta ulteriormente fino in prossimità dell'azzeramento per verificare l'attenuazione delle variazioni di temperatura tra le letture sulle termocoppie dei tubi strumentati B e C e le TC1, TC2 e TC3 del tubo strumentato A, rispetto alle letture sulle termocoppie T4 e T5 del tubo strumentato A ed a livello dell'uscita vapore per effetto del ponte termico col tubo interno di mandata acqua.

Durante ogni gradino di portata la valvola a saracinesca viene aggiustata fino al raggiungimento della pressione di 3 barg dell'acqua di alimento.

5.3. Terza serie di prove

E' possibile disaccoppiare il W-DHR dal nocciolo introducendo un bypass con la piscina a livello del separatore.

La soluzione di scarico vapore assunta a riferimento per questa serie di prove sarà scelta sulla base dell'effettivo miglioramento derivante dalla seconda serie di prove.

In una prima fase (prova n°5) la potenza del nocciolo in circolazione forzata sarà modulata in maniera da mantenere costante la temperatura ingresso LBE nello scambiatore, e la portata d'acqua sarà ridotta per gradini di 0,025 kg/s dal valore di 0,7 kg/s fino all'azzeramento. Ogni valore verrà mantenuto per un tempo sufficiente per lo stabilirsi dell'appropriata circolazione naturale (circa 5 minuti) nel W-DHR.

Da notare che CIRCE per la sua altezza, tipica proprio di un reattore in scala 1:1 e per il suo relativamente largo diametro, si presta alla simulazione del comportamento della termoidraulica del primario di un reattore LFR.

Tenuto conto che CIRCE ha una tanca di 1,2 m di diametro e che ad esempio un buon progetto di reattore LFR da 300 MWth potrebbe avere un diametro di 6 m, significa che, mantenendo le proporzioni tra massa di LBE e potenza, CIRCE potrebbe ospitare un reattore di $300 \cdot (1,2/6)^2 = 12$ MWth. Ovviamente il circuito ICE non è dotato di una simile potenza elettrica, ma la potenza di 800 KW è il 6,6% di 12MW e quindi corrisponde alla frazione di potenza di decadimento al momento dello spegnimento del reattore. Si noti inoltre che in un reattore LFR vengono in genere installati due sistemi DHR ed in caso di perdita del sistema secondario se ne utilizza uno dei due per una potenza di circa 1,5% della potenza nominale corrispondente alla potenza di decadimento dopo un'ora dallo spegnimento. Ne consegue che la termoidraulica di un LFR in caso di station black out è riproducibile in CIRCE mediante la

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 038	0	L	13	15

seguinte esperienza:

Condizioni iniziali:

Temperatura ICE: uniforme a 400°C

Circolazione LBE nel nocciolo: forzata

W-DHR all'arresto

Nocciolo all'arresto

Condizioni di messa in funzione:

Circolazione LBE nel nocciolo: forzata (obbiettivo ottenimento di una differenza di temperatura tra ingresso e uscita nocciolo limitata a circa 50°C)

Nocciolo: in funzione a 800 kW (mantenuti inizialmente fissi per 6 min per compensazione della capacità termica del nocciolo e del collettore caldo non presente nello schema CIRCE) con riduzione progressiva proporzionalmente alla curva di decadimento a partire dal tempo di 6 min e 300kW , a 273 kW a 10 min, a 208 kW a 30 min, a 170kW ad un'ora , a 136kW a due ore.

W-DHR: alla potenza costante di 180 kW in circolazione naturale

5.4. Matrice di prova

Di seguito è riportata la matrice di prova di tentativo

Serie di prove	Prima		Seconda		Terza	
Configurazione ICE	Configurazione ICE + aggiunta di termocoppie per misura del vapore in uscita da un numero selezionato di tubi		Introduzione di una valvola a saracinesca sulla tubazione vapore		Uscita riser ad ingresso nello scambiatore in comunicazione idraulica del LBE	
Prova	1	2	3 ₁ ...3 _n	4	6	7
Obiettivo	Ricerca della portata di instabilità	Ricerca della forchetta di portata che induce fluttuazione termica a livello della connessione tubi intermedi e piastra.	Conferma dell'effetto di stabilizzazione con l'aumento della pressione vapore.	Ricerca della forchetta di portata che provoca fluttuazione termica a livello della connessione tubi intermedi e piastra.	Verifica funzionale del dip cooler e del carico termico sui tubi e sulla connessione tubi piastra	Simulazione di un transitorio di station black out
Parametri da variare	Q _a		Pa tramite intercettazione parziale tubazione vapore	Q _a	P _p	
Parametri da aggiustare	Ti, modulando la P _p			Ti, modulando la P _p . Pa tramite intercettazione parziale tubazione vapore.	Ti, modulando la P _p	Nessuno
Parametri da tenere sotto controllo	Temperature sui tubi di scambio e sulle termocoppie aggiunte sul vapore in uscita tubi					Temperature sui tubi di scambio, del LBE in uscita, del vapore in uscita dai tubi e del LBE nel collettore freddo
P _p (kW)	~800 ¹ → A ridurre per mantenere la T _i a ~400°C	~550 ² → A ridurre per mantenere la T _i a ~400°C		~550 ² A ridurre per mantenere la T _i a ~400°C	800→ A ridurre per mantenere la T _i a ~400°C	800→ A ridurre secondo la legge della potenza di decadimento
Q _{Pb} (kg/s)	55,2				~100 kg/s a ridurre Non misurabile	~20 kg/s Non misurabile
T _i (°C)	400					400→A salire e riscendere a 400
T _u (°C)	300→~340	~340→ ad aumentare			~350 ad aumentare	~Ti-20
T _{i-n}	300→~340	~340→ad aumentare			~300 ad	Da 400 a ridurre e

¹ La potenza deve intendersi al netto delle fughe termiche parzialmente compensabili dai cavi scaldanti

(°C)					aumentare	riaumentare
P_s (kW)	800 ² → La potenza si riduce naturalmente a 500/ 600 kW alla portata di instabilità	~550 ² → a ridurre			800 ² → a ridurre	180
Q_a (kg/s)	0,7→ a ridurre per gradini di 0,025 kg/s fino ad instabilità ed incrementata per gradini di 0,01 kg/s fino a ritrovamento della portata x di stabilità	A ridurre per gradini di 0,025 kg/s dal valore x della prova precedente fino a portata nulla	n prove con portata $x - i * 0,05$ con i variabile da 1 ad n e la portata x individuata dalla prova n° 1	A ridurre per gradini di 0,025 kg/s dal valore x della prova precedente fino all'azzeramento	0,7→ a ridurre per gradini di 0,025 kg/s fino a zero	~0,07
P_a (barg)	~3	~2→ a ridurre	Max 3	Max 3	~3	~3
Pressione a valle dell'appar ecchio	Atmosferica		Atmosferica → in aumento fino a circa 2 barg	Atmosferica → in aumento fino a circa 2,5 barg	Circa 2 barg ad aumentare fino a circa 3	Circa 3 barg
Durata della prova (m)	~240	~120	~240	~240	~240	~120
Note	.	Le termocoppie da controllare sono quelle dei tubi strumentati B e C e le TC3,TC4 e TC5 del tubo strumentato A (eventuale mantenimento di una temperatura elevata e stabile)	Chiusura della la valvola a saracinesca fino al raggiungimento della stabilità.			

P_p = Potenza al primario

P_s = Potenza dello scambiatore

Q_{pb} = Portata piombo

Q_a = Portata d'acqua all'ingresso dello scambiatore

P_a = Pressione acqua alimento

T_i = Temperatura del piombo all'ingresso dello scambiatore uguale alla temperatura di uscita nocciolo

T_u = Temperatura del piombo all'uscita dello scambiatore

T_{i-n} = Temperatura d'ingresso nocciolo

² La potenza del W-DHR non è controllabile progressivamente, resta a valori praticamente costanti per alte portate di acqua e cambia bruscamente al ridurre della portata d'acqua al raggiungimento dell'instabilità.