



Ricerca di Sistema elettrico

Progetto dell'impianto di cogenerazione con microturbina a vapore. Schema dei circuiti vapore e acqua e delle strumentazione. Progetto nuovo generatore di vapore.

G. Petroni, L. Rinaldi, C. Rocca, P. Tarquini

Report RdS/PAR2013/135

PROGETTO DELL'IMPIANTO DI COGENERAZIONE CON MICROTURBINA A VAPORE. SCHEMA DEI CIRCUITI
VAPORE E ACQUA E DELLE STRUMENTAZIONE. PROGETTO NUOVO GENERATORE DI VAPORE.

G. Petroni, L. Rinaldi, C. Rocca, P. Tarquini (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia elettrica da fonte solare

Obiettivo: Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 PROGETTO IMPIANTO VAPORE PER MICROTURBINA “TURNNEY TURBINES LTD” DA 1,5 kW	5
2.2 PROGETTO TERMOIDRAULICO DEL GENERATORE DI VAPORE	14
3 CONCLUSIONI.....	18
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	18

Sommario

Il presente documento descrive le attività svolte dal Laboratorio Solare Termodinamico dell'Unità Tecnica Fonti Rinnovabili relative alla progettazione di un impianto di cogenerazione dimostrativo di piccola taglia con una microturbina a vapore da circa 1,5 kWe.

Sono stati sviluppati gli schemi di dettaglio dei circuiti vapore e acqua e delle strumentazione e il computo dei componenti con una preliminare stima dei costi. E' anche compreso il progetto preliminare di un originale generatore di vapore alimentato a sali fusi per l'alimentazione della micro turbina.

1 Introduzione

Nello sviluppo di sistemi di produzione di energia elettrica integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia, le attività prevedevano l'installazione e prove preliminari di caratterizzazione del sistema cogenerativo innovativo con micro turbine a vapore.

Le attività sono state svolte in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Roma RM3.

Nei primi mesi successivi all'inizio delle attività si è provveduto come prima priorità alla ricerca della microturbina da installare compatibilmente con il budget a disposizione. Nella fase di stesura del progetto era stata presa in considerazione, come prima ipotesi, di installare una turbina Dresser-Rand da 15 kW alimentata da un generatore di vapore già esistente presso il C.R. Casaccia. Durante lo sviluppo del progetto dell'impianto a seguito delle offerte pervenute per la turbina da 15 kW e la stima dei costi degli altri componenti d'impianto necessari, ci si è resi conto della incompatibilità dei costi con il budget disponibile. A questo punto si è optato per una soluzione equivalente dal punto di vista tecnologico e dimostrativo ma che fosse compatibile con il budget disponibile. In collaborazione con l'Università si è passati alla ricerca di macchine rotative (microturbine) di potenza di qualche kW con una impiantistica relativa semplificata.

La ricerca ha individuato due macchine: una microturbina "Green Turbine" da 1,2 kW, e una microturbina "Turney Turbines LTD" da 1,5 kW. La scelta, legata essenzialmente a motivi di tipo amministrativi riguardanti le modalità di pagamento dei fornitori, è caduta sulla Turney Turbines LTD, che è stata approvvigionata ed è attualmente presso il C.R. Casaccia.

Si è passati quindi alla definizione dello schema di impianto del circuito vapore relativo alla macchina da 1,5 kW e la relativa strumentazione. Si è focalizzata infine l'attenzione sulla soluzione del problema posto dalle caratteristiche del vapore richiesto dalla turbina: pressione 12 bar, temperatura 220°C. Queste caratteristiche del vapore non consentivano l'uso del generatore di vapore già esistente presso il C.R. Casaccia del tipo "one through" immerso nel serbatoio sali fusi. Pertanto è stato necessario studiare e progettare un nuovo generatore di vapore che rispondesse ai seguenti requisiti: produzione di vapore alle caratteristiche richieste, basso costo, semplicità costruttiva, alimentazione con acqua a temperatura ambiente senza necessità di preriscaldamento dell'acqua di alimento evitando il problema della solidificazione dei sali binari nella zona di preriscaldamento del generatore di vapore. I generatori di vapore alimentati da sali fusi, in particolare miscele Na/K diffusamente utilizzate negli impianti solari, presentano il problema della solidificazione dei sali il cui punto di cambiamento di fase è intorno ai 240°C, qualora l'acqua di alimento sia a una temperatura inferiore a tale valore. Questo limite impone un preriscaldamento dell'alimentazione del GV a livelli non inferiori a 240°C. Si è quindi adottata una innovativa soluzione progettuale che prevede preriscaldatore, evaporatore surriscaldatore siano immersi in una miscela di Sali quaternaria a basso punto di fusione, inferiore a 100°C in un contenitore cilindrico ad asse verticale immerso nel serbatoio di accumulo dell'impianto solare contenente la miscela binaria alto fondente.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Progetto impianto vapore per microturbina "Turney Turbines LTD" da 1,5 kW

Il progetto svolto a riguardo lo sviluppo del P&I dell'impianto vapore per l'alimentazione della microturbina da 1,5 kW. Nella fig. 1 viene riportato lo schema del circuito vapore. Nella tabella 1 viene invece riportata la distinta dei componenti del piping e della strumentazione e nella tab.2 in computo dei componenti.

Il criterio seguito nella progettazione dell'impianto vapore è stato quello di realizzare un impianto funzionale idoneo ad una turbina di piccola potenza rispettando ovviamente i criteri di sicurezza e privilegiare la semplicità d'impianto con l'intento di recuperare parte dei componenti presenti nell'impianto

PCS, quali ad esempio il condensatore ad aria e il serbatoio condense, allo scopo di ridurre i costi di investimento. Per la scelta delle valvole di regolazione, di intercettazione e di sicurezza, viste le dimensioni delle tubazioni da $\frac{1}{2}$ " lato alimentazione e da $\frac{3}{4}$ " lato vapore, ci si è orientati verso elementi ad innesto rapido, tipo "Svagelok" per semplificare il montaggio del circuito, ridurre i tempi ed evitare saldature, in modo da aumentarne la flessibilità nel caso si rendesse necessario apportare modifiche in fase di sperimentazione.

Per quanto riguarda le misure delle portate son stati adottati misuratori del tipo "Coriolis" che assicurano una certa affidabilità e precisione di misura.

L'impianto è dotato di by-pass della turbina, in modo da poter eseguire preliminarmente prove e messa a punto del generatore di vapore e di taratura del circuito senza interessare la turbina.

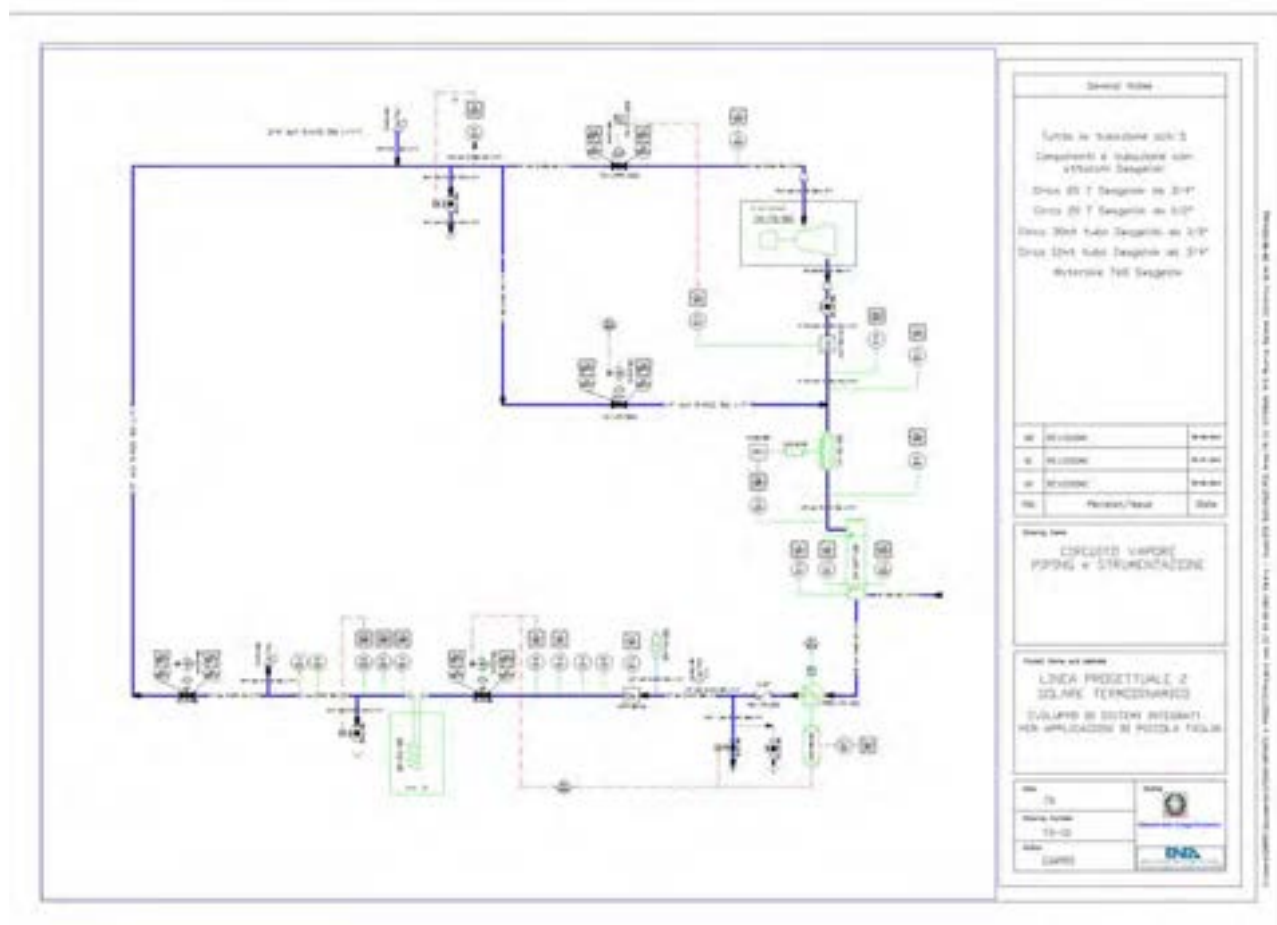


Figura 1. Circuito vapore dell'impianto con turbina da 1,5 kW – Schema d'impianto e strumentazione

TAG	TYPE	DESCRIPITON
FLANGE 1/2"	AISI 316L - PN 25	FLANGE IN 8A-GV -001
7A-EVP-004	ELECTRIV VALVE whit air vent, 24 VDC	ELECTRIC VALVE
1-INV-003	INVERTER for AIRCOOLER SPEED	INVERTER for AIRCOOLER SPEED
1-VP-004	PNEUMATIC VALVE	
1-ZS-004-C	LIMIT SWITCH CLOSED VP-004	
1-ZS-004-O	LIMIT SWITCH OPEN VP-004	
FLANGE 3/4"	AISI 316 L - PN 25	FLANGE OUT 8A-GV -001
7A-AE-001	AIR COOLED EXCHANGER	AIR COOLED EXCHANGER
7A-EV-001	SOLENOID VALVE, 24VDC	SOLENOID VALVE DRAIN SAFETY
7A-EV-002	SOLENOID VALVE, 24VDC	SOLENOID VALVE DRAIN SAFETY
7A-EV-003	SOLENOID VALVE, 24VDC	SOLENOID VALVE DRAIN SAFETY
7A-EVP-001	ELECTRIV VALVE whit air vent, 24 VDC	ELECTRIC VALVE
7A-EVP-002	ELECTRIV VALVE whit air vent, 24 VDC	ELECTRIC VALVE
7A-FT-001	FLOW METER CORIOLIES TRASMITTER	FLOW METER CORIOLIES TRASMITTER
7A-FT-004	FLOW METER CORIOLIES TRASMITTER	FLOW METER CORIOLIES TRASMITTER
7A-HA-001	1/2" - AISI 316-L, SWAGELOK	ONE-WAY VALVE
7A-LS-203	SAFETY SWITCH LEVEL MIN TRASMITTER	SAFETY SWITCH LEVEL MIN TRASMITTER
7A-LT-001	Differential Pressure, 4-20 mA, 1500 mm	LEVEL TRASMITTER
7A-M-AE-001	ELECTRIC MOTOR for AIRCOOLED	ELECTRIC MOTOR for AIRCOOLED
7A-M-PRN-001	ELECTRIC MOTOR for PISTON PUMP	ELECTRIC MOTOR for PISTON PUMP
7A-PI-101	AISI 316-L, D=150mm, FS= 20 bar	LOCAL INDICATOR PRESSURE
7A-PI-102	AISI 316-L, D=150mm, FS= 20 bar	LOCAL INDICATOR PRESSURE
7A-PRN-001	PISTON PUMP	PISTON PUMP
7A-PS-202	AISI 316-L, 15 bar	SAFETY SWITCH PRESSURE TRASMITTER
7A-PSV-001	1/2" AISI 316-L, connection SWAGELOOK	MECCANICAL SAFETY PRESSURE
7A-PSV-002	3/4" AISI 316-L, connection SWAGELOOK	MECCANICAL SAFETY PRESSURE
7A-PSV-003	3/4" AISI 316-L, connection SWAGELOOK	MECCANICAL SAFETY PRESSURE
7A-PT-001	15 bar, 4-20 mA	LOCAL INDICATOR PRESSURE
7A-PT-002	15 bar, 4-20 mA	PRESSURE SENSOR TRASMITTER
7A-PT-003	15 bar, 4-20 mA	PRESSURE SENSOR TRASMITTER
7A-PT-004	15 bar, 4-20 mA	PRESSURE SENSOR TRASMITTER
7A-PT-005	15 bar, 4-20 mA	PRESSURE SENSOR TRASMITTER
7A-SAT-001	ATMOSPHERIC TANK	ATMOSPHERIC TANK
7A-SLT-001	SAFETY LOCAL MANUAL SWITCH 3 PHASES whit contact to DCS	MANUAL LOCAL SAFETY SWITCH

7A-TI-101	AISI 316, D=150 mm, F Scala= 600°C, A bulbo gas inerte	LOCAL INDICATOR TEMPERATURE	TbA (To be Acquired)
7A-TI-102	AISI 316, D=150 mm, F Scala= 600°C, A bulbo gas inerte	LOCAL INDICATOR TEMPERATURE	TbA (To be Acquired)
7A-TT-001	TC-K 600°C, AISI 316, D=1,5 mm, L=1000 mm, Mini-M	TEMPERATURE SENSOR TRASMITTER	TbA (To be Acquired)
7A-TT-002	TC-K 600°C, AISI 316, D=1,5 mm, L=1000 mm, Mini-M	TEMPERATURE SENSOR TRASMITTER	TbA (To be Acquired)
7A-TT-003	TC-K 600°C, AISI 316, D=1,5 mm, L=1000 mm, Mini-M	TEMPERATURE SENSOR TRASMITTER	TbA (To be Acquired)
7A-TT-004	TC-K 600°C, AISI 316, D=1,5 mm, L=1000 mm, Mini-M	TEMPERATURE SENSOR TRASMITTER	TbA (To be Acquired)
7A-TT-005	TC-K 600°C, AISI 316, D=1,5 mm, L=1000 mm, Mini-M	TEMPERATURE SENSOR TRASMITTER	TbA (To be Acquired)
7A-TT-007	TC-K 600°C, AISI 316, D=1,5 mm, L=1000 mm, Mini-M	TEMPERATURE SENSOR TRASMITTER	TbA (To be Acquired)
7A-VIM-001	AISI 316-L, Tmax 400°C, connection SWAGELOC	Valvola intercettazione manuale	TbA (To be Acquired)
7A-VIM-003	AISI 316-L, Tmax 400°C, connection SWAGELOC	Valvola intercettazione manuale	TbA (To be Acquired)
7A-VP-001	AISI 316-L, Tmax 400°C, connection SWAGELOC	PNEUMATIC VALVE, NORMALLY OPEN	TbA (To be Acquired)
7A-VP-002	AISI 316-L, Tmax 400°C, connection SWAGELOC	PNEUMATIC VALVE, NORMALLY OPEN	TbA (To be Acquired)
7A-VPR-003	AISI 316-L, Tmax 400°C, connection SWAGELOC	PNEUMATIC REGULATION VALVE whit conveter 4-20 mA to 4-15 psi, NORMALLY OPEN	TbA (To be Acquired)
7A-ZS-001-C	LIMIT SWITCH CLOSED VP-001	LIMIT SWITCH	
7A-ZS-001-O	LIMIT SWITCH OPEN VP-001	LIMIT SWITCH	
7A-ZS-002-C	LIMIT SWITCH CLOSED VP-002	LIMIT SWITCH	
7A-ZS-002-O	LIMIT SWITCH OPEN VP-002	LIMIT SWITCH	
7A-ZS-003-C	LIMIT SWITCH CLOSED VP-003	LIMIT SWITCH	
7A-ZS-003-O	LIMIT SWITCH OPEN VP-003	LIMIT SWITCH	
8A-GV-001	VAPOR GENERATOR	VAPOR GENERATOR	In design

Tab.1 Elenco componenti del circuito vapore dell'impianto con turbina a vapore da 1,5 kW

TAG	N°	DESCRIPTION	I/O DC5										LUNGHEZZA CAVO				
			A I	A Z	A O	D I	D O	I N D	R E S	F R O	E S T	3	4	S	F		
PRN-001	7A	01															
PRN	7A	001	CM					1					20				
PRN	7A	001	ST			1						20					
SL-PRN	7A	01															
SL-PRN	7A	001	ST			1						20					
REG-PRN	7A	01															
REG-PRN	7A	001	RG			1							20				
HA	7A	001															
VIM	7A	001															
EV	7A	001															
EV	7	001	CM				1					20					
PSV	7A	001															
SM	7A	001															
FT	7A	01															
FT	7A	001		1									20				
PI	7A	101															
TI	7A	101															
TT	7A	001															
TT	7A	001		1								20					
PT	7A	001															
PT	7A	001		1									20				
EVP	7A	001															
EVP	7A	001	CM				1					20					
VP	7A	001															
MVP	7A	001															
MVP	7A	001	FCA			1						20					
MVP	7	001	FCC			1						20					
TT	7A	002															
TT	7A	002		1								20					
PT	7A	002															
PT	7A	002		1									20				
PS	7A	202															
PST	7A	202	ST				1					20					
EV	7A	002															
EV	7	002	CM				1					20					
PI	7A	102															

Tab. 2a Computo componenti comando controllo e strumentazione

TAG	N°	DESCRIPTION	I/O DCS										LUNGHEZZA CAVO				
			A	A	A	D	D	I	I	P	P	R	E	A	E	P	R
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TI	7A	102															
PSV	7A	002															
EVP	7A	002															
EVP	7A	002	CM											20			
VP	7A	002															
MVP	7A	002															
MVP	7A	002	FCA											20			
MVP	7	002	FCC											20			
PSV	7A	003															
EV	7A	003															
EV	7	003	CM											20			
PT	7A	003															
PT	7A	003												20			
VP	7A	003															
P/I	7A	003															
P/I	7A	003												20			
MVP	7A	003															
MVP	7A	003	FCA											20			
MVP	7	003	FCC											20			
EVP	7A	004															
EVP	7A	004	CM											20			
VP	7A	004															
MVP	7A	004															
MVP	7A	004	FCA											20			
MVP	7	004	FCC											20			
TT	7A	003															
TT	7A	003												20			
TD	7A	001															
TD	7A	001	V											20			
TD	7A	001	I											20			
VIM	7A	003															
FT	7A	004															
FT	7A	004												20			
PT	7A	004															
PT	7A	004												20			

Tab. 2b Computo componenti comando controllo e strumentazione

TAG	N°	DESCRIPTION	I/O DCS										LUNGHEZZA CAVO				
			A	A	A	I	I	P	P	P	P	P	E	L	A	S	P
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TT	7A	004	Trasmettitore temperatura										COMPONENTE				
TT	7A	004	Trasmissione temperatura										20				
AE	7A	001	AEROTERMO										COMPONENTE				
AE	7A	001	CM Comando Motore										20				
AE	7A	001	ST Stato Motore										20				
SL-AE	7A	01	Selettore Locale										COMPONENTE				
SL-AE	7A	001	ST Stato Selettore Locale										20				
REG-AE	7A	01	Regolatore Inv per motore										COMPONENTE				
REG-AE	7A	001	RG Regolatore INV per Motore										20				
TT	7A	005	Trasmettitore temperatura										COMPONENTE				
TT	7A	005	Trasmissione temperatura										20				
SAT	7A	001	SERBATOIO ATMOSFERICO										COMPONENTE				
TT	7A	007	Trasmettitore temperatura										COMPONENTE				
TT	7A	007	Trasmissione temperatura										20				
LT	7A	001	Trasmettitore livello										COMPONENTE				
LT	7A	001	Trasmissione livello										20				
LST	7A	203	Livellostato										COMPONENTE				
LST	7A	203	ST Livellostato										20				

			Totale canali														
			40														
			A1	AI	AV	AO	DI	DO	LI	232	P						
			10	10	10	2	12	10	0	0	0	120	440	240			
			3.000,00	1.800,00	600,00	3.600,00	3.000,00					EST-SIN	2x15	4-20 mA	4-20 mA	4-20 mA	4-20 mA

TAG	N°	DESCRIPTION	I/O DCS										LUNGHEZZA CAVO				
			A	A	A	I	I	P	P	P	P	P	E	L	A	S	P
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TOTALE COMPUTO DCS

Totale canali	40																
Costo per canale €	150,00																
Totale canali €	6.000,00																
Ingegneria DCS	1.000,00																
PC Work. N° 2 + stamp.																	
Cablaggio armadio PW																	
Cablaggio armadio DCS	3.000,00																
Costo software																	
Costo programmazione																	

TOTALE 10.000,00 TOTALE 1.172,00

Tab 2c Computo componenti comando controllo e strumentazione

2.2 Progetto termoidraulico del generatore di vapore

Tra le azioni previste nel 2014 dalla Pianificazione annuale delle Attività, l'azione A1 riguardava l'utilizzo del Generatore di Vapore già esistente, immerso nel serbatoio di accumulo sali dell'Impianto PCS, per la generazione del vapore necessario a testare, in condizioni reali di esercizio, la turbina a vapore da 15 kW per la produzione di energia elettrica individuata secondo quanto indicato nel Rif. /1/.

In realtà la turbina che nel frattempo è stata individuata e acquistata, per motivi sia economici che di tempi relativi alla fornitura è una turbina dalla potenza elettrica prodotta nominale di 1,5 kW, un decimo di quella che era stata prevista, con una portata nominale di acqua/vapore pari a 60 l/h (0,01667 kg/s), una pressione di lavoro di 1,2 MPa (temperatura di saturazione $\sim 188^{\circ}\text{C}$) e una temperatura di ingresso in turbina di 200°C (quindi vapore leggermente surriscaldato, solo circa l'1%); ipotizzando, per turbine di tale taglia, un rendimento termico/elettrico molto basso e pari, per restare conservativi, al 10%, la potenza termica richiesta dalla turbina è di circa $15 \text{ kW}_{\text{th}}$. Questi parametri operativi, ai quali sarà necessario effettuare le prove sperimentali, sono incompatibili per la produzione diretta di vapore a quelle caratteristiche con il generatore di vapore esistente di cui sopra, che ha una potenza nominale di ben 300 kW per una portata d'acqua nominale di 0,123 kg/s.

Si potrebbe pensare di utilizzare questo generatore di vapore tramite la parzializzazione del suo fascio tubiero, utilizzando cioè uno solo dei tre tubi di cui è composto (scendendo così a $1/3$ di $0,123 \text{ kg/s} = 0,041 \text{ kg/s}$ e poi diminuendo la portata di circa il 40% per arrivare al valore richiesto), e producendo vapore a più alta pressione e temperatura per poi laminarlo portandolo così alle condizioni richieste. Si dovrebbe pertanto preriscaldare l'acqua almeno fino a 230°C (a una pressione minima di 2,8 MPa, che è la pressione di saturazione corrispondente alla temperatura di ingresso) e quindi inviarla nel generatore di vapore, da dove uscirebbe in condizioni surriscaldate per poi essere laminato fino alle condizioni desiderate per le prove. Sono necessari pertanto un preriscaldatore elettrico esterno per preriscaldare l'acqua di alimento e una valvola di laminazione appropriata. Il sistema è pertanto un sistema da gestire e controllare attivamente.

Si è pensato invece a un sistema più semplice che fosse in grado di produrre vapore surriscaldato a costi contenuti e di semplice gestione, senza parti attive da regolare.

Si è allora pensato di non utilizzare il grande generatore di vapore già installato sull'Impianto PCS, ma di studiare, progettare e far realizzare un altro generatore di vapore, molto semplice nella sua concezione e costituito da un tubo di scambio a conformazione elicoidale immerso in un cilindro di acciaio a sua volta completamente immerso nei sali del serbatoio di accumulo (generatore di vapore "a pozzo"). Il cilindro contiene una miscela quaternaria di sali fusi che, rispetto alla miscela binaria contenuta nel serbatoio, hanno il vantaggio di solidificare al di sotto dei 100°C . La miscela quaternaria costa più della miscela binaria, ma il vantaggio che dà con la sua proprietà di fondere/solidificare intorno ai 95°C ripaga della spesa aggiuntiva, che peraltro è bassa considerando la piccola quantità di sali necessaria ($\sim 100 \text{ kg}$).

In dettaglio, il generatore di vapore che si propone di utilizzare (vedi Fig. 2, dove è riportato lo schema di massima) è fatto nel modo descritto qui di seguito.

Un tubo da $\frac{1}{2}$ pollice (diametro esterno 0,0127 m, spessore 0,00277 m), conformato secondo un'elica di diametro esterno 0,12 m, passo/spira di 0,0889 m per n. 12 spire, di altezza totale circa 1,067 m, costituisce la sezione di preriscaldamento, in cui la portata di acqua entra a temperatura ambiente (20°C) e lo percorre dall'alto verso il basso. L'acqua può entrare a temperatura ambiente, cioè molto fredda rispetto ai sali quaternari in cui è immerso il tubo, in quanto come detto questi sali congelano a temperature intorno ai 95°C ; certamente i sali solidificheranno intorno alla parete del tubo ma, poiché la conducibilità termica dei sali solidi è maggiore di quella dei sali liquidi, lo scambio di calore continuerà ad avvenire riscaldando l'acqua fino ai 100°C per i quali è stata dimensionata questa sezione di preriscaldamento.

Arrivata ai 100°C l'acqua, attraverso un condotto di collegamento orizzontale posto sul fondo del cilindro, viene avviata verso il generatore di vapore vero e proprio, che è costituito da un tubo ancora avvolto ad elica e concentrico ma esterno all'elica del preriscaldatore.

15

Il generatore di vapore è fatto da un tubo da $\frac{3}{4}$ di pollice (diametro esterno 0,01905 m, spessore 0,00277 m), conformato secondo un'elica di diametro esterno 0,18 m, passo/spira di 0,02858 m per n. 48,5 spire, di altezza totale circa 1,386 m (per una lunghezza totale del tubo elicoidale di circa 27,43 m). Esso è suddiviso formalmente in tre sezioni di diversa lunghezza che mantengono sempre uguali i valori di diametro tubo, diametro spira e passo spira: – la sezione di sottoraffreddamento, in cui l'acqua si scalda passando dal valore di temperatura dell'uscita dal preriscaldatore fino al valore di saturazione alla pressione di lavoro (altezza: 0,162 m, lunghezza 3,205 m); – la sezione di evaporazione, in cui la portata d'acqua evapora completamente passando da titolo= 0 a titolo= 1 (altezza: 0,935 m, lunghezza 18,502 m); – la sezione di surriscaldamento, in cui il vapore entra saturo per uscire al desiderato valore di surriscaldamento (altezza: 0,289 m, lunghezza 5,723 m).

Il dimensionamento è stato effettuato in maniera molto semplice utilizzando un foglio EXCEL (vedi Fig. 3). I coefficienti di scambio termico, per le varie zone, sono stati dedotti da correlazioni in letteratura, anche se non per le condizioni di utilizzo con i sali fusi. Tuttavia le correlazioni erano state già impiegate nel passato per dimensionare ad esempio il generatore di vapore da 300 kW e il loro uso si è rilevato sperimentalmente accettabile, per cui sono state scelte per un dimensionamento di un componente così semplice come il generatore attuale.

Il generatore di vapore funziona nel modo seguente.

L'acqua entra dall'alto, alla temperatura ambiente in cui si trova nel serbatoio dell'acqua dal quale viene aspirata dalla pompa di circolazione acqua, nel tubo da $\frac{1}{2}$ " della sezione preriscaldatore, ne percorre le spire procedendo verso il basso riscaldandosi grazie allo scambio termico con i sali quaternari caldi contenuti nel cilindro (il "pozzo") fino a giungere al valore di circa 100°C. Attraverso un tubo di collegamento l'acqua passa poi nella sezione di sottoraffreddamento da $\frac{3}{4}$ " dove inizia la risalita percorrendo le spire dal basso verso l'alto e dove continua il riscaldamento a spese dei sali quaternari fino a diventare saturo; nella sezione di evaporazione l'acqua diventa vapore saturo per poi surriscaldarsi nella sezione di surriscaldamento. Infine il vapore esce dal generatore di vapore per evolvere in turbina. Il cilindro pieno di sali quaternari è immerso nei sali binari contenuti nel serbatoio, che sono mantenuti alla temperatura calda desiderata (nel dimensionamento, a 400°C) circolando tramite la pompa di circolazione sali attraverso la caldaia elettrica esterna dei sali binari. Nei calcoli per il dimensionamento del sistema si è ritenuto che i sali binari rimangano a temperatura costante per tutto il tempo di funzionamento del generatore di vapore (sorgente di calore "infinita").

I vantaggi di un tale sistema di generazione di vapore asservito a una piccola turbina per la produzione di energia elettrica per uso di emergenza o di back-up di una centrale a sali fusi risiedono nel fatto che è possibile far circolare l'acqua direttamente a temperatura ambiente, cioè senza necessità di un preriscaldamento, e quindi dovrebbe essere un sistema rapido sia in avvio che in fermata, senza necessità di troppe regolazioni esterne ma legato solo all'avvio della pompa di circolazione dell'acqua e, ovviamente, ai tempi di avvio della turbina (tempi che evidentemente però sono gli stessi degli altri sistemi a vapore). L'uso di un sale quaternario, più caro di un sale binario, è limitato all'acquisto comunque di piccole quantità che rendono il sistema competitivo; peraltro, l'uso di un generatore di vapore più convenzionale richiede l'acquisto di uno scambiatore/preriscaldatore per preriscaldare l'acqua e di una valvola di laminazione per portare il vapore alle condizioni per evolvere in turbina. Anche la fabbricazione di un tale sistema è molto più semplice rispetto a un generatore a fascio tubiero once-through come quello impiegato nell'impianto PCS: i fornitori possono essere molteplici con grande vantaggio economico, mentre lo "once-through" è di difficile reperibilità sul mercato data la tecnologia necessaria per fabbricarlo, a disposizione di pochi fornitori esteri.

PRERISCALDO	SCAMBIATORE	SEZIONE PRERISCALDAMENTO				SEZIONE SATURAZIONE				SEZIONE SURRISCALDAMENTO						
		400 °C 200 °C				Usott,pre		91,962	W/(m² °C)	Usat		140,453	W/(m² °C)	pig		3,14159
						De,pre		0,0127	m				De (3/4")		0,01905 m	
						DT1		380,00	°C				sp (sch 5s)		0,00277 m	
						DT2		300	°C				Di		0,01351 m	
						DTLM		338,43	°C	DTM		212,38	°C	Apass		0,00014335 m²
		100 °C 187,62 187,62				S scam. zona pre	W/(U*DTLM)	0,180546	m²	S scam. zona sat.	W/(U*DTM)	1,1073	m²	vel,vsurr (Tsalt)	Γ/(A*pv,surr)	19,67 m/s
						L sott,pre	S/(pig*De)	4,5252	m	L sat	S/(pig*De)	18,5029	m			
						dspira		0,12	m	dspira		0,18	m	μv,surr,med(Tsalt)		0,0000244 kg/(m*s)
						pspira		0,08890	m	pspira		0,02858	m	kv,surr,med(Tsalt)		0,0551 W/(m*°C)
						Lspira		0,3770	m	Lspira		0,5655	m			
						Nspire, sott pre		12,0	-	Nspire, sat		32,7	-			
						Hsott pre		1,0671	m	Hsat		0,9350	m	Prv,surr,med(Tsalt)		0,936 -
														Rey, vsurr	ρ*vel*Di/μ	90772,37335 -
		p 12 bar														
		Tin,pre 20 °C														
		Tout,pre = Tin 100 °C														
		Tsat (p) 187,62 °C														
		Tin 100 °C														
		Tvap,out 200 °C														
		Tsalt 400 °C														
		Γ 60 kg/h														
		0,0167 kg/s														
						SEZIONE SOTTORAFFREDDAMENTO										
						Usott		128,891	W/(m² °C)							
						DT1		212,38	°C							
						DT2		300,00	°C							
						DTLM		253,68	°C							
						S scam. zona sott.	W/(U*DTLM)	0,1918	m²							
						L sott	S/(pig*De)	3,2052	m							
						dspira		0,18	m							
						pspira		0,028575	m							
						Lspira		0,5655	m							
						Nspire, sott		5,7	-	L tot		27,4308	m	Nspire, surr		10,1 -
						Hsott		0,1620	m	H tot		1,3861	m	Hsurr		0,2892 m
		(3/4) (1/2")														
		De 0,01905 0,0127 m														
		sp (sch 5s) 0,00277 0,0028 m														
		Di 0,01351 0,0072 m														
		Apass 143,351 40,264 mm²														
		vel,H2O 0,1281 0,4561 m/s														
		k_{scale} solido 2 W/(m °C)														

3 Conclusioni

Le attività sono state svolte compatibilmente con il budget stanziato nel “ Piano Annuale di realizzazione 2013”. In particolare dopo aver condotto una indagine di mercato sulle possibili turbine disponibili, in collaborazione con l’Università RM3, si è provveduto all’acquisto di una microturbina da 1,5 kW, alla progettazione del circuito vapore di alimentazione della stessa e alla progettazione di un nuovo generatore di vapore a sali fusi in grado di produrre il vapore con le caratteristiche richieste dalla turbina.

La prosecuzione delle attività riguarderà: l’approvvigionamento e montaggi dei componenti individuati e necessari alla realizzazione del circuito vapore, installazione della turbina e commissioning del circuito; approvvigionamento del nuovo generatore di vapore, montaggio sull’impianto e commissioning; definizione della matrice sperimentale e esecuzione prove; analisi dei risultati.

4 Riferimenti bibliografici

1. G. Chiatti, F. Palmieri, (Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre), “STUDIO E PROGETTAZIONE DI IMPIANTI DI COGENERAZIONE INNOVATIVI DI PICCOLA TAGLIA ALIMENTATI DA SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO A SALI FUSI DI IMPIANTI SOLARI A CONCENTRAZIONE”, Settembre 2013, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2012
2. G. Chiatti, F. Palmieri, M. Amalfi, (Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre), “STUDIO E PROGETTAZIONE DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE DI PICCOLA TAGLIA CON TURBINA A VAPORE ALIMENTATA DA SISTEMI DI ACCUMULO A SALI FUSI DI IMPIANTI SOLARI A CONCENTRAZIONE - PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI UN IMPIANTO DIMOSTRATIVO CON MICROTURBINA”, Settembre 2014, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2013