



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

BIOENERGIE AL 2020 : LA RICERCA ENEA

FORLENER 2013 • POLO FIERISTICO VERCELLI FIERE • CARESANABLOT (VC)

27 SETTEMBRE 2013

PROSPETTIVE SULL'UTILIZZO DI CALDAIE E CICLI RANKINE INNOVATIVI

Vincenzo Gerardi

ENEA

FORLENER'13
FORESTA_LEGNO_ENERGIA



L' Accordo di Programma MSE-ENEA prevede attività in

6

Aree
di
ricerca

Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Sono stati svolti **progetti di ricerca** relativi alle seguenti tecnologie:

- **Fonti rinnovabili**
- Utilizzo pulito dei combustibili fossili e CCS
- Nucleare
- Efficienza energetica negli usi finali



Produzione elettrica locale da biomasse e scarti

Le attività sono articolate in tre specifiche linee di sviluppo di sistemi:

- a) di produzione di biocombustibili
- b) **di abbattimento dei contaminanti e upgrading dei biocombustibili**
- c) **di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi**



b. Abbattimento dei contaminanti

b.7 Sviluppo, realizzazione e verifiche di funzionalità di sistemi di filtrazione ceramici per la rimozione del particolato fine (< 10 micron) presente nelle emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida



Principali collaborazioni	Attività
Università di Salerno - Dipartimento di Ing. Industriale	Sviluppo di sistemi catalitici per il clean-up di biocombustibili e riduzione dell'impatto ambientale
FN S.p.A. Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati	Sviluppo e caratterizzazione di supporti ceramici per l'upgrading del syngas e la riduzione di inquinanti gassosi prodotti dalla combustione di biomassa solida

c. Produzione dell'energia elettrica o cogenerativa

c.1 Caldaia a biomassa con fluido termovettore costituito da sali fusi ad elevata temperatura

Principali collaborazioni	Attività
Università di Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria	Studio dei parametri progettuali per la realizzazione di caldaie a sali fusi alimentate con biomasse lignocellulosiche

c.2 Produzione di energia elettrica basata sull'impiego di fluidi motori in grado di operare a temperature massime superiori a quelle in uso

Principali collaborazioni	Attività
Politecnico di Milano - Dipartimento di Energia	Definizione e studio di fluidi organici o loro miscele in grado di operare a temperature massime superiori a quelle attualmente in uso e valutazione dei cicli termodinamici

Caldaia a biomassa con fluido termovettore costituito da sali fusi ad elevata temperatura



Sali fusi (miscela eutettica ternaria) come vettore termico

Intervallo di temperatura 200 – 500 ° C

Portata di sali ≈ 11 kg/s (5 MW_{th})

Caldaia a biomassa

Intervallo di temperatura fumi (900 – 250 ° C)

Portata di fumi ≈ 8 kg/s

Scambiatore di calore

Studio delle diverse architetture («sale nei tubi» , «fumi nei tubi»).

Effetti dell'uso di sali fusi in apparecchiature di scambio termico (svuotamento, solidificazione).

Elevata differenza fra le portate volumetriche (fumi 22 m³/s; sali 0,0045 m³/s).

1. Modellazione delle caratteristiche dei fluidi

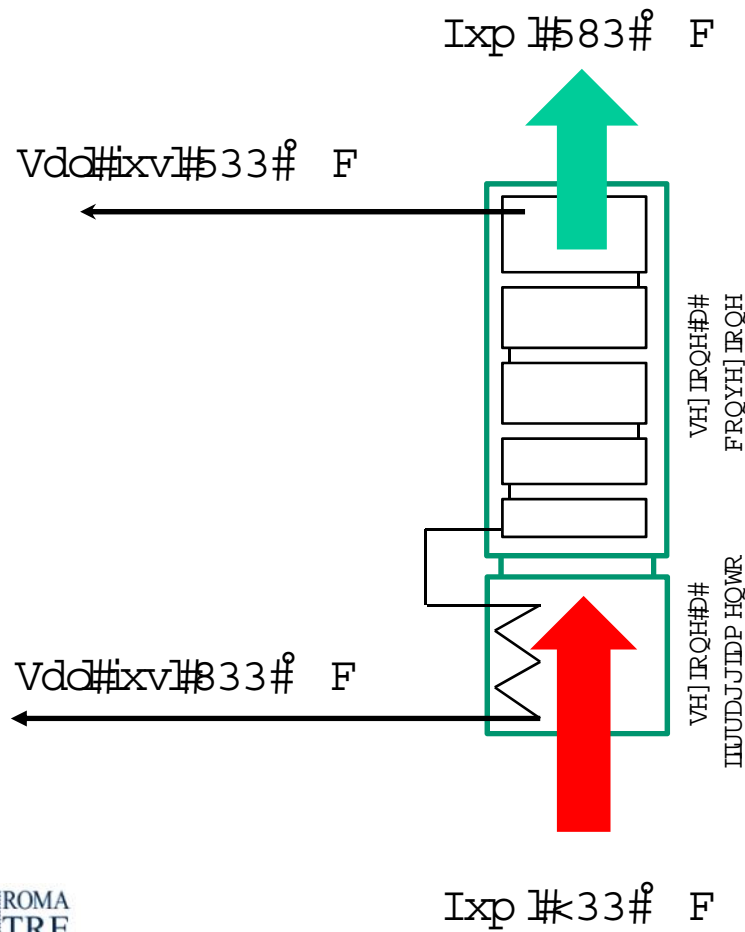
2. Modellazione dello scambio termico all'interfaccia

3. Dimensionamento e affinamento della geometria

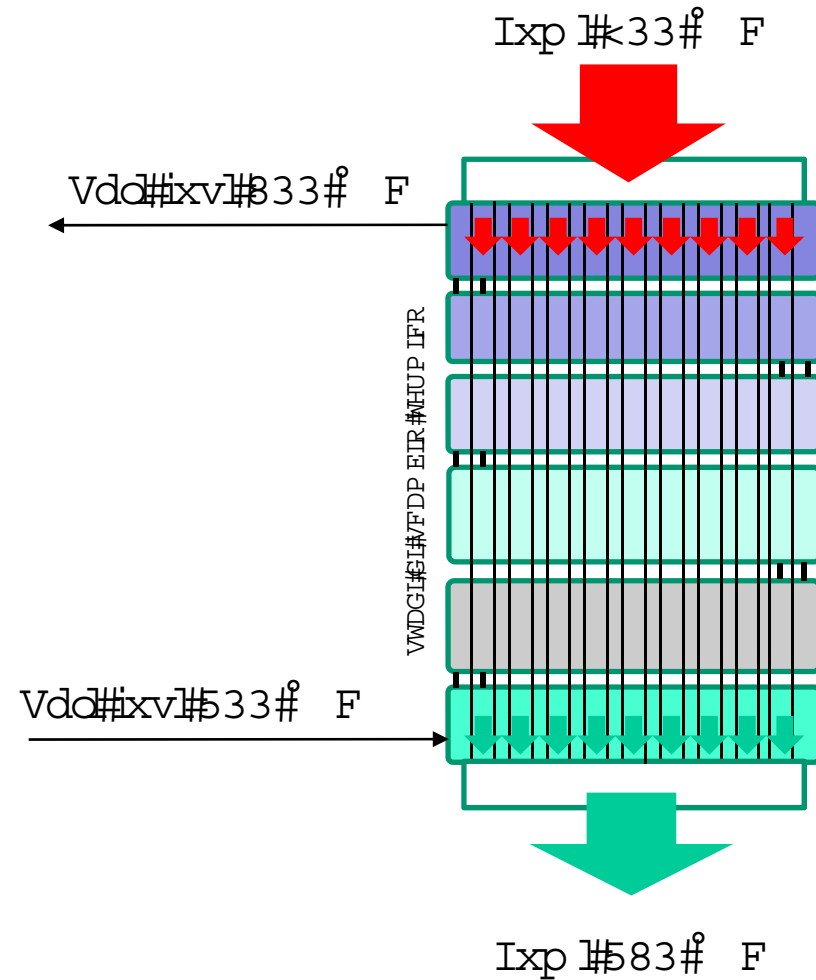
Scambio termico fumi-sali



Sali nei tubi



Fumi nei tubi



Dimensionamento preliminare:

- Temperature imposte, valutazione coefficiente di scambio termico globale e stima della superficie di scambio termico (assetto in controcorrente)

Verifica e affinamento progettuale:

- Simulazione dello scambiatore in ambiente di calcolo *AMESim*[®]
- Verifica della superficie di scambio termico (ϵ -NTU)
- Affinamento dell'architettura e suddivisione nelle sezioni radiativa e convettiva
- Affinamento della stima delle superfici di scambio termico mediante modellazione a più blocchi
- Valutazione della sezione di scambio convettivo in configurazione cross flow
- Calcolo delle perdite di carico nelle sezioni di interesse del circuito sali (dimensionamento tubazione e pompe)
- Valutazione parametrica delle prestazioni lato sale al variare della temperatura di ingresso dei fumi (campo 900 ° C – 800 ° C)

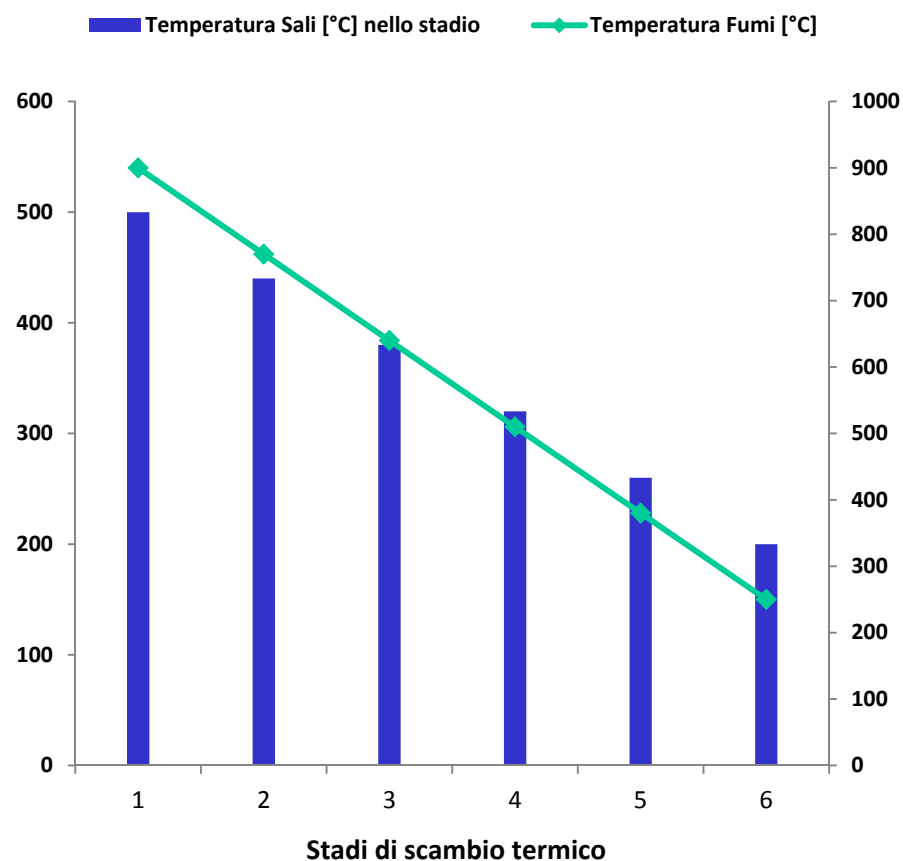
Architettura "Batch" con sezioni a salti di temperatura

Fase di dimensionamento preliminare:

- Temperature imposte, valutazione coefficiente di scambio termico globale e stima della superficie di scambio termico (assetto in controcorrente)

Fase di verifica e affinamento progettuale:

- Simulazione dello scambiatore in ambiente *AMESim*[®] con modellazione dettagliata delle caratteristiche dei fluidi
- Studio dettagliato dell'architettura lato mantello, suddivisione in stadi, passaggi
- Necessaria valutazione del campo termo-fluidodinamico con analisi 3D-CFD



Cicli termodinamici e fluidi di lavoro innovativi ad alta temperatura



Quesiti:

- Quali sono le condizioni di fattibilità di un sistema innovativo cogenerativo di taglia non superiore a 1 MWe abbinabile ad una sorgente termica a sali fusi a temperatura di almeno 450°C ?
- Quali sono i vantaggi ottenibili, sia in termini energetici che economici?

Report RdS/2013/178



Nella famiglia dei perfluorocarburi si distingue un fluido di formula bruta $C_{11}F_{20}$ (FLUTEC PP9), interessante per l'applicazione ORC per la sua più elevata temperatura critica rispetto agli altri perfluorocarburi.

Sostanza:

- I. non rischiosa, per quanto riguarda le misure di primo soccorso e di rilascio accidentale,**
- II. non infiammabile,**
- III. non solubile in acqua ed anche**
- IV. non prontamente biodegradabile.**

Temperatura di decomposizione è maggiore di 400 ° C.

Costo del fluido per almeno 4 tonnellate è stimato pari a 175 €/kg.

Tempo di consegna di 12 mesi dalla ricezione dell'ordine.

Ciclo termodinamico – PP9



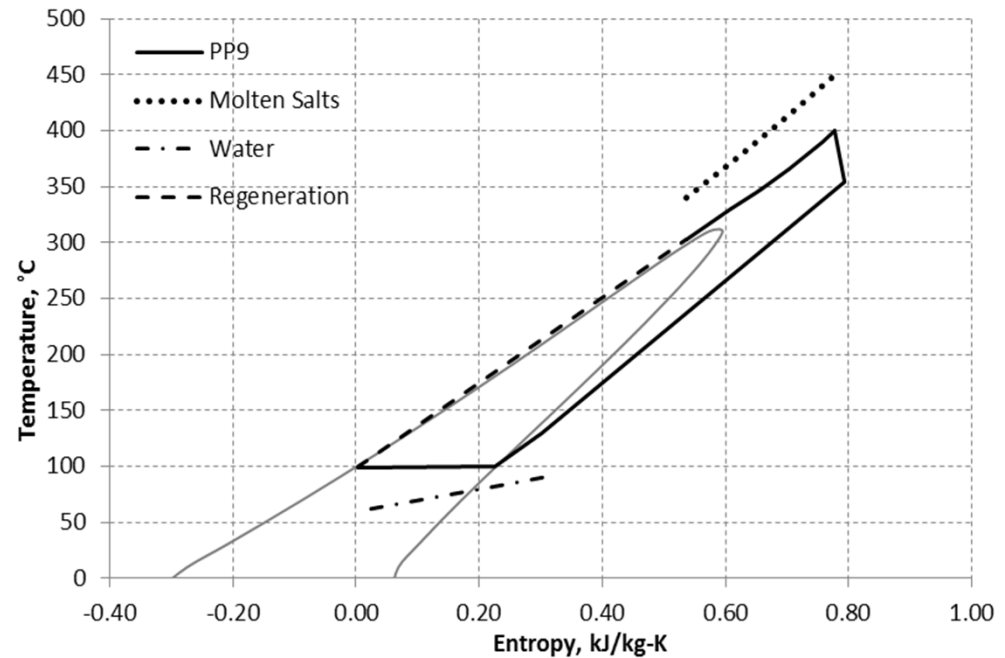
Caratterizzazione Impianto

Variabili indipendenti

P Max	bar	25
T Max	° C	400
T max Sali	° C	450
T min sali	° C	340

Variabili dipendenti

η_{el} Ciclo, lordo	%	24,86
η_{el} Ciclo, netto	%	22,65
Tout Rig	° C	302,85
ΔT hot Rig	° C	223,82
ΔT cold Rig	° C	202,64
UA Rig	kW/K	190,96
UA Primario	kW/K	99,46
ΔT Primario	° C	37,16
UA Cond	kW/K	122,90
Pot scambiata Rig	kW	7381,57
(Vout/Vin)turb	-	225,02
Δh is, turb	kJ/kg	49,11



Fluidi considerati – Tetracloruro di titanio TiCl_4



Alogenuro usato per produrre titanio puro, come catalizzatore per la produzione di polipropilene e polietilene e nell'industria dell'elettronica.

Al contatto con aria umida emette acido cloridrico e (ii) reagisce violentemente con acqua generando calore e fumi contenenti acido cloridrico.

Comunque il TiCl_4 è ampiamente diffuso e non mancano corsi organizzati per la formazione del personale addetto.

La stabilità termica non costituisce un problema, in quanto nella produzione del titanio si prevedono temperature di oltre 800°C per alcune ore.

Costo del fluido per almeno 4 tonnellate è di circa 2,5 €/kg.

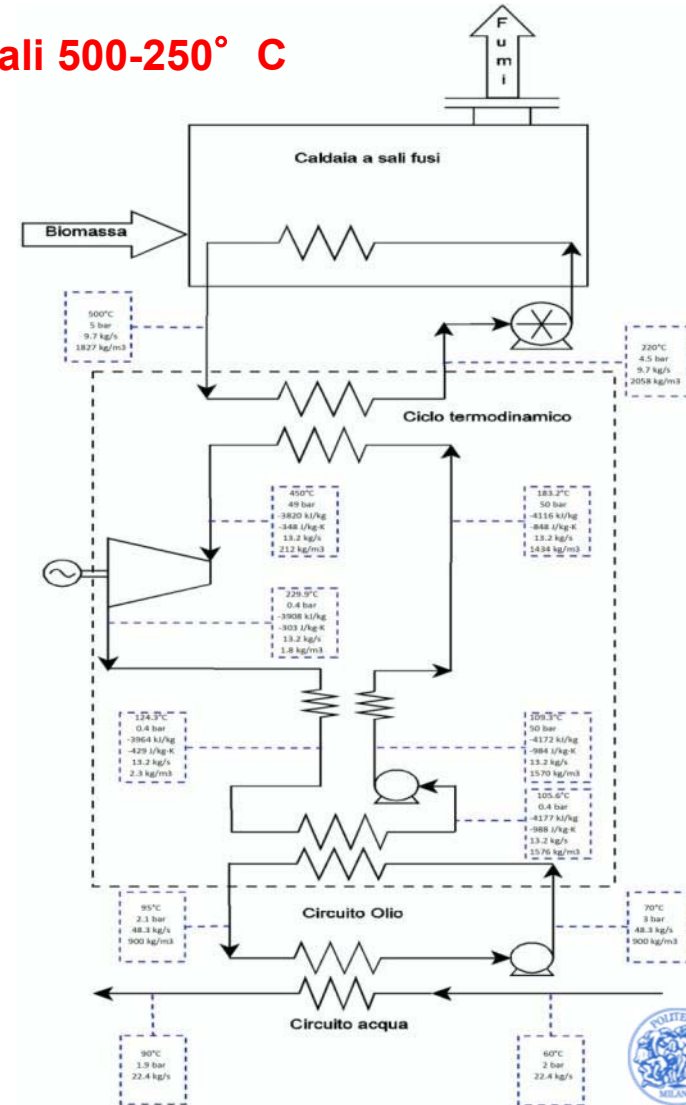
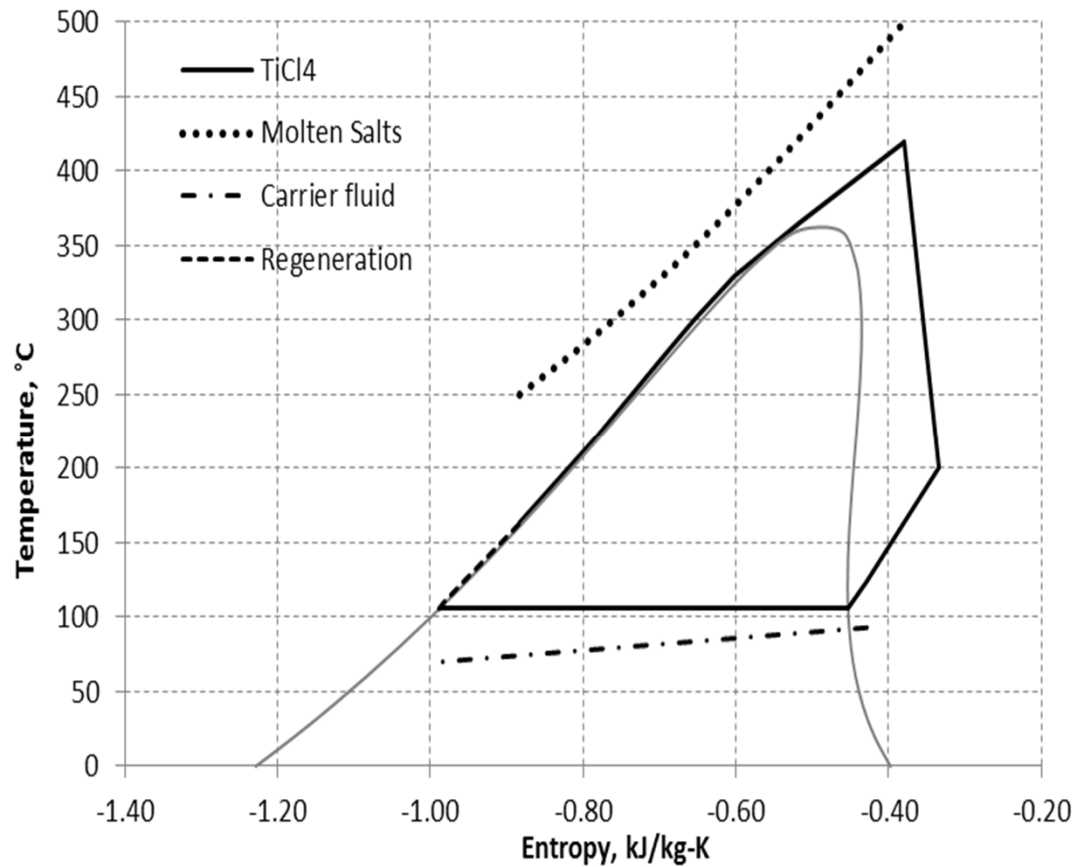
Tempo di consegna di 6 settimane dalla ricezione dell'ordine.



Schema Impianto e bilanci di massa $TiCl_4$



Caso 50 bar, 450° C; temperatura sali 500-250° C



Ciclo termodinamico – TiCl₄

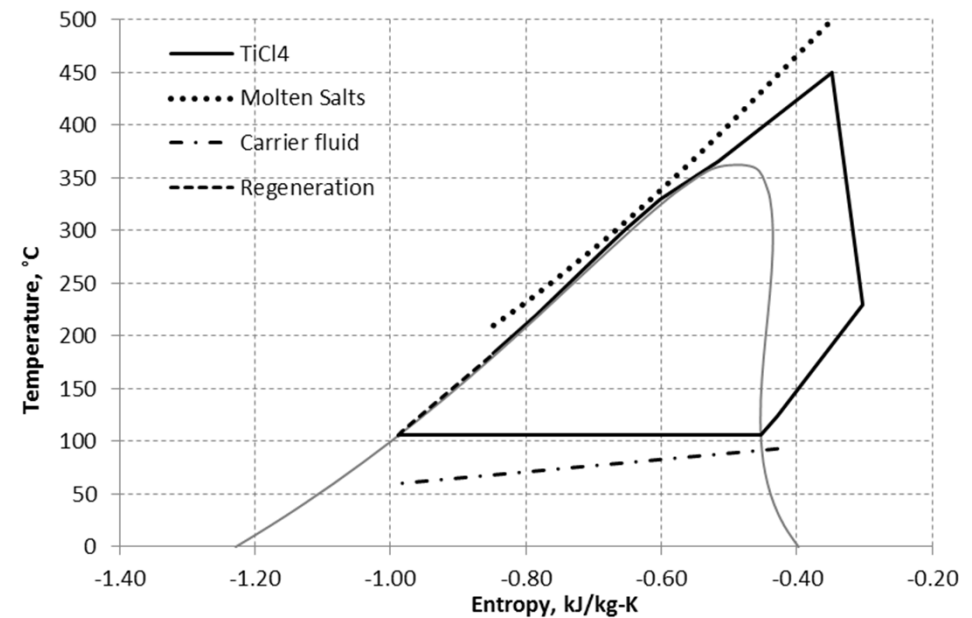
Caratterizzazione Impianto

Variabili indipendenti

P Max	bar	50
T Max	° C	450
T Max Sali	° C	500
T min sali	° C	210

Variabili dipendenti

η_{el} Ciclo, lordo	%	29,62
η_{el} Impianto (netto)	%	25,60
Tout Rig	° C	183,21
ΔT hot Rig	° C	105,60
ΔT cold Rig	° C	73,96
UA Rig	kW/K	27,01
UA Primario	kW/K	247,62
ΔT Primario	° C	7,2
UA Cond	kW/K	104,13
Pot scambiatori Rig	kW	751,87
(Vout/Vin)turb	-	116,25
Δh is, turb	kJ/kg	109,38



Ciclo termodinamico – Vapor d'acqua



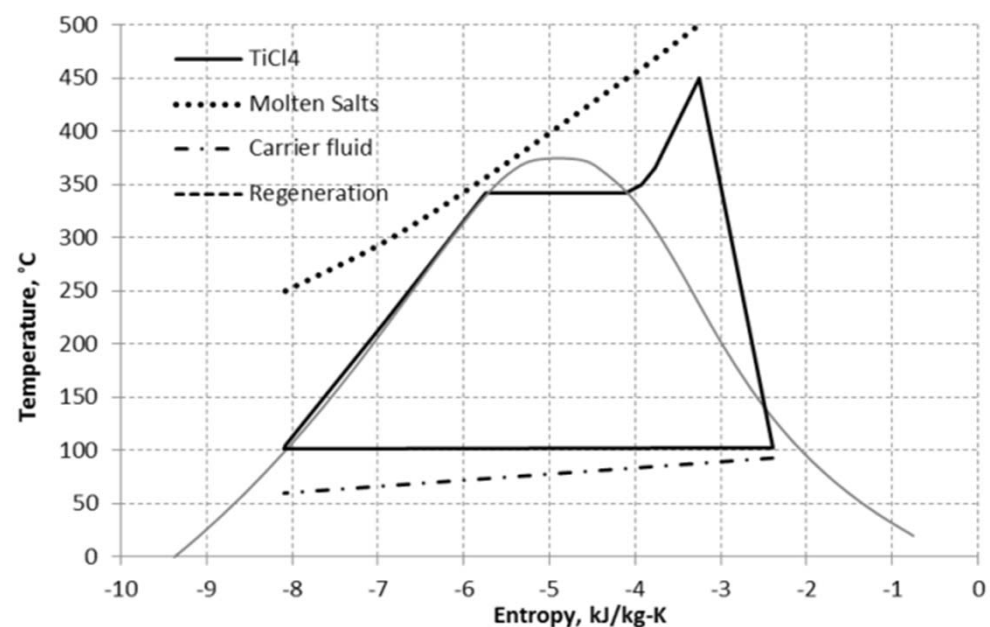
Caratterizzazione Impianto

Variabili indipendenti

P Max	bar	150
T Max	°C	450
T max Sali	°C	500
T min sali	°C	250

Variabili dipendenti

P turbina	kWe	1045.8
P pompa	kWe	45.8
P pompa Sali	kWe	5.46
P ausiliari caldaia	kWe	96.6
P netta impianto	kWe	898.0
Q in ciclo	kW	5150
Q biomassa	kWLHV	6438
Q utile	kW	4056
η Ciclo lordo	%	22.07
η nel Ciclo lordo	%	20.31
η nel Ciclo netto	%	19.42
η nel lordo impianto	%	16.24
η nel netto impianto	%	13.95
η th Impianto	%	63.00
η globale Impianto	%	76.95
UA Primario	kW/K	101.32
ΔT Primario	°C	14.7
UA Cond	kW/K	187.78
(Vout/Vin)turb	-	76.88
Δh is, turb	kJ/kg	923.17



Stima costo energia elettrica - Fluido $TiCl_4$



Dati impianti:					
Pressione max, bar	50	50	50	50	50
Temperatura max, ° C	450	420	400	450	400
Temperatura max sali, ° C	500	500	500	500	500
Temperatura min sali, ° C	250	200	200	210	200
Potenza netta ciclo, kW _e	1000	1000	1000	1000	200
Bilancio annuale					
Consumo biomassa, MWh/a	29301	31115	32738	29301	6548
EE prodotta, MWh/a	5758	5735	5708	5762	1142
Q prodotto, MWh/a	7023	7625	8164	7023	1633
C inv totale, €/kW	7409	8010	7991	8607	13838
C O&M fissi, k€/a	21	21	22	21	4
C biomassa, k€/a	253	268	282	253	56
C ricarica fluido, k€/a	2	2	1	8	1
Ricavo vendita calore, k€/a	211	229	245	211	49
Costo energia elettrica, €/MWh_e					
C inv	153	165	165	177	285
C O&M fissi	4	4	4	4	4
C biomassa	44	47	49	44	49
C fluido	0,2	0,2	0,1	1,2	0,5
Ricavo vendita calore	37	40	43	37	43
C energia elettrica	164	176	175	189	296



Cicli termodinamici e fluidi di lavoro innovativi ad alta temperatura



Si è identificato un potenziale fluido di lavoro (TiCl_4), che, oltre a offrire la stabilità termica a temperature molto elevate e ad avere costi estremamente contenuti, presenta caratteristiche termodinamiche (punto critico, complessità molecolare, massa molecolare) ideali per l'accoppiamento con la sorgente termica considerata.

Si è identificato uno schema d'impianto, che prevede l'adozione di un ciclo di potenza ipercritico e un circuito intermedio ad olio fra il tetracloruro di titanio e l'acqua destinata al teleriscaldamento

Si è effettuato un pre-dimensionamento dei principali componenti d'impianto, che ha dato luogo a risultati promettenti:

- Una turbina a tre stadi, poco sollecitata meccanicamente e di buon rendimento fluidodinamico.
- Scambiatori di calore di dimensioni contenute, con una soluzione innovativa per il recuperatore di calore.

Si vuole sottolineare come l'uso del fluido scelto, mai proposto in cicli di potenza, richiede precauzioni particolari: in particolare, va totalmente eliminata la possibilità di contatti fra fluido e acqua (circuito intermedio a olio).



Grazie per l'attenzione

ing. Vincenzo Gerardi

**ENEA - C.R. Casaccia
Via Anguillarese, 301
00123 Roma**

Tel. 0630483529

e-mail: vincenzo.gerardi@enea.it

