



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102016000050972
Data Deposito	18/05/2016
Data Pubblicazione	18/11/2017

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
F	01	K	23	10

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
F	01	K	25	06

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
F	01	K	25	08

Titolo

IMPIANTO A CICLO RANKINE ORGANICO COGENERATIVO

IMPIANTO A CICLO RANKINE ORGANICO COGENERATIVO

DESCRIZIONE

Settore tecnico dell'invenzione

5 La presente invenzione è relativa ad un impianto a ciclo Rankine organico (ORC) cogenerativo le cui caratteristiche peculiari consentono di ottenere un elevato rendimento di primo principio per la produzione di vapore ad alta temperatura saturo o surriscaldato attraverso il calore di condensazione del fluido organico.

10 Tecnica nota

 Com'è noto, si definisce ciclo termodinamico una successione finita di trasformazioni termodinamiche (ad esempio isoterme, isocore, isobare o adiabatiche) al termine delle quali il sistema torna al suo stato iniziale. In particolare, un ciclo Rankine ideale è un ciclo termodinamico composto da due trasformazioni adiabatiche e due isobare, con due cambi di fase: 15 da liquido a vapore e da vapore a liquido. Il suo scopo è quello di trasformare il calore in lavoro. Questo ciclo è in genere adottato soprattutto nelle centrali termoelettriche per la produzione di energia elettrica ed utilizza come fluido motore l'acqua, sia in forma liquida che 20 sotto forma di vapore, con la cosiddetta turbina a vapore.

 Più specificamente, sono stati ipotizzati e realizzati cicli Rankine organici (ORC) che utilizzano fluidi organici ad alta massa molecolare per le applicazioni più diverse, in particolare anche per lo sfruttamento di sorgenti termiche a bassa-media entalpia. Come in altri cicli a vapore, 25 l'impianto per un ciclo ORC comprende una o più pompe per

l'alimentazione del fluido organico di lavoro, uno o più scambiatori di calore per realizzare le fasi di preriscaldamento, vaporizzazione ed eventuale surriscaldamento o di riscaldamento in condizioni supercritiche del medesimo fluido di lavoro, una turbina o un espansore volumetrico per
5 l'espansione del fluido, meccanicamente connessa ad un generatore elettrico o ad una macchina operatrice, un condensatore che riporta il fluido organico allo stato liquido ed un eventuale rigeneratore per recuperare il calore a valle della turbina e a monte del condensatore.

E' altresì noto il processo di cogenerazione che contempla la
10 produzione contemporanea di energia meccanica (solitamente trasformata in energia elettrica) e di calore. Il calore prodotto è utilizzabile, ad esempio, per riscaldamento o teleriscaldamento di edifici e/o per processi produttivi-industriali. La cogenerazione utilizza sistemi di generazione tradizionali, motori a combustione interna, turbine a vapore d'acqua,
15 turbine a gas, cicli combinati e cicli ORC.

I motori alternativi a combustione interna, gli impianti con turbine a gas o con turbine a vapore mostrano i loro limiti in caso di cogenerazione ad alta temperatura. Nel seguito per cogenerazione ad alta temperatura si intenderà la produzione di vapore, acqua, aria o qualsiasi altra sostanza
20 liquida o gassosa, ad una temperatura superiore a 120°C (corrispondente alla temperatura di saturazione dell'acqua a circa 2 bar). In particolare, negli esempi numerici seguenti, la cogenerazione prevede la produzione di vapore saturo a circa 12 bar, ossia 190°C. La figura 1 mostra i bilanci di energia tipici per motori alternativi a combustione interna ICE, impianti
25 con turbina a gas TG e impianti con turbina a vapore TV. Partendo da un

contenuto energetico del 100% del combustibile, la figura rappresenta le percentuali dell'energia elettrica e dell'energia termica (vapore o acqua calda) ottenute dal rispettivo "motore" e le relative perdite, comprendenti anche il contenuto termico a bassa temperatura, non utilizzabile nell'impianto cogenerativo e quindi rilasciato in varia forma all'ambiente. A titolo esemplificativo, come mostrato in figura 1, un motore alternativo a combustione interna utilizzando gas naturale da circa 1.5 MW trasforma l'energia contenuta nel combustibile in energia elettrica per il 44%, in vapore saturo (a circa 190°C) per il 18%. Nel complesso, si ha un rendimento di primo principio (inteso come il rapporto fra la somma di energia elettrica e calore ad alta temperatura contenuto nel vapore saturo, prodotti dall'impianto, e l'energia entrante come energia chimica del combustibile impiegato) pari al 62%. Per completezza di esposizione si fa notare che la percentuale indicata come perdite ("Losses") ricomprende sia le perdite propriamente dette, sia la quota parte di calore a bassa temperatura non utilizzabile nell'impianto.

Una turbina a gas di pari potenza elettrica, alimentata da gas naturale, trasforma il 28% dell'energia del combustibile in energia elettrica e il 50% in energia termica ad alta temperatura (vapore saturo a circa 190°C). Quindi il rendimento di primo principio per la produzione di energia elettrica e calore ad alta temperatura è pari al 78%.

Ci sono processi industriali, in particolare nelle industrie manifatturiere, ad esempio quelli tipici delle cartiere o delle industrie alimentari, caratterizzati da un'elevata richiesta di energia termica ad alta temperatura, rispetto al fabbisogno elettrico, principalmente sotto forma

di vapore (ad esempio a 190°C). In questi casi, il motore a combustione interna che produce una determinata potenza elettrica è così efficiente dal punto di vista elettrico da consentire solo una minima produzione di vapore, non sufficiente a soddisfare l'esigenza termica dell'industria
5 stessa. Come si ricava dalla figura 1, per un'unità di potenza elettrica, il motore alternativo produce circa 0.41 unità termiche sotto forma di vapore a 190°C, la turbina a gas ne produce 1.79. Per le applicazioni sopra menzionate sarebbe necessario un valore decisamente più elevato.

Una possibile alternativa è rappresentata da un tradizionale ciclo
10 Rankine a vapore d'acqua, che si posiziona ulteriormente a favore della produzione di vapore ad alta temperatura, poiché, come si evince dalla figura 1, l'energia del combustibile si trasforma per l'8% in energia elettrica e per l'83% in vapore ad alta temperatura, per un rendimento di primo principio pari al 91%. In questo caso, il rapporto tra potenza ad alta
15 temperatura e potenza elettrica è pari a 10.4. Impianti a vapore di taglia medio-piccola sono però poco efficienti dal punto di vista elettrico (come evidenziato dal rapporto sopra indicato fin troppo elevato) e comportano spese di installazione e manutenzione nettamente più alte di un analogo impianto ORC.

20 Anche gli impianti ORC rappresentano una tecnologia consolidata nel campo cogenerativo: il calore estratto al condensatore è sfruttato tipicamente per produrre acqua calda a 60-80°C. Un ORC alimentato da biomasse da circa 1.5 MW elettrici lordi in assetto cogenerativo può raggiungere un rendimento elettrico del 16% rispetto alla potenza del
25 combustibile; la potenza termica scaricata all'acqua del condensatore

(60/80°C) è pari al 70%. Di solito l'ORC è alimentato con un circuito ad olio diatermico (ad esempio, Therminol 66), che può resistere ad una temperatura massima di bulk di 345°C; a sua volta i fluidi organici tradizionalmente utilizzati (ad esempio, silossani e idrocarburi) possono
5 lavorare al massimo fino a circa 300°C. Oltre queste temperature l'olio e i fluidi organici vanno incontro a degradazione termochimica.

Per produrre vapore saturo a 190°C utilizzando il calore scaricato dal condensatore di un ORC convenzionale, il rendimento elettrico del ciclo sarebbe fortemente condizionato dalla piccola differenza di temperatura
10 tra la sorgente calda (circa 300°C) e quella fredda (circa 190°C).

Inoltre, l'olio diatermico e i fluidi organici solitamente impiegati in impianti ORC a biomassa potrebbero non essere adatti a recuperare calore in modo efficiente da fumi a temperature più elevate, come quelli prodotti dalla combustione di gas metano, principale fonte di potenza termica per
15 le industrie.

Esiste pertanto l'esigenza di definire un impianto a ciclo Rankine organico adatto alla cogenerazione di energia ad alta temperatura e privo degli inconvenienti menzionati.

Sintesi dell'invenzione

20 Scopo della presente invenzione è quindi un impianto a ciclo Rankine organico cogenerativo in grado di rilasciare un'elevata potenza termica ad alta temperatura, preferibilmente producendo vapore d'acqua tra 2 e 50 bar, con un elevato rendimento di primo principio, un buon rendimento elettrico e una produzione elevata di unità termiche (valori

intorno a 5.5, per produzione di vapore saturo a 190°C) per un'unità di potenza elettrica.

Secondo la presente invenzione è, quindi, descritto un impianto a ciclo Rankine organico cogenerativo avente le caratteristiche enunciate
5 nella rivendicazione indipendente annessa.

Ulteriori modi di attuazione del suddetto metodo, preferiti e/o particolarmente vantaggiosi, sono descritti secondo le caratteristiche enunciate nelle rivendicazioni dipendenti annesse.

Breve descrizione dei disegni

- 10 L'invenzione verrà ora descritta con riferimento ai disegni annessi, che ne illustrano alcuni esempi di attuazione non limitativi, in cui:
- la figura 1 mostra il bilancio di energia per motori alternativi, cicli a gas e cicli a vapore;
 - la figura 2 mostra un diagramma temperatura potenza di un
15 impianto ORC cogenerativo secondo la presente invenzione per vapore saturo generato a 12 bar;
 - la figura 3 rappresenta il bilancio di energia di un impianto ORC cogenerativo secondo la presente invenzione;
 - la figura 4 rappresenta uno schema di un impianto ORC
20 cogenerativo secondo la presente invenzione in cui la portata dell'olio al preriscaldatore è solo una frazione della totale;
 - la figura 5 rappresenta il diagramma temperatura potenza dell'impianto ORC di Fig. 4;
 - la figura 6 rappresenta lo schema di un impianto ORC cogenerativo
25 secondo una forma di attuazione alternativa della presente invenzione;

- la figure 7a e 7b rappresentano uno schema di un impianto ORC cogenerativo con un ulteriore schema di recupero;
- la figura 8 raffigura un impianto ORC cogenerativo a scambio diretto con evaporazione flash
- 5 - la figura 9 rappresenta una soluzione intermedia tra schema tradizionale con circuito intermedio ad olio diatermico e schema a scambio diretto;
- la figura 10 è un impianto ORC cogenerativo con ciclo a vapore in cascata;
- 10 - la figura 11 riporta un ulteriore schema, con circuito ad olio termovettore e due cicli ORC in cascata;
- la figura 12 mostra uno schema esemplificativo per fermata calda,
- la figura 13 rappresenta uno schema di un impianto ORC cogenerativo, secondo un differente aspetto della presente invenzione,
- 15 - la figura 14 è una prima forma di attuazione di un condensatore di un impianto ORC cogenerativo,
- la figura 15 è una seconda forma di attuazione di un condensatore di un impianto ORC cogenerativo.

Descrizione dettagliata

- 20 Facendo ora riferimento alle suddette figure ed in particolare alla figura 4, un impianto a ciclo Rankine organico (ORC) 10 è indicato nel suo complesso. Esso tipicamente comprende almeno una pompa di alimentazione 1 per alimentare un fluido organico di lavoro, in fase liquida, ad almeno uno scambiatore di calore 2. Nello scambiatore di
- 25 calore, che può a sua volta comprendere un preriscaldatore 21, un

evaporatore 22 ed un surriscaldatore (non mostrato in Fig. 4), il fluido organico è riscaldato fino alla sua trasformazione in fase di vapore e ad un suo eventuale surriscaldamento. All'uscita dello scambiatore di calore il vapore attraversa una turbina di espansione 3 producendo il lavoro
5 prodotto lordo del ciclo Rankine organico, che diviene lavoro utile una volta che sia dedotto il lavoro assorbito per l'azionamento degli ausiliari (pompe, ventilatori, centraline idrauliche, ...). Tale lavoro utile è un lavoro meccanico raccolto all'albero della turbina che è solidalmente connesso con una macchina elettrica. Il fluido di lavoro attraversa, infine, un
10 condensatore 5 che lo riporta in fase liquida per essere inviato dalla pompa 1 nuovamente allo scambiatore di calore. Vantaggiosamente, per aumentare il rendimento del ciclo, tra la turbina 3 ed il condensatore 5, può essere inserito un recuperatore di calore 6, ovvero uno scambiatore di calore che scambia calore tra il fluido organico in fase di vapore che dalla
15 turbina 3 è diretto verso il condensatore 5 ed il fluido organico in fase liquida che dalla pompa 1 è pompato verso lo scambiatore di calore 2.

Per le applicazioni cogenerative ad alta temperatura (produzione di vapore saturo a circa 190°C), come si può notare in tabella 1, la soluzione di un impianto a ciclo Rankine organico ORC secondo la presente
20 invenzione mostra un rapporto tra unità termiche prodotte ad alta temperatura ed unità elettriche più favorevole per un gran numero di utilizzatori industriali.

Evidentemente se un'industria avesse bisogno di produzione elettrica elevata rispetto a quella termica ad alta temperatura, lo scenario
25 di convenienza si ribalterebbe a favore delle soluzioni che hanno maggiori

rendimenti elettrici, come il motore alternativo o la turbina a gas.

Al contrario, in molte industrie alimentari e di processo un'eccessiva produzione elettrica (eccessiva perché superiore ai bisogni interni) non è auspicabile.

- 5 Nei casi in cui il consumo di potenza termica sia decisamente prevalente rispetto al consumo di potenza elettrica, l'elevato rendimento di primo principio raggiunto dal sistema oggetto del presente brevetto è particolarmente vantaggioso per l'utente finale. Per contro la soluzione con turbina a vapore, a pari rendimento di primo principio rispetto alla
- 10 soluzione ORC, presenta un rapporto tra potenza termica e potenza elettrica fin troppo elevato (circa il doppio che nel caso ORC), ossia consente una produzione elettrica circa la metà a pari potenza termica fornita, valore eccessivamente basso rispetto alle esigenze di numerose industrie.

15 Tabella 1

	P termica / P elettrica	Rendimento di primo principio
Motore alternativo	0.41	66%
TG	1.79	78%
ORC	5.5	91%
TV	10.4	91%

- Perché l'impianto ORC possa lavorare efficacemente in condizioni di cogenerazione di energia ad alta temperatura occorre che, in primo luogo, il fluido organico di lavoro o l'olio diatermico (se si utilizza un fluido termovettore in un circuito intermedio tra la sorgente di calore, - ad
- 20 esempio, fumi di combustione - ed il ciclo ORC), abbiano una stabilità termochimica sufficientemente elevata. Ad esempio, la miscela eutettica di difenile e ossido di difenile, nota col nome commerciale Therminol ®

VP-1 ovvero Dowtherm A ®, può raggiungere una temperatura di bulk di 400°C ed è quindi adatto a ricevere calore in una caldaia a gas naturale. Altri possibili fluidi vettori di calore sono a base di fenili, terfenile, quadrifenile, silossani, idrocarburi aromatici alchilati, fenilcicloesano, bicicloesile, perfluoropolietteri (PFPE), sali fusi o miscele di essi.

La miscela di difenile e ossido di difenile può essere vaporizzata ed essere quindi scelta come fluido organico di lavoro dell'ORC. Altri fluidi organici resistenti ad alta temperatura ed adatti all'impiego come fluidi di lavoro sono toluene, difenili, terfenile, quadrifenile, idrocarburi lineari, silossani, idrocarburi aromatici alchilati, fenilcicloesano, bicicloesile, perfluoropolietteri e miscele di essi. Alcuni esempi di nomi commerciali sono SYLTHERM® e HELISOL® 5A (polidimetilsilossani o miscele di silossani), Therminol ® LT (idrocarburi aromatici alchilati), Therminol ® VP-3 (miscela di fenilcicloesano e bicicloesile).

Inoltre, perché la cogenerazione sia efficace, l'impianto ORC dovrà essere caratterizzato da temperature di condensazione comprese tra 150°C e 250°C e da pressioni di condensazione comprese tra 50 mbar e 2000 mbar o, più vantaggiosamente tra 50 mbar e 800 mbar.

In figura 2 è riportato un ciclo Rankine organico che utilizza Therminol ® VP-1 come fluido organico di lavoro per una macchina da 1.5 MW, in cui anche il circuito intermedio ad olio è realizzato con Therminol ® VP-1. Il calore di condensazione è utilizzato per produrre 10 ton/h di vapore leggermente surriscaldato a 12 bar.

La figura 3 rappresenta il bilancio di energia di un caso di impianto ORC secondo la presente invenzione. Da questa figura si evince che il

14% dell'energia del combustibile è convertita in energia elettrica, mentre il 77% diventa energia termica ad alta temperatura, ottenendosi così un rapporto tra unità termiche prodotte ad alta temperatura ed unità elettriche pari a 5.5. Si fa osservare che anche in questa figura (così come
5 in Fig. 1) la percentuale indicata come perdite ("Losses") ricomprende sia le perdite propriamente dette, sia la quota parte di energia termica di calore a bassa temperatura non utilizzabile e quindi ceduta all'ambiente.

Preferibilmente, un ciclo ORC ad alta efficienza e con cogenerazione ad alta temperatura si realizza mediante fluidi di lavoro
10 caratterizzati da un rapporto tra la temperatura critica T_c e la temperatura di evaporazione T_v (entrambe espresse in Kelvin) compreso all'incirca tra 0.7 e 0.95.

In alcuni casi, se la temperatura critica è relativamente bassa, ad esempio qualora si utilizzi toluene come fluido organico di lavoro (nel caso
15 del toluene la temperatura critica T_c è pari a 318°C), può essere conveniente realizzare cicli supercritici secondo un ulteriore aspetto della presente invenzione.

Qualora il fluido termovettore e il fluido organico di lavoro dell'ORC coincidano, come nel caso del Therminol ® VP-1, si ottengono diversi
20 vantaggi. Infatti, può essere conveniente realizzare un unico serbatoio di reintegro o di drenaggio in caso di manutenzione; si può inoltre scaricare lo sfiato dei gas incondensabili del circuito termovettore nel condensatore, dove già opera il sistema di estrazione dei gas incondensabili del circuito ORC, oppure utilizzare lo stesso sistema del circuito ORC anche per il
25 circuito intermedio, creando così un circuito in parallelo. I gas

incondensabili da espellere possono essere trattati con opportuni sistemi, ad esempio sistemi a carboni attivi.

Con riferimento alla già menzionata figura 4, il ciclo ORC 10 scambia calore con un circuito intermedio 20 all'interno del quale fluisce un fluido termovettore, ad esempio il Therminol ® VP-1. Il fluido vettore a sua volta è riscaldato dalla sorgente calda 40, ad esempio i fumi di combustione provenienti da una caldaia alimentata da combustibile gassoso (ad esempio, gas naturale, off-gas da processo, associated petroleum gas, syngas, gas da discarica, biogas, tail gas, etc), liquido (ad esempio, olio combustibile, solventi, idrocarburi, etc) e/o solido (biomassa, pellet, carbone, etc). Il circuito intermedio può comprendere una prima porzione 201 ad alta temperatura e posta a monte nel percorso dei fumi e in una seconda porzione 202 a temperatura inferiore e posta a valle nel percorso dei fumi rispetto alla prima porzione. Alternativamente, le due porzioni potrebbero essere invertite (rispetto al flusso dei fumi). Nella prima porzione 201 del circuito intermedio, la piena portata del fluido termovettore attraversa l'evaporatore 22 mentre solo una parte della portata di fluido termovettore fluisce nella seconda porzione 202 attraversando il preriscaldatore 21 del fluido organico di lavoro, come si evince dalla diversa inclinazione delle curve di raffreddamento dell'olio VP-1 nel diagramma temperatura / potenza di figura 5 (linea superiore). Per aumentare il rendimento di caldaia e quindi quello complessivo di primo principio, l'aria comburente 30 è preriscaldata attraverso un ulteriore scambiatore posto a valle di quelli per l'olio diatermico o più in generale del fluido termovettore. Il preriscaldamento dell'aria aumenta l'efficienza del

sistema, ma aumenta la temperatura di fiamma e quindi aumenta l'emissione di ossidi di azoto NOx. Nel caso in cui si debba ridurre il preriscaldamento dell'aria per ridurre di emissioni degli NOx, pur mantenendo un buon rendimento di caldaia (ad esempio, 92%), è
5 possibile realizzare un impianto proprio come mostrato nelle figura 4 e 5 (la figura 5 rappresenta il diagramma temperatura potenza dell'impianto ORC di Fig. 4): l'intera portata di fluido termovettore scambia calore nell'evaporatore 22, poi viene divisa e solo una parte della portata (quella che fluisce nella seconda porzione 202, a più bassa temperatura, del
10 circuito intermedio) attraversa il preriscaldatore 21. Questa soluzione permette di ottenere una temperatura di uscita dell'olio più bassa e di recuperare più potenza dai fumi, riducendo la quota disponibile al preriscaldatore dell'aria 30 a valle. In un'analogia soluzione, l'intera portata di fluido termovettore effettua anche una piccola parte di
15 preriscaldamento.

In figura 6 è mostrata un'altra forma di attuazione che differisce da quella di Fig.4 per il fatto che i fumi di combustione 40 (la sorgente calda) sono suddivisi in due porzioni 401, 402 in parallelo fra loro e l'aria comburente 30 è preriscaldata solo dalla porzione 401 dei fumi.

20 Sono possibili ulteriori e vantaggiose configurazioni. In figura 7a ad esempio, a valle degli scambiatori ad olio, sono presenti due ulteriori recuperi, uno per la produzione di acqua calda 50 (o vapore a bassa pressione) e uno per il preriscaldamento dell'aria 30. Inoltre l'olio fluisce a piena portata solo nell'evaporatore 22 dell'impianto ORC e nella porzione 201
25 del circuito intermedio, mentre gli altri scambiatori sono alimentati con

solo una parte della portata totale, porzione 202 del circuito intermedio. L'impianto ORC è inoltre dotato di uno scambiatore "SPLIT" 23, che riceve una portata ridotta di fluido termovettore, porzione 203 del circuito intermedio, e preriscalda una porzione di fluido organico che esce dal
5 condensatore 5 e bypassa il rigeneratore 6.

L'evaporatore e il preriscaldatore possono essere realizzati come un unico scambiatore 2, come rappresentato in figura 7b. Le portate di fluido organico che si miscelano in uscita allo split 23 e al rigeneratore 6 possono avere la stessa temperatura o temperature diverse.

10 E' possibile anche realizzare un impianto ORC a scambio diretto come in figura 8, in cui il fluido organico di lavoro che realizza il ciclo termodinamico scambia calore direttamente con i fumi della caldaia, senza circuito intermedio. In questo caso, il fluido organico può evaporare direttamente in caldaia oppure rimanere allo stato liquido ed essere
15 vaporizzato mediante un evaporatore a flash 7, come indicato in figura 8; il fatto che il fluido rimanga liquido all'interno della caldaia è un vantaggio perché si controllano e si possono evitare meglio gli aumenti di temperatura localizzati che possono causare problemi di cracking termochimico: lo scambio termico in fase vapore necessiterebbe di
20 utilizzare un maggior numero di passaggi in parallelo con il rischio di cattiva alimentazione di alcuni tubi di scambio termico. Inoltre, si ha una caldaia più compatta, anche se i consumi della pompa aumentano in modo considerevole in quanto l'evaporazione flash è per definizione un punto di forte perdita di carico, in quanto l'evaporazione avviene per mezzo di una
25 laminazione che riduce la pressione.

In figura 9 è mostrato un impianto ORC 110 che rappresenta una soluzione intermedia tra schema tradizionale con circuito intermedio ad olio diatermico e schema a scambio diretto. Evaporatore 22 e preriscaldatore 21 dell'impianto ORC ricevono calore da un circuito intermedio 20, mentre uno scambiatore "SPLIT" 23' scambia direttamente calore con i fumi 40.

In figura 10 si descrive in modo semplificato un'ulteriore variante. L'impianto ORC 10 scambia calore con un circuito intermedio 20, che in questo esempio è tutto a piena portata di olio diatermico. Questa forma di attuazione è caratterizzata dal fatto di prevedere anche un impianto a ciclo Rankine a vapore 60. In pratica il vapore d'acqua è prodotto al condensatore 5 dell'impianto ORC e non solo è utilizzato dall'utenza termica 70, ma attraversa anche il percorso dei fumi 40 provenienti dalla caldaia. In tale zona il vapore da saturo diviene surriscaldato e poi è inviato ad una turbina a vapore per produrre un'ulteriore quota di energia elettrica. Questa soluzione facilita la gestione dello scambio termico che corrisponde alla vaporizzazione, evitando il cambio di fase in superfici riscaldate da fumi ad alta temperatura e può risultare conveniente in presenza di normative che richiedano la presenza di un conduttore patentato nel caso in cui in un ciclo a vapore d'acqua la caldaia a fiamma funzioni da evaporatore. Invece, secondo lo schema di figura 10, il vapore è prodotto recuperando calore dal condensatore dell'ORC ed è poi solo surriscaldato dai fumi di combustione. Pertanto in caldaia non c'è cambio di fase dell'acqua.

In figura 11 è riportato un ulteriore e vantaggioso schema, con

circuito intermedio 20 del fluido termovettore e un impianto ORC 120 con due cicli ORC in cascata. Il primo ciclo 130, ad alta temperatura, preleva calore dal circuito intermedio; il calore di condensazione è sfruttato in parte per produrre vapore ad alta temperatura 150 nello
5 scambiatore/condensatore 5 e in parte per far evaporare il fluido organico di lavoro del secondo ciclo 140 a temperatura inferiore, nello scambiatore/condensatore 5' . Il secondo ciclo ORC 140 prende calore anch'esso dal circuito intermedio 20. A valle del circuito intermedio 20 può essere realizzato un eventuale recupero termico a bassa temperatura 170.

10 Questa configurazione consente di produrre vapore cogenerativo ad alta temperatura e al tempo stesso di mantenere un rendimento elettrico paragonabile ad impianti a ciclo Rankine tradizionale di pari potenza. Per esempio, utilizzando Therminol ® VP-1 come fluido organico di lavoro per il primo ciclo ORC 130 ad alta temperatura e ciclopentano per il secondo
15 ciclo ORC 140 (quello a temperatura inferiore), a valle di una caldaia di potenzialità pari a circa 47 MW, si ottiene una potenza elettrica lorda di circa 11 MW, con rendimento elettrico lordo pari a circa 23%, producendo una portata di vapore di 10 ton/h alla temperatura di 185°C pari a circa 7.7 MW termici. In questo caso il rapporto tra potenza termica ed elettrica
20 è pari a 0.7, con un rendimento di primo principio per la produzione elettrica e di vapore a 185°C del 39%. In questo caso, si ha un rapporto tra potenza termica ed elettrica inferiori rispetto alle soluzioni ORC descritte in precedenza; se però consideriamo un impianto a biomassa, quindi con combustibile solido, i motori alternativi a combustione interna
25 non sono più utilizzabili, pertanto l'unica alternativa è rappresentata dai

cicli a vapore, che però hanno costi di manutenzione e installazione tipicamente superiori a quelli degli ORC.

Un ulteriore vantaggio dell'utilizzo dello schema rivendicato, ovvero impianto ORC con cogenerazione ad alta temperatura è che nel
5 condensatore dell'impianto ORC il Therminol ® VP-1, ad esempio a circa 200°C, si trova ad una pressione di circa 0.24 bar, quindi ad una pressione decisamente inferiore a quella dell'acqua, ad esempio di 12 bar. Quindi nel caso in cui vi sia un trafilamento tra i due circuiti, sarà l'acqua a trafilare verso l'impianto ORC e non viceversa, ed è quindi esclusa la
10 possibilità di contaminazione dell'acqua da parte del VP-1. Questa osservazione può essere importante nel caso in cui l'impianto sia installato presso un'industria manifatturiera (alimentare, chimica, farmaceutica, etc).

Inoltre, poiché a temperatura ambiente il Therminol ® VP-1 ha una
15 pressione di saturazione molto inferiore a quella ambiente, ad impianto fermo l'impianto è fortemente sottovuoto (come detto, pressione di circa 0.24 bar a circa 200°C e pressione di circa 0.005 bar a 100°C), pertanto vi è il rischio di ingresso d'aria. Per impedire che si raggiunga una pressione troppo bassa, è possibile realizzare una fermata "calda e in
20 pressione" dell'impianto, almeno nella parte a valle della pompa di alimento 1 e fino alla valvola di ingresso turbina 3. Con riferimento alla figura 12, normalmente quando l'impianto si ferma con fermata tradizionale, le valvole di ammissione turbina 3' si chiudono, mentre la valvola di bypass 3" si apre, la valvola di non ritorno 1' a valle della
25 pompa si chiude e la pompa 1 si ferma. Progressivamente l'evaporatore 2

si svuota (nel giro di alcuni minuti) e la pressione scenderebbe al di sotto della pressione atmosferica fino a raggiungere la pressione di condensazione.

Al contrario con la fermata "calda e in pressione" si può mantenere la pressione, a valle della pompa di alimento 1 e fino alla valvola di ammissione 3' in turbina, ad un valore desiderato, agendo sia sulla valvola di bypass 3" (controllata in pressione) sia sulla pompa di alimento 1 che è fatta funzionare a fasi intermittenti per mantenere un sufficiente livello di liquido nell'evaporatore, che viene mantenuto caldo (ad esempio, ad una temperatura superiore a 260°C, ovvero corrispondente ad una pressione di circa 1 bar) da una piccola portata di olio diatermico.

Il riscaldamento dell'olio durante la fermata calda può essere realizzato con una caldaia di back-up (tipicamente già presente in impianti cogenerativi), oppure secondo lo schema di figura 12, ovvero la caldaia lavora alla potenza necessaria per soddisfare l'utenza termica cosicché l'olio in uscita dalla caldaia va negli scambiatori dell'utenza termica e in minima parte negli scambiatori dell'ORC. Oltre al problema del vuoto, la fermata calda consente un riavviamento più veloce dell'impianto e induce sollecitazioni dovute alle dilatazioni termiche inferiori negli scambiatori.

Il fluido organico di lavoro, ad esempio il Therminol ® VP-1 può essere vantaggiosamente utilizzato come fluido barriera nelle tenute doppie di pompa e turbina, come rivendicato nelle domande di brevetto italiane della stessa Richiedente N. 102014902289325 e N. 102014902289326. In questo modo, eventuali trafilamenti della tenuta saranno costituiti dallo stesso fluido di lavoro, evitando contaminazioni da

parte di altri fluidi lubrificanti.

L'impianto a ciclo Rankine organico cogenerativo, secondo una configurazione alternativa, può essere configurato in modo che il calore di condensazione sia utilizzato sempre per cogenerazione ad alta
5 temperatura ($T > 120^{\circ}\text{C}$), ma non per la produzione di vapore.

Se consideriamo, infatti, una fornace di processo, ad esempio quella di una vetreria, secondo la tecnica nota i fumi in uscita dalla fornace sono utilizzati per preriscaldare l'aria comburente e poi sfruttati per generare energia elettrica tramite un impianto ORC a scambio diretto.

10 In una configurazione alternativa secondo un aspetto della presente invenzione (Fig. 13), un impianto ORC 100, il cui fluido organico è appartenente ad uno dei gruppi precedentemente descritti, scambia calore nello scambiatore 2 con i fumi 40 uscenti dalla fornace, mentre il fluido di lavoro condensando scambia calore nel condensatore 5 con un
15 fluido gassoso, in particolare con l'aria comburente 30, preriscaldandola. Il vantaggio di questa configurazione è che l'ORC riesce a mantenere un buon rendimento elettrico nonostante la sorgente "fredda" sia a 200°C , grazie ad una temperatura della parte calda intorno ai 350°C .

Infine, per quanto attiene ai modi di attuazione del condensatore 5
20 in impianti ORC di tipo cogenerativo secondo la presente invenzione, la scrivente ritiene conveniente realizzare il condensatore secondo lo schema di figura 14. Il condensatore 5 è uno scambiatore "shell&tube", in cui il vapore organico da condensare riempie una camera 51 ed investe il fascio tubiero 52 alimentato con acqua. L'acqua in uscita dallo scambiatore si
25 trova in condizioni bifase e raggiunge un corpo cilindrico che funziona da

separatore 53 liquido-vapore. Il vapore va all'utenza termica, mentre il liquido torna a monte del condensatore e si miscela con l'acqua fredda in ingresso. Il separatore 53 può essere montato ad una certa altezza per sfruttare il principio della circolazione naturale, oppure si può prevedere
5 l'installazione di una pompa 54 (come in figura 14). La pressione e il livello del corpo cilindrico sono regolate agendo su opportune valvole, rispettivamente una prima valvola 55 per la pressione ed una seconda valvola 56 per il livello.

Una configurazione analoga è rappresentata in figura 15 in cui
10 l'unica differenza è che il corpo cilindrico separatore 53' è ricavato direttamente all'interno della "cassa d'acqua" del condensatore 5.

Oltre ai modi di attuazione dell'invenzione, come sopra descritti, è da intendere che esistono numerose ulteriori varianti. Deve anche intendersi che detti modi di attuazione sono solo esemplificativi e non
15 limitano l'oggetto dell'invenzione, né le sue applicazioni, né le sue configurazioni possibili. Al contrario, sebbene la descrizione sopra riportata rende possibile all'uomo di mestiere l'attuazione della presente invenzione almeno secondo una sua configurazione esemplificativa, si deve intendere che sono concepibili numerose variazioni dei componenti
20 descritti, senza che per questo si fuoriesca dall'oggetto dell'invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate, interpretate letteralmente e/o secondo i loro equivalenti legali.

RIVENDICAZIONI

1. Impianto a ciclo Rankine organico (10,100, 110, 120) che utilizza un fluido organico di lavoro e comprende
 - almeno una pompa di alimentazione (1) del fluido organico di lavoro in fase liquida,
 - almeno uno scambiatore di calore (2), che scambia calore tra una sorgente calda (20, 40) ed il fluido organico di lavoro che all'uscita dallo scambiatore di calore si presenta in fase di vapore,
 - almeno una turbina di espansione (3), che espande il vapore del fluido organico di lavoro
 - almeno un condensatore (5), il cui calore di condensazione è utilizzato a fini di cogenerazione di energia per temperature superiori a 120°C,detto impianto essendo caratterizzato dal fatto che il fluido organico di lavoro comprende, in combinazione o in alternativa, toluene, difenile, ossido di difenile, terfenile, quadrifenile, idrocarburi lineari, silossani, idrocarburi aromatici alchilati, fenilcicloesano, bicicloesile e perfluoropolietere.
2. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo la rivendicazione 1, laddove il calore di condensazione è sfruttato per preriscaldare un flusso gassoso.
3. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo la rivendicazione 1, laddove il calore di condensazione è sfruttato per produrre vapore d'acqua saturo o surriscaldato ad una pressione di almeno 2 bar.

4. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detto fluido organico di lavoro è a base di polidimetilsilossani.
5. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detto fluido organico di lavoro è una miscela di difenile/ossido di difenile.
6. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che la temperatura di condensazione è compresa tra 150°C e 250°C e la pressione di condensazione è compresa tra 50 mbar e 2000 mbar.
7. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo la rivendicazione 6, caratterizzato dal fatto che la pressione di condensazione, in condizioni di progetto, è compresa tra 50 mbar e 800 mbar.
8. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detto fluido organico di lavoro possiede un rapporto tra la temperatura critica (T_c) e la temperatura di evaporazione (T_v) compreso tra 0.7 e 0.95.
9. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detta sorgente calda è un circuito intermedio chiuso (20) al cui interno opera un fluido termovettore a base di fenile, ossidi di difenile, terfenile, quadrifenile, silossani, idrocarburi aromatici alchilati, fenilcicloesano, bicicloesile, perfluoropolietteri, sali fusi o miscele di essi.
10. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo la

rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che detto fluido termovettore è una miscela di difenile/ossido di difenile.

11. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo la rivendicazione 9 o 10, caratterizzato dal fatto che una medesima sostanza
5 è utilizzata sia come fluido termovettore in fase liquida, sia come fluido organico di lavoro, con cambio di fase.

12. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni da 9 a 11, caratterizzato dal fatto che detto circuito intermedio (20) comprende una prima porzione (201) ad alta temperatura
10 ed una seconda porzione (202) a temperatura inferiore laddove in detta prima porzione (201) del circuito intermedio, la piena portata del fluido termovettore attraversa un evaporatore (22) appartenente a detto almeno uno scambiatore di calore (2) mentre solo una parte della portata di fluido termovettore fluisce nella seconda porzione (202) e attraversa un
15 preriscaldatore (21) appartenente a detto almeno uno scambiatore di calore (2).

13. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che l'aria comburente (30) è preriscaldata attraverso un ulteriore scambiatore posto
20 a valle di quelli del circuito intermedio (20).

14. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo la rivendicazione 13, caratterizzato dal fatto che i fumi di combustione (40) sono suddivisi in due porzioni (401, 402) in parallelo fra loro e l'aria comburente (30) è preriscaldata solo dalla porzione (401) dei fumi di
25 combustione.

15. Impianto a ciclo Rankine organico (100, 110) secondo una delle rivendicazioni da 1 a 8, caratterizzato dal fatto che detta sorgente calda è costituita da fumi di combustione o di recupero (40) ed il fluido organico di lavoro scambia calore direttamente con detti fumi di combustione.
- 5 16. Impianto a ciclo Rankine organico (100, 110) secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che il fluido organico di lavoro evapora nello scambiatore di calore (2) in tubi o altra superficie di scambio lambita dai fumi a diretto contatto.
- 10 17. Impianto a ciclo Rankine organico (100, 110) secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che il fluido organico di lavoro è allo stato liquido nello scambiatore di calore (2) ed evapora in un evaporatore a flash (7) localizzato a monte della turbina (3).
- 15 18. Impianto a ciclo Rankine organico (110) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che lo scambiatore di calore (2) dell'impianto ORC ricevono calore dal circuito intermedio (20), mentre uno scambiatore "SPLIT" (23') scambia direttamente calore con i fumi di combustione (40).
- 20 19. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni da 1 a 12, caratterizzato dal fatto che uno scambiatore "SPLIT" (23) è configurato per ricevere una portata ridotta di fluido termovettore, in una porzione (203) del circuito intermedio (20), e preriscaldare una porzione di fluido organico di lavoro proveniente dal condensatore (5).
- 25 20. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo la rivendicazione 19, caratterizzato dal fatto che l'evaporatore e il

preriscaldatore sono compresi in un unico scambiatore di calore (2).

21. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di comprendere un secondo ciclo di lavoro (60, 140) e dal fatto che il calore di condensazione
5 messo a disposizione nel condensatore (5) è in parte utilizzato a fini cogenerativi e in parte come sorgente calda per detto secondo ciclo di lavoro (60, 140).

22. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo la rivendicazione 21, caratterizzato dal fatto che detto secondo ciclo di
10 lavoro (60) è un ciclo a vapore surriscaldato.

23. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo la rivendicazione 21, caratterizzato dal fatto che detto secondo ciclo di lavoro (140) è un ciclo Rankine organico.

24. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 110, 120) secondo la
15 rivendicazione 21, caratterizzato dal fatto che detto secondo ciclo di lavoro (140) è alimentato dal condensatore (5') e da una frazione della portata di olio diatermico che fluisce nel circuito intermedio (20).

25. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che il condensatore
20 (5) è uno scambiatore "shell&tube" con fascio tubiero (52) alimentato con acqua.

26. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo la rivendicazione 25, caratterizzato dal fatto di comprendere un corpo cilindrico configurato come un separatore (53, 53') liquido-vapore.

25 27. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo la

rivendicazione 25 o 26, caratterizzato dal fatto che il separatore (53, 53') liquido-vapore è configurato per essere regolato in pressione per mezzo di una prima valvola (55) e in livello per mezzo di una seconda valvola (56).

28. Impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo una
5 delle rivendicazioni da 25 a 27, caratterizzato dal fatto che detto separatore (53') liquido-vapore è integrato nello scambiatore "shell&tube" con fascio tubiero (52).

29. Metodo per realizzare un arresto di un impianto a ciclo Rankine organico (10, 100, 110, 120) secondo una delle rivendicazioni precedenti,
10 comprendente le seguenti fasi:

- a) chiudere una valvola di ammissione (3') del fluido organico di lavoro in turbina (3),
- b) controllare in pressione una valvola di bypass (3'') della turbina (3),
- 15 c) controllare una pompa di alimento (1) in modo che lavori a fasi intermittenti per mantenere un sufficiente livello di liquido in uno scambiatore di calore (2),
in modo da mantenere la porzione di impianto compresa tra la pompa di alimentazione (1) e la valvola di ammissione (3') in turbina ad una
20 pressione superiore ad un predeterminato valore.

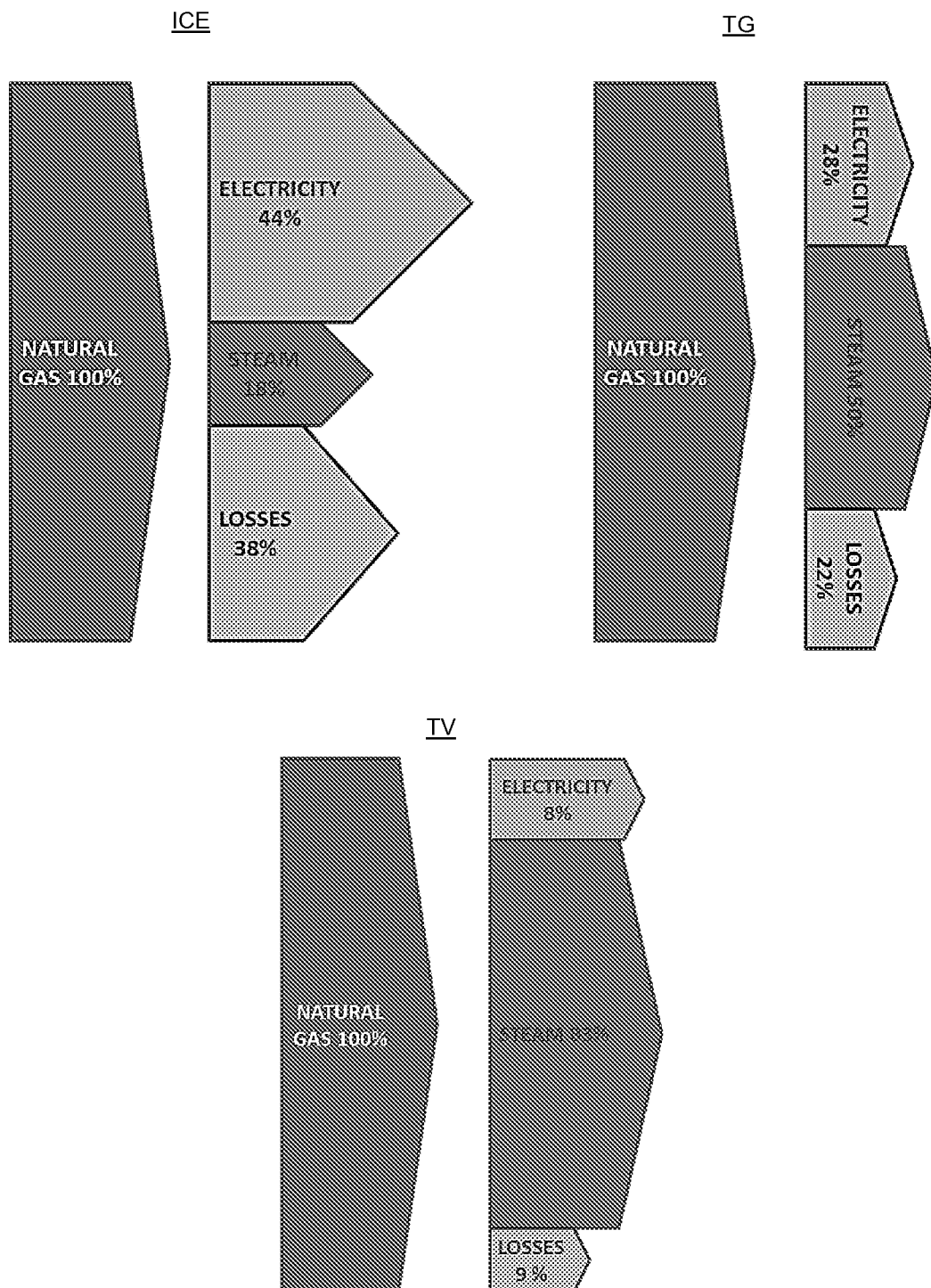


Fig. 1

2/10

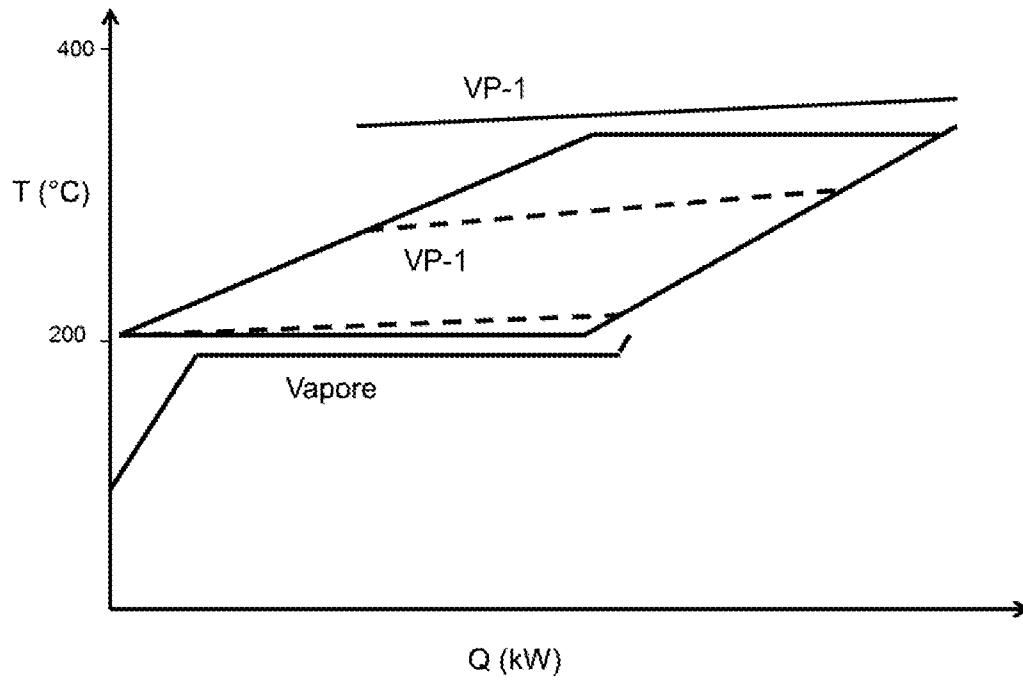


Fig. 2

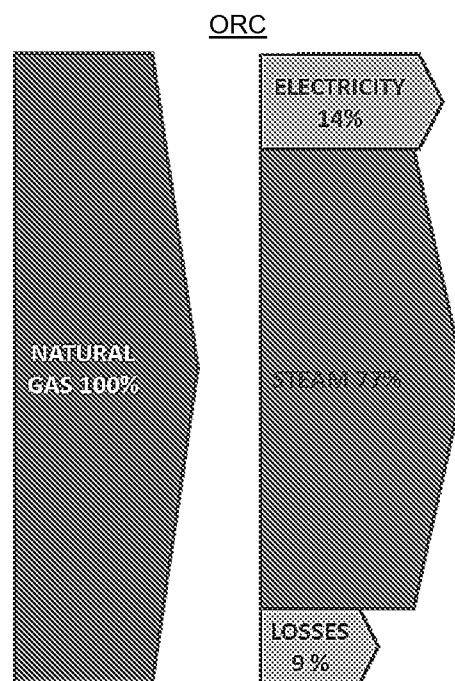


Fig. 3

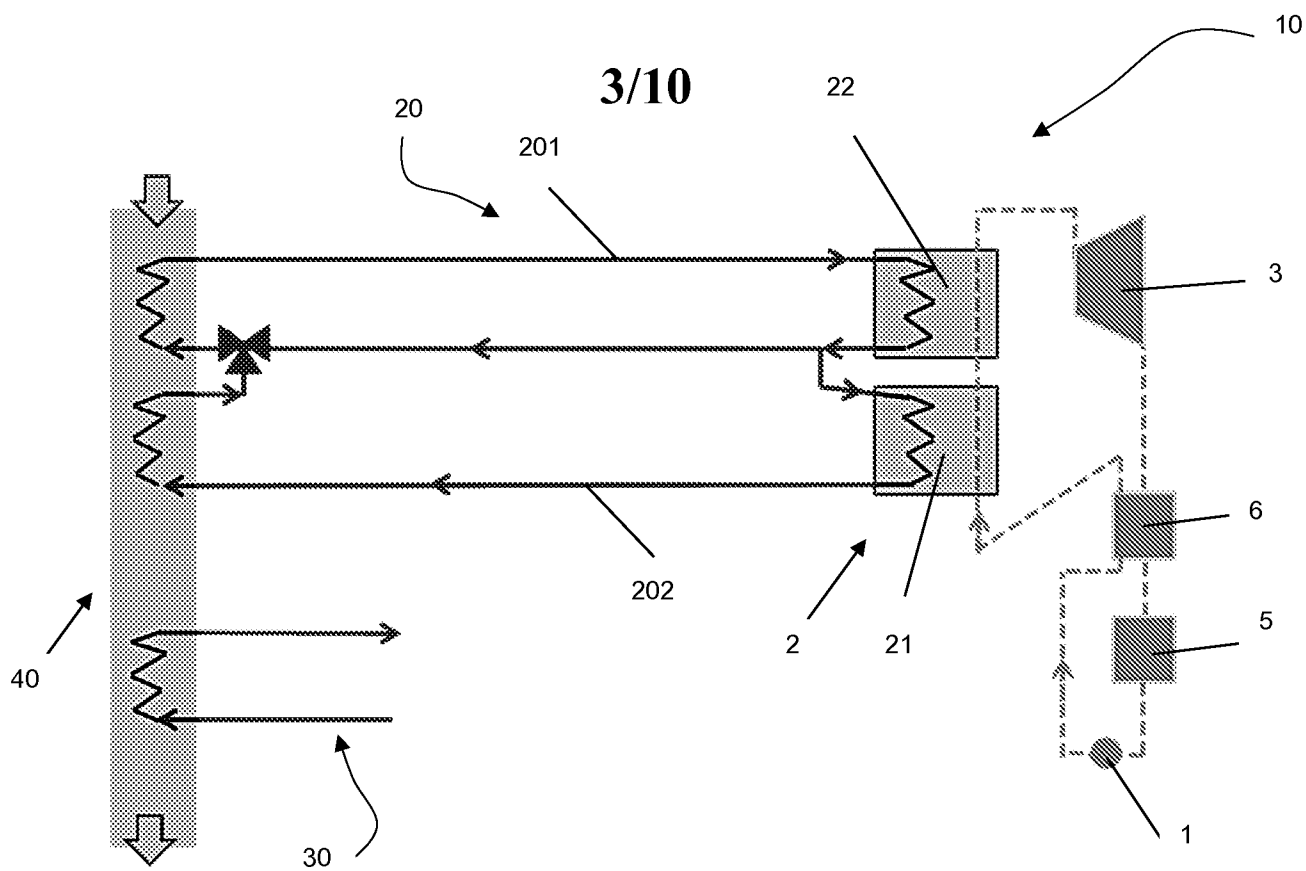


Fig. 4

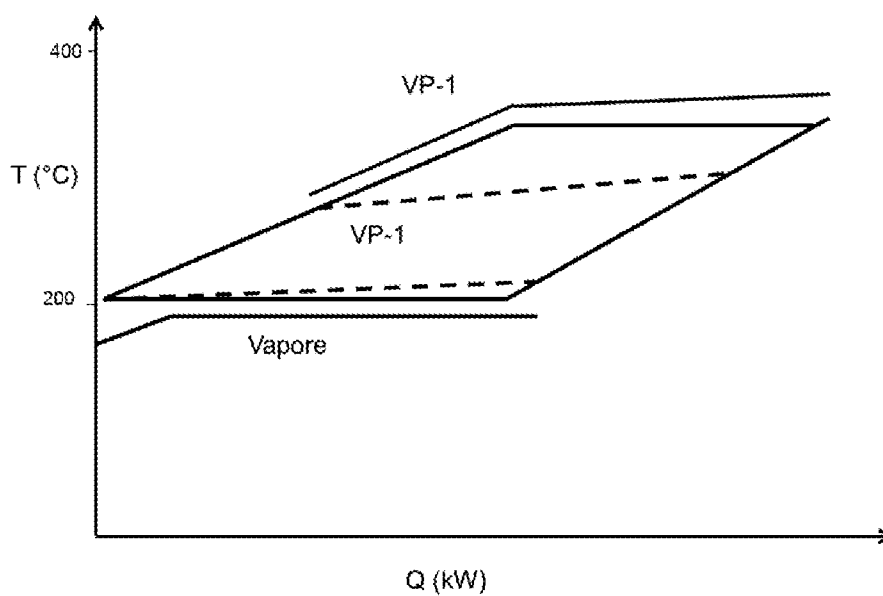


Fig. 5

4/10

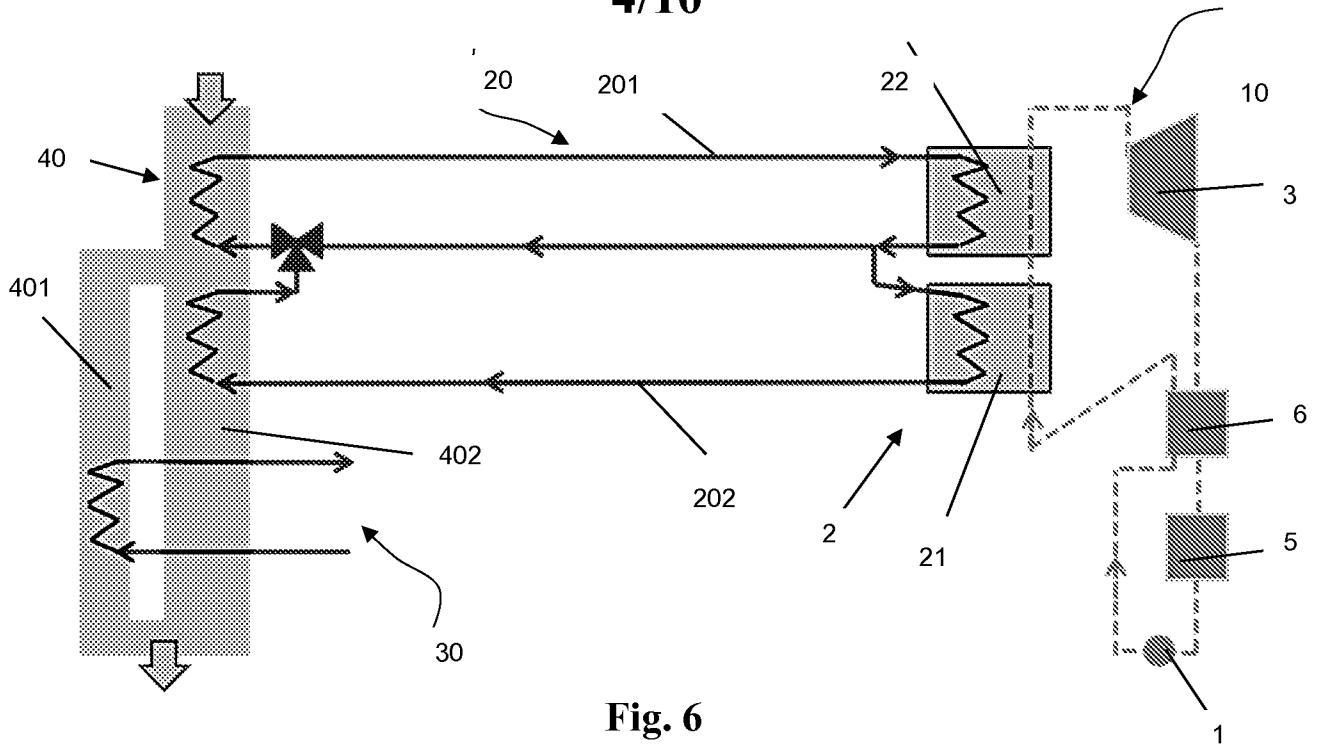


Fig. 6

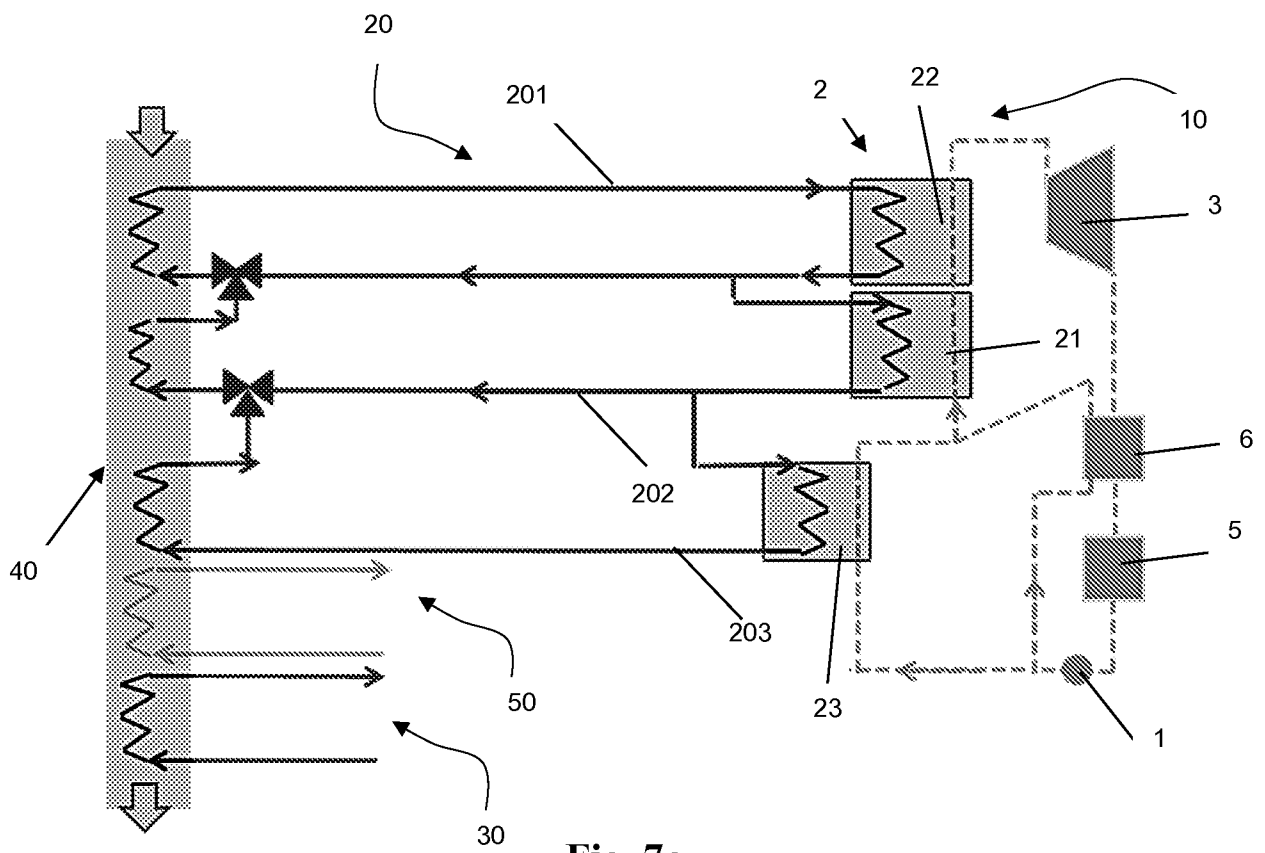


Fig. 7a

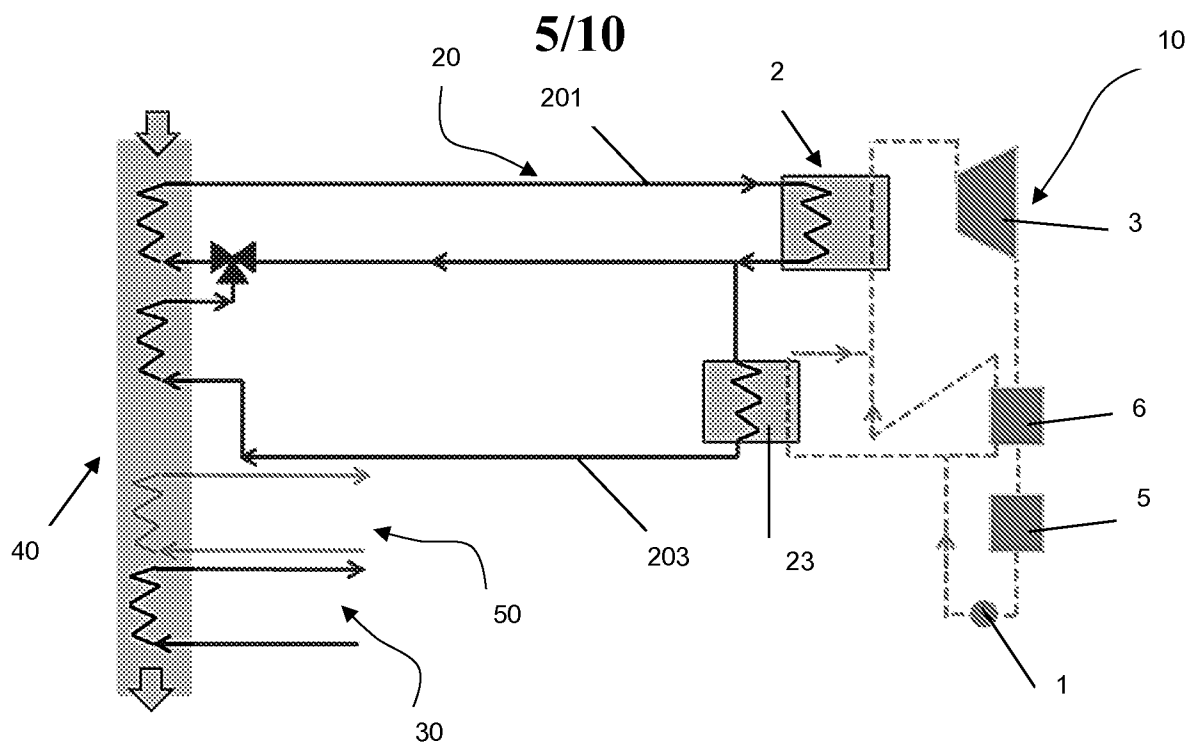


Fig. 7b

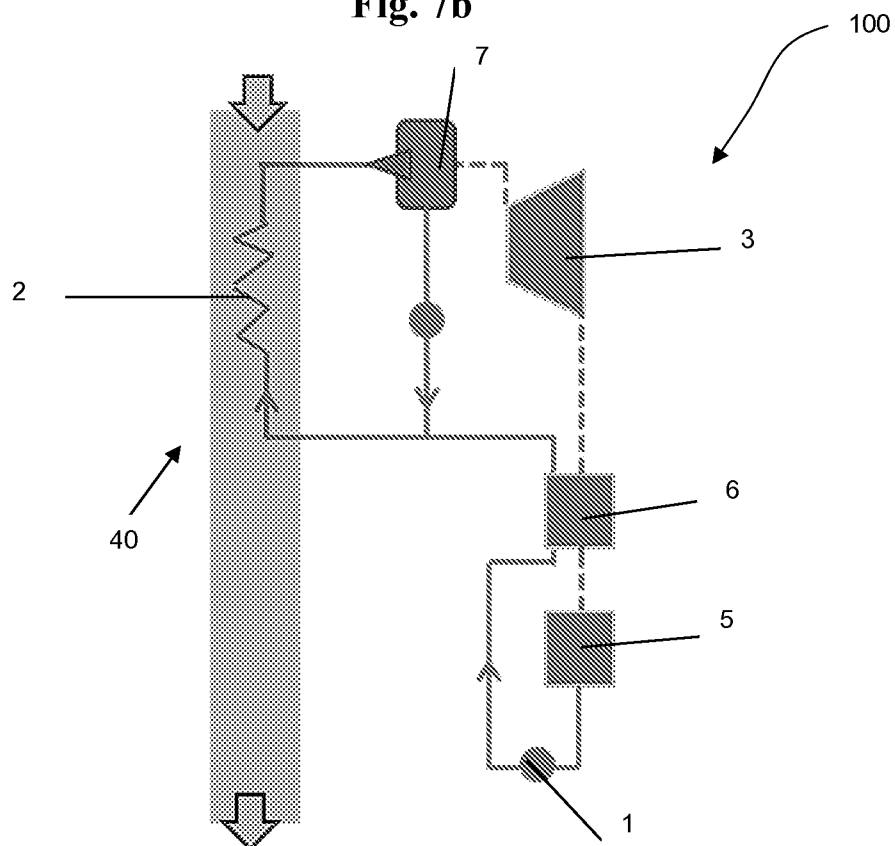


Fig. 8

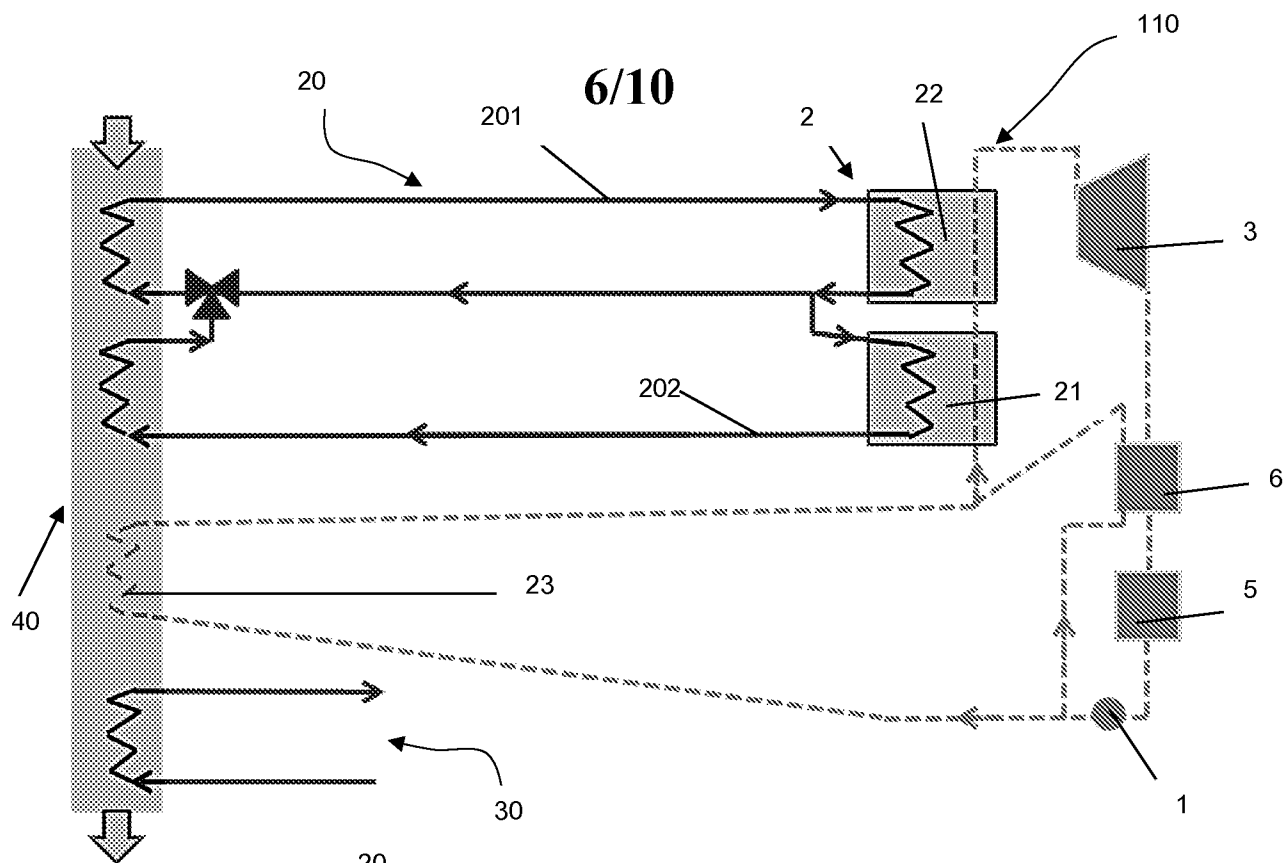


Fig. 9

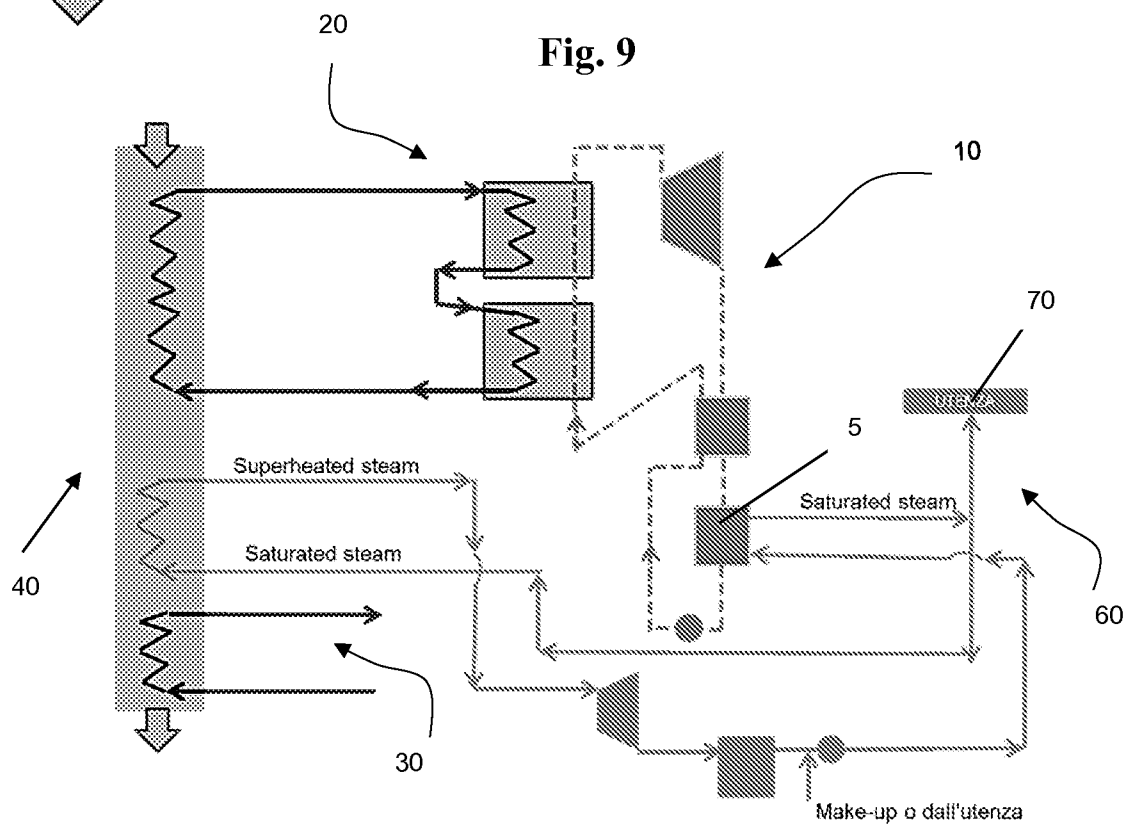


Fig. 10

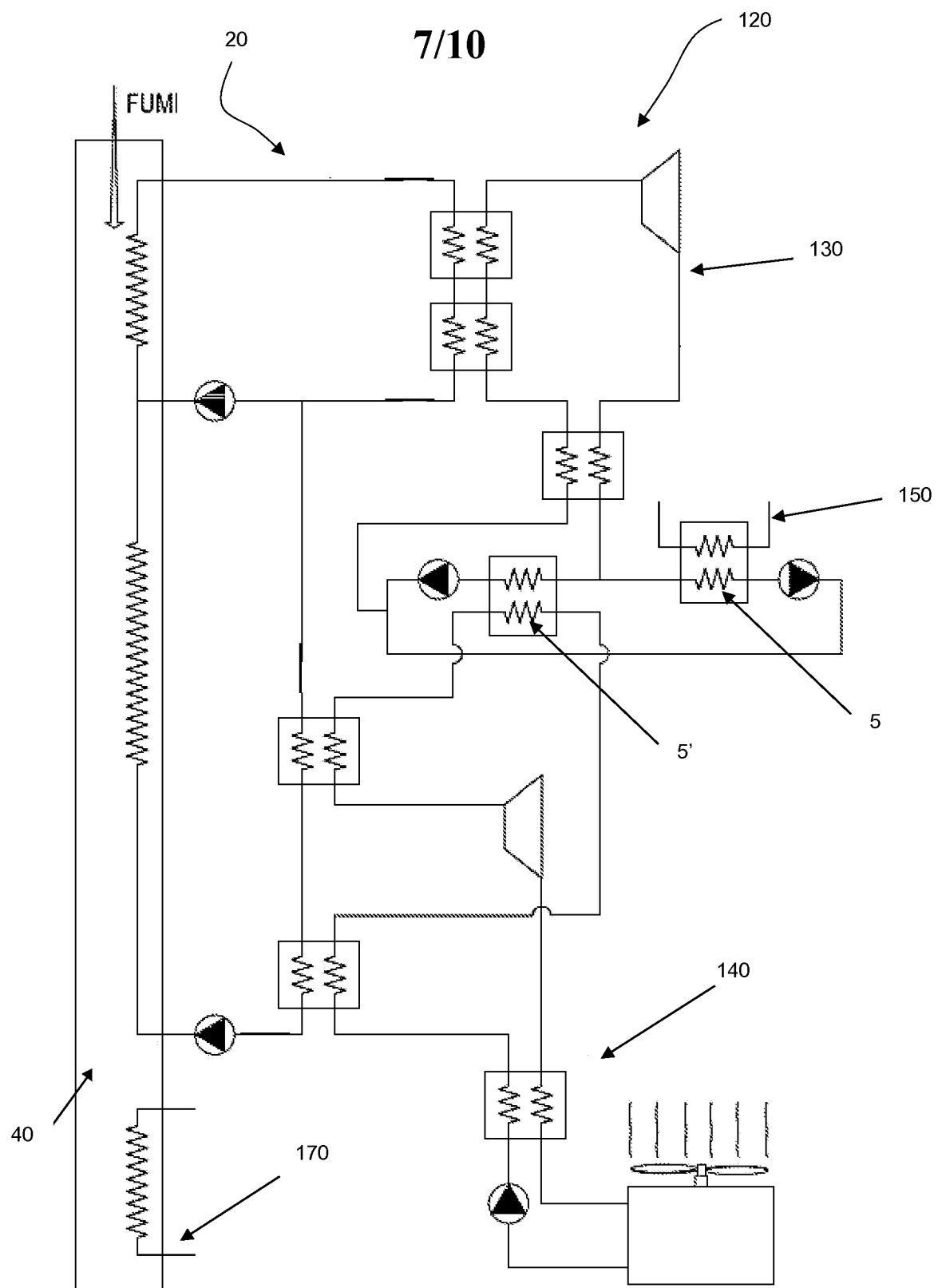


Fig. 11

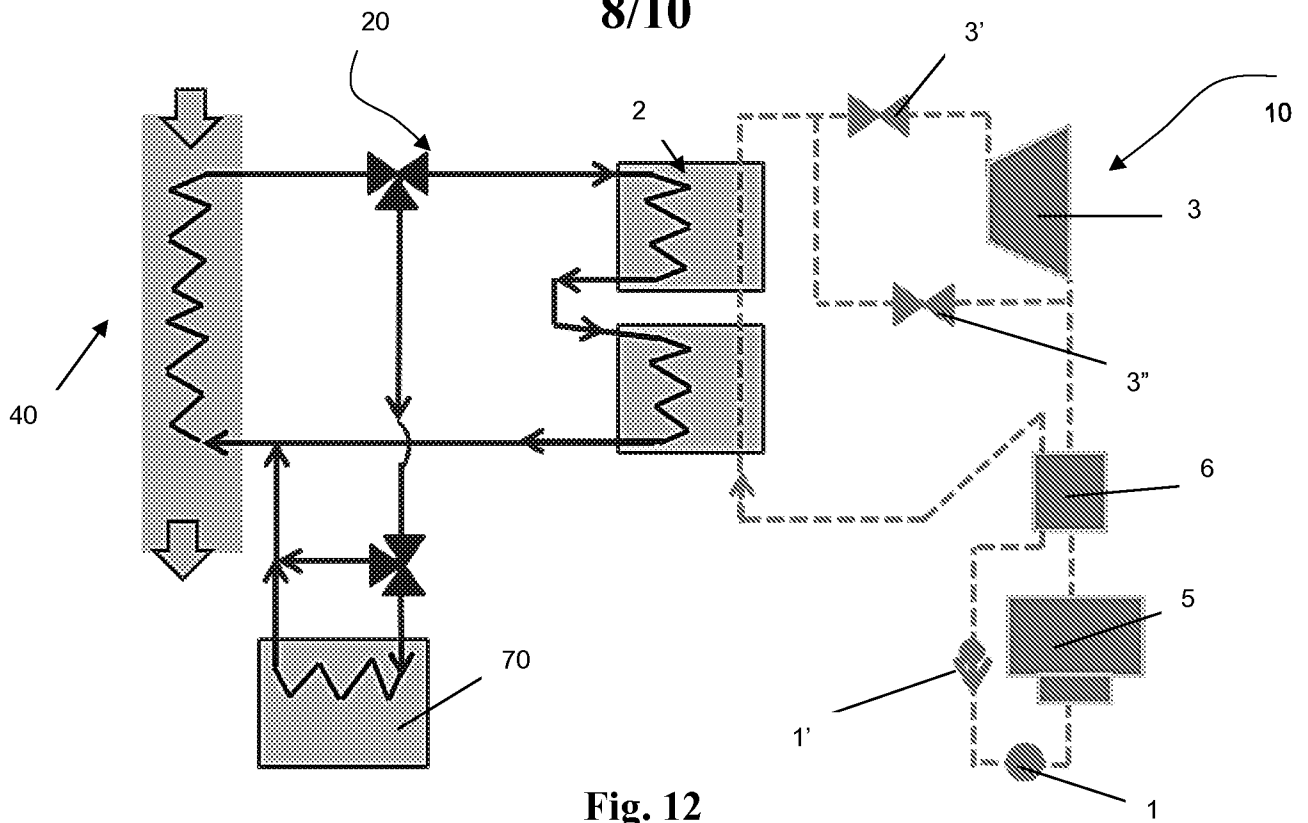


Fig. 12

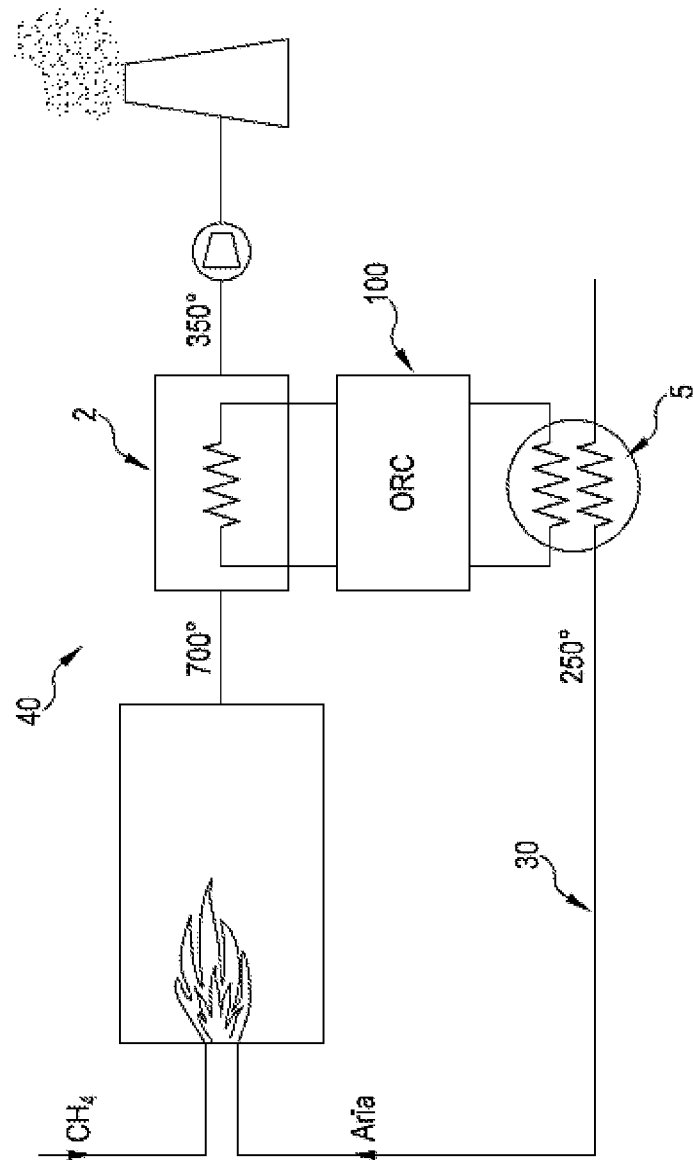


Fig. 13

FIG.14

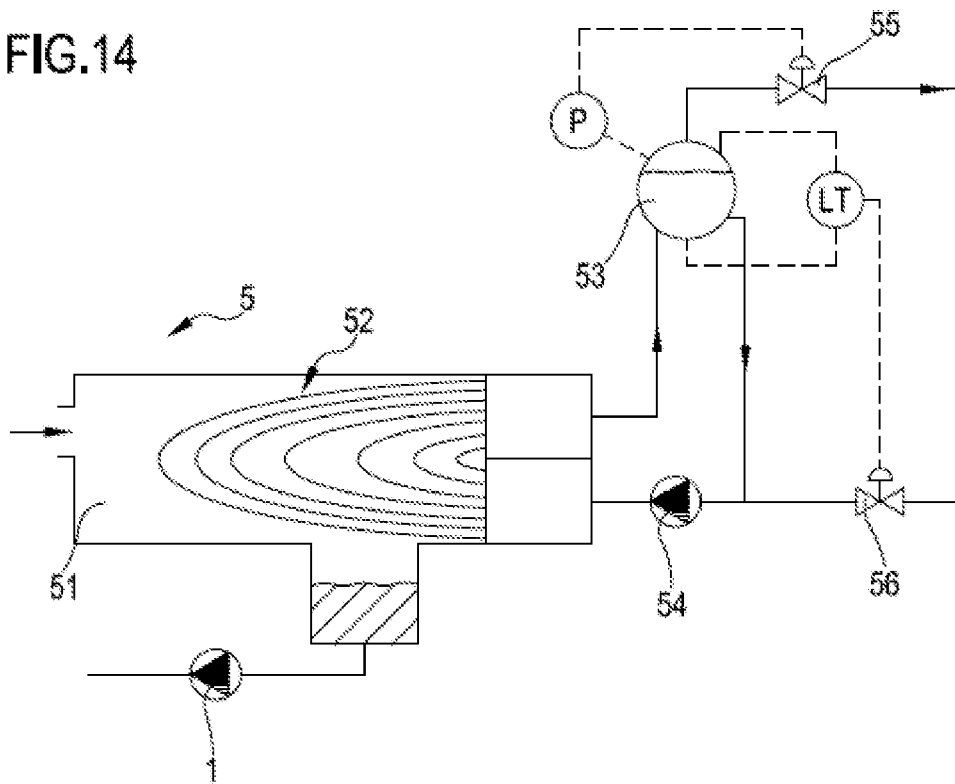


FIG.15

