



Ricerca di Sistema elettrico

Rapporto di prova e analisi dei risultati ottenuti per la qualifica del prototipo di GV a spirale piana per sistemi LFR

M. Tarantino, P. Agostini, L. Cinotti

RAPPORTO DI PROVA E ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LA QUALIFICA DEL PROTOTIPO DI GV A SPIRALE PIANA PER SISTEMI LFR

M. Tarantino, P. Agostini (ENEA), L. Cinotti (M.E. Rivus)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Titolo

Rapporto di prova e analisi dei risultati ottenuti per la qualifica del prototipo di GV a spirale piana per sistemi LFR

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Termoidraulica dei reattori nucleari
 Generation IV reactors

Sommario

Obiettivo dell'attività è stato quello di dimostrare la fattibilità di un generatore di vapore a tubi a spirale piana ed effettuare prove riproducendo quanto più possibile il comportamento funzionale e meccanico per le applicazioni relative ai reattori LFR.

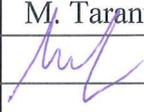
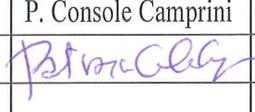
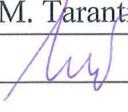
Note:

Lavoro eseguito in collaborazione con M.E.Rivus S.r.l.

Autori:

M. Tarantino, P. Agostini (ENEA)

L. Cinotti (M.E. Rivus)

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	19/09/2013	NOME	M. Tarantino	P. Console Camprini	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 026	0	L	2	11

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. GEOMETRIA DEL MOCK-UP DI PROVA	3
3. FATTIBILITA' DEL MOCK-UP DI PROVA	5
4. RISULTATI DELLE PROVE EFFETTUATE	7
4.1 Prove a freddo	7
4.2 Prove a caldaia fredda con circolazione di acqua calda	7
4.3 Prove in potenza	7
5. CONCLUSIONI	10

1. OBIETTIVO DELL'ATTIVITA'

Obiettivo dell'attività è stato quello di dimostrare la fattibilità di un generatore di vapore a tubi a spirale piana ed effettuare prove riproducendo quanto più possibile il comportamento funzionale e meccanico per le applicazioni relative ai reattori LFR e per il recupero di calore dai fumi degli impianti a biogas.

2. GEOMETRIA DEL MOCK-UP DI PROVA

Il mock up di prova (figura 1) è il risultato di una scalatura geometrica dal Demo del LFR riducendo tuttavia le dimensioni del mock-up per riportarlo ad una potenza compatibile con le possibilità sperimentali di Saluggia, ovvero alcune centinaia di kW.

Il diametro esterno del tubo di scambio è stato ridotto di un fattore 2 e fissato ad 8 mm.

Lo spessore del tubo è stato ridotto ad un valore di 1 mm facilmente reperibile sul mercato.

Il passo assiale ed il passo radiale sono tra loro identici come nel GV del Demo ed il rapporto rispetto al diametro del tubo di scambio (1,18) è prossimo a quello del Demo.

Il minimo raggio della spirale interna è stato, analogamente al diametro del tubo, ridotto di un fattore 2 e fissato a 350 mm.

La lunghezza dei tubi è stata mantenuta prossima a quella del Demo.

Il numero dei tubi è stato fissato a 18 (tabella3), valore sufficientemente grande per verificare effetti di bordo delle spire poste più in alto e di quelle poste più in basso.

Il mock-up è alimentato in acqua nella spira esterna e rilascia il vapore dalla spira interna.

I collettori acqua e vapore sono sistemati al di sopra del fascio tubiero come nel caso del reattore dove sono sistemati sopra il tetto del reattore stesso.

Tabella 1 – Geometria del mock up di prova

Minimo raggio della spirale interna	(mm)	350
Raggio massimo della spirale esterna	(mm)	672
Numero di tubi		18
Lunghezza media dei tubi	(m)	27
Numero di tubi per livello		1
Diametro esterno dei tubi	(mm)	8
Spessore dei tubi	(mm)	1
Passo Radiale (disposizione a passo triangolare)	(mm)	9,5
Passo assiale (disposizione a passo triangolare)	(mm)	9,5

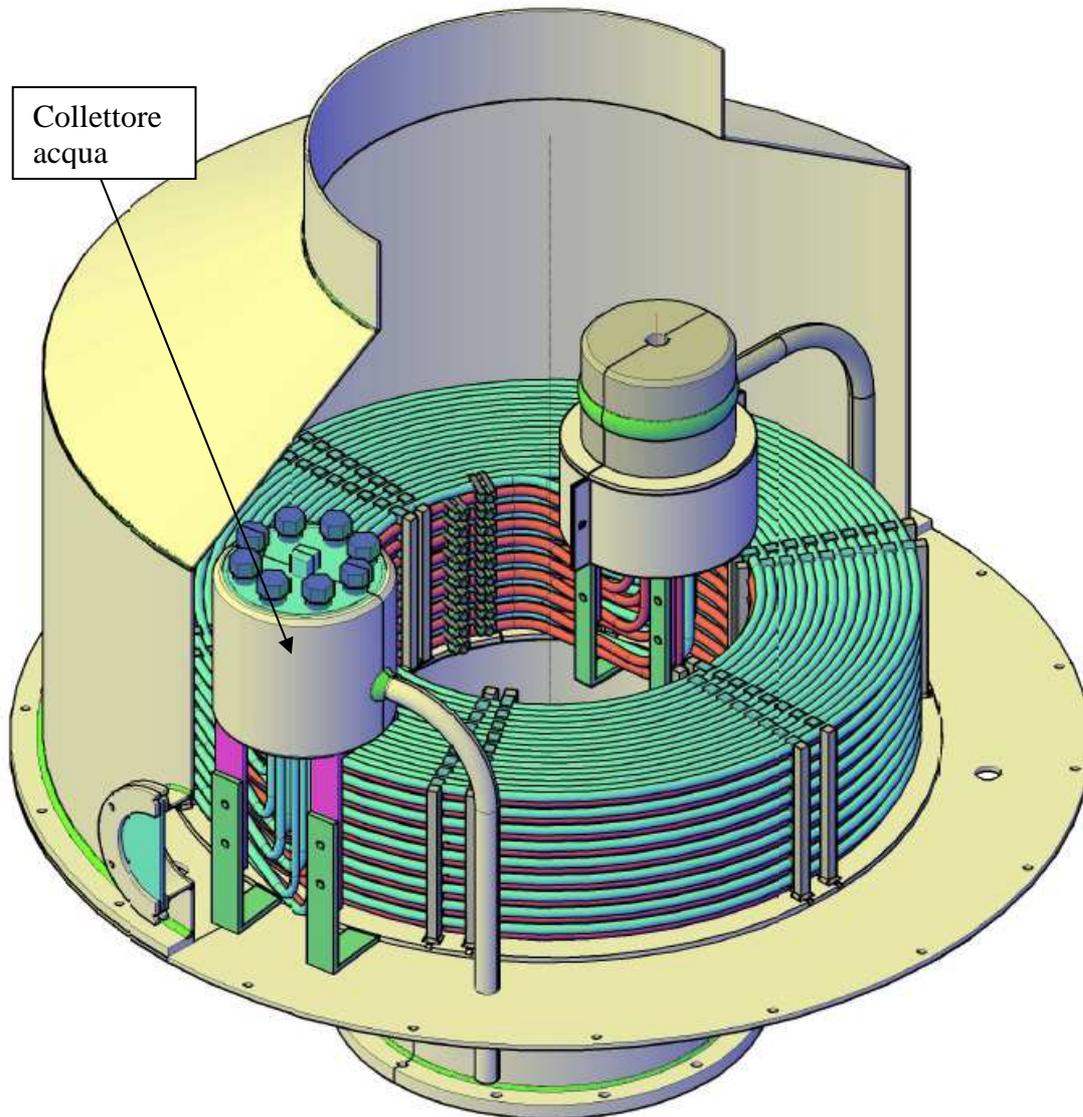


Figura 1. Mock up di prova

Il collettore acqua è munito di tappo smontabile tramite collegamento filettato per eventuale introduzione di dispositivi di stabilizzazione.

Il fascio tubiero è chiuso superiormente da quattro lamiere (figura 2), due a due sovrapposte per incanalare il fluido primario radialmente all'interno del fascio tubiero.

Le lamiere di chiusura del fascio tubiero sono facilmente rimovibili tramite collegamenti filettati per poter aggiungere eventuali ripartitori di portata del fluido primario all'ingresso del fascio tubiero.

Poiché non esiste ancora in Italia e probabilmente al mondo un circuito adatto a prove di un generatore di vapore in piombo le prove sono state effettuate nei laboratori ENEA di Saluggia utilizzando una caldaia a gasolio ed associato circuito aria che opportunamente riorganizzati possono fornire gas di combustione a temperature regolabili nell'intorno di 500°C-700°C.



Figura 2. Foto dall'alto del mock up di prova

3. FATTIBILITA' DEL MOCK-UP DI PROVA

Il mock up di prova è stato realizzato nelle officine di Bari della società Tecnomec.

La formazione a spirale dei tubi non ha comportato alcuna difficoltà ed è stata realizzata in tempi brevi nonostante l'alto rapporto lunghezza/diametro (figura 3). Questo risultato apre la prospettiva di poter utilizzare tubi anche molto più lunghi nei casi in cui il dimensionamento funzionale ne dimostri l'interesse.

Il sofisticato sistema smontabile del collettore acqua ha tenuto perfettamente ad una prova in acqua effettuata a 330 bar.

Il raggruppamento delle estremità dei tubi sulle piastre di relativamente piccolo diametro dei collettori acqua e vapore è risultato relativamente laborioso ed ha suggerito la modifica del disegno dei collettori acqua e vapore per il generatore di vapore del LFR, proponendo due collettori toroidali concentrici posti sopra il tetto del reattore (figura 4).



Figura 3. Spiratura dei tubi nell'officina Tecnomec di Taranto

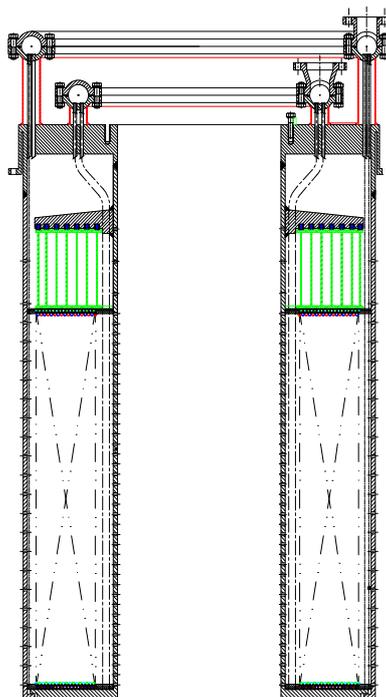


Figura 4. GV del LFR con collettori toroidali

4. RISULTATI DELLE PROVE EFFETTUATE

Il mock up di prova è stato installato nel laboratorio di ENEA a Saluggia ed accoppiato ad una caldaia di una potenza massima di circa 450 kW (figura 5) ed un sistema di alimentazione acqua alla pressione fino a circa 12 MPa e temperatura dell'ordine di 100°C.

Lo scarico acqua e vapore è effettuato tramite due tubi che commettono il generatore di vapore ad un camino situato all'esterno della sala di prova. I tubi di scarico sono stati schiacciati progressivamente per raggiungere i 60 bar previsti per le prove.

4.1 Prove a freddo

Prove a freddo sono state eseguite con portate di aria fino a 1,6 kg/s, ovvero sino ad un valore oltre il doppio di quello previsto nominalmente per applicazione ad impianti a biomassa.

Nessuna vibrazione dei tubi del fascio è stata notata attraverso l'oblò e nessun rumore/suono è stato percepito.

La perdita di carico misurata tra il condotto fumi in uscita dalla caldaia e l'uscita fascio tubiero è risultata oltre il 50 % superiore a quella calcolata per il solo fascio tubiero, tuttavia tale perdita di carico include anche la perdita di sbocco del condotto fumi nel volume interno del fascio tubiero di difficile valutazione numerica data la complessità degli ostacoli presenti: anse di raccordo dei tubi al collettore vapore e strutture di supporto dello stesso collettore. Data la bassa perdita di carico lato mantello che caratterizza il generatore di vapore a tubi a spirale, un certo aumento della perdita di carico rispetto al valore previsto a progetto non ha un effetto significativo sulle prestazioni.

4.2 Prove a caldaia fredda con circolazione di acqua calda

Le prove effettuate non hanno permesso di ottenere dati utilizzabili a fini progettuali perché l'acqua di alimentazione del generatore di vapore non è riscaldata a temperatura costante dall'idropulitrice ma ad una temperatura che fluttua indicativamente tra 60 e 120 °C.

4.3 Prove in potenza

L'attività ha comportato una laboriosa messa a punto della facility e del relativo sistema di acquisizione dati.

La misura della portata di acqua è stata calibrata mediante pesatura della vasca d'acqua alimento.

La temperatura dell'acqua alimento è rimasta fluttuante, ma l'errore sul bilancio termico associato alla valutazione della temperatura ingresso acqua e quindi della sua entalpia, si riduce drasticamente in funzionamento come generatore di vapore, vista la grande variazione entalpica tra l'acqua di alimento ed il vapore generato.

E' stata inizialmente notata una mancanza di corrispondenza tra la pressione di mandata acqua e la temperatura vapore, in funzionamento con flusso bifase in uscita dal generatore di vapore.

Per rimediare a tale inconveniente che impediva un corretto bilancio termico, sono state aggiunte due termocoppie immerse direttamente nel vapore in uscita dal GV che non risentono della temperatura fumi come le termocoppie installate sulla parete esterna dei tubi.

Le termocoppie aggiuntive hanno permesso di verificare la perfetta corrispondenza temperatura/pressione in flusso bifase e quindi eseguire un bilancio di potenza affidabile lato acqua-vapore.

Lato fumi il bilancio termico è stato effettuato tramite la misura della temperatura d'ingresso, la temperatura d'uscita ed il calcolo della portata effettuato tramite misura della portata gasolio e del tenore in ossigeno dei fumi.

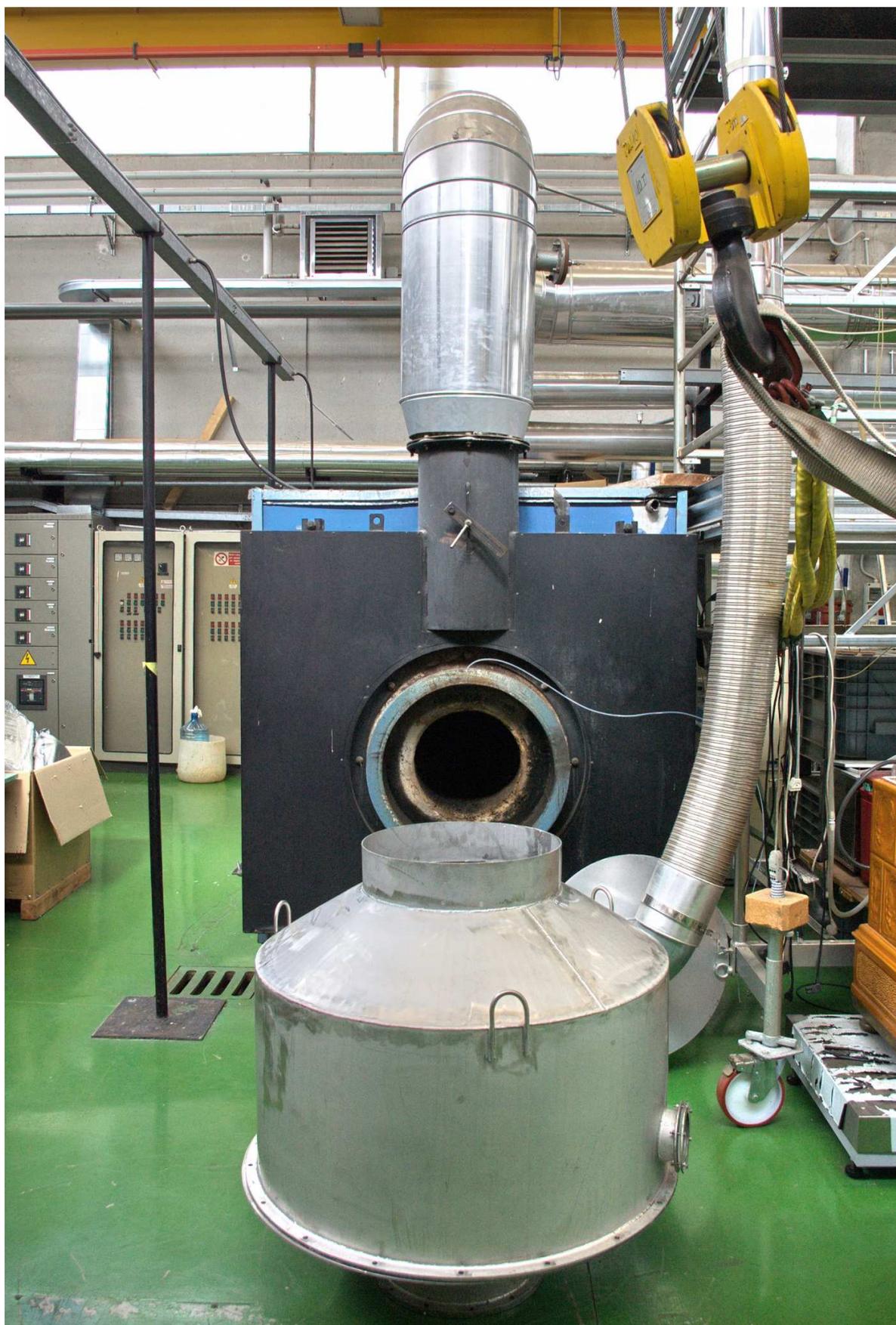


Figura 5. Scambiatore in fase di montaggio sulla caldaia

La campagna di prove è stata effettuata con diverse temperature fumi d'ingresso al GV, perlopiù tra 550 °C e 600°C.

La portata gasolio è stata regolata fino ad un valore massimo di 14 g/s.

La portata d'acqua è stata regolata fino ad un valore massimo di 120 g/s.

La temperatura d'ingresso acqua è stata regolata attorno ad un valore medio di circa 90°C (con variazione da circa 60°C a circa 120°C)

La pressione vapore di 60 bar dell'acqua/vapore è stata ottenuta tramite successivi molteplici interventi di strizione dei tubi di uscita vapore.

Il GV è stato fatto operare fino alla temperatura uscita vapore di 440°C e fino alla potenza di circa 320 kW.

Durante il funzionamento in potenza non è stato percepito alcun rumore che potesse indicare vibrazioni od effetti di cavitazione all'interno dei tubi.

Le misure di temperatura poste sulla parete esterna dei tubi di scambio all'estremità lato vapore non hanno indicato fluttuazioni associabili a instabilità di funzionamento lato acqua vapore.

Su questa base, per applicazioni alla biomassa, non sembra necessario il ricorso a stabilizzatori di portata lato ingresso tubi, di cui in fase progetto era stata prevista la possibilità di inserimento con realizzazione di un collettore acqua apribile per accedere alla piastra tubiera.

Dette misure di temperatura effettuate con termocoppie poste sulla parete esterna dei tubi di scambio danno utile indicazione della stabilità di funzionamento del componente, ma sono troppo influenzate dalla temperatura fumi per poter essere assunte come valore di riferimento per l'effettiva misura della temperatura uscita vapore da ciascun tubo.

Per quanto riguarda la perdita di carico lato fumi vale quanto già anticipato con le prove a freddo.

Per quanto riguarda i coefficienti di scambio lato fumi sono sostanzialmente confermati i valori di progetto anche se le valutazioni effettuate restano condizionate da alcune problematiche/fenomenologie di difficile quantificazione.

In particolare è stata riscontrata una certa differenza tra il bilancio termico effettuato lato acqua/vapore e quello effettuato lato fumi.

Poiché il bilancio termico lato acqua/vapore, a parte l'errore marginale sulla temperatura ingresso acqua, dovrebbe risultare relativamente preciso, è ipotizzabile che sia affetto da errore il bilancio lato fumi.

Due sono le più probabili cause ipotizzabili:

- un'imprecisione della misura del tasso di ossigeno dei fumi
- la presenza di un certo bypass dei fumi a livello delle lamiere smontabili di chiusura superiore del fascio tubiero e del canotto antitrafilamento fluido primario (figura 2).

La seconda problematica di rilievo riscontrata è quella relativa alla disuniformità di portata fumi tra i tubi posti in parte inferiore del fascio tubiero che sono sottoalimentati e quelli posti in parte superiore che sono sovralimentati.

Per risolvere tale problematica fin dall'inizio del progetto del generatore di vapore per il reattore LFR era stata prevista l'introduzione di una virola forata di redistribuzione della portata all'imbocco del fascio e più recentemente anche l'adozione di un albero sagomato della pompa di circolazione piombo integrata all'interno del GV.

Per il mock up di prova sono state previste delle lamiere smontabili di chiusura superiore del fascio tubiero anche per poter eventualmente permettere l'introduzione di redistributori di portata fumi.

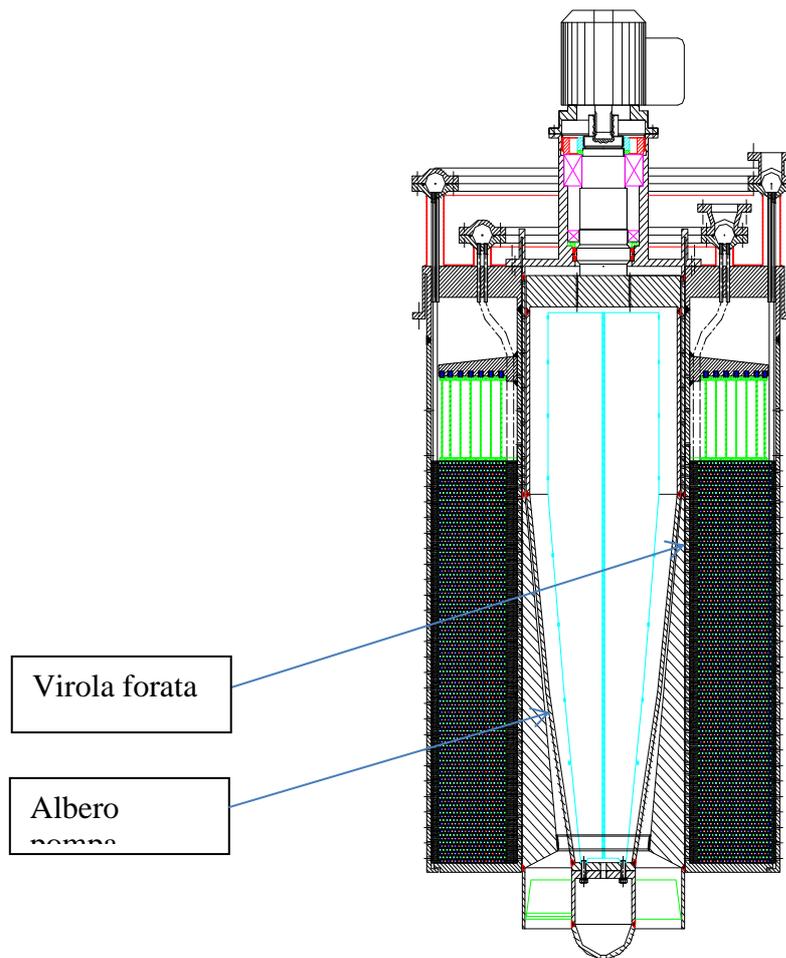


Figura 6. GV del LFR con albero pompa a sezione variabile con funzione di distributore di portata.

5. CONCLUSIONI

L'attività ha dimostrato la fattibilità di un generatore di vapore a tubi a spirale piana e suggerito importanti miglioramenti progettuali per il GV destinato al reattore LFR.

Le prove hanno indicato:

- (i) l'assenza di rumore e di vibrazioni percepibili anche a portate di fumi superiori a quella nominale.
- (ii) una perdita di carico lato fumi oltre il 50% superiore a quella calcolata in radiale per il fascio tubiero, ma che include invece anche due cambiamenti di direzione a monte del fascio: curva a 90° e passaggio da flusso assiale a flusso radiale in presenza di ostacoli, di difficile valutazione numerica.
- (iii) la sostanziale conferma del coefficiente di scambio globale dei tubi.
- (iv) la presumibile presenza di una portata di bypass del fascio tubiero attraverso il coperchio smontabile e le vie di passaggio delle termocoppie.
- (iv) la presumibile assenza (o comunque non meccanicamente significativa) di instabilità di portata acqua.
- (v) una sovralimentazione fumi dei tubi posti in posizione superiore.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 026	0	L	11	11

Poiché ad oggi il mock up realizzato e l'installazione di prova di Saluggia sono l'unica opportunità per approfondire gli studi sul GV a tubi a spirale e l'installazione è relativamente flessibile e relativamente facilmente esercibile, si propone di continuare, la campagna di prova introducendo dei dispositivi lato fumi e lato vapore dei quali, in sede di progetto del mock up, era già stata prevista la possibilità d'inserimento.

Lato fumi si propone l'introduzione di un semplice convogliatore fumi che simuli l'albero pompa a sezione variabile.

Per l'occasione è opportuno:

- verificare la possibilità di ridurre il bypass di trafilemento fumi dal coperchio.
- aumentare il numero di termocoppie sull'uscita fumi.
- migliorare il posizionamento e/o la schermatura termica di almeno alcune termocoppie di misura della temperatura vapore dei singoli tubi per una migliore valutazione delle disuniformità di temperatura.

Nonostante la presumibile assenza di instabilità di portata acqua, nell'applicazione al LFR infatti non ci si può affrancare da dispositivi di bilanciamento della portata acqua che hanno anche la funzione di limitare il rilascio di acqua-vapore in caso di rottura di un tubo.