

Pompe di calore in grado di produrre vapore come tecnologia abilitante per la decarbonizzazione di processi termici industriali

Heat pumps capable of producing steam as an enabling technology for the decarbonisation of industrial thermal processes

DOLF VAN HATTEM¹

¹ *Studio Caramelli S.r.l.*

RIASSUNTO.

L'industria Europea usa annualmente circa 730 TWh di energia termica a temperature minori di 200 °C per alimentare i processi produttivi. Le pompe di calore ad alta temperatura sono state identificate come una tecnologia essenziale per de-carbonizzare questo consumo energetico. Già oggi sono disponibili sul mercato delle pompe di calore ad alta temperatura che sono in grado di produrre energia termica sino a 160 - 200 °C. Inoltre, con un condensatore integrato nel generatore di vapore, queste macchine possono produrre direttamente vapore senza la necessità di un circuito intermedio per trasferimento del calore. La relazione presenta dati misurati relativi alle prestazioni energetiche di una tale macchina e mostra delle possibili applicazioni in una varietà di processi industriali e civili.

SUMMARY.

The European industry uses each year approximately 730 TWh of thermal energy at temperatures below 200 °C for powering industrial production processes. High-temperature heat pumps have been identified as a key technology to decarbonize this energy use. Today, high temperature heat pumps which are capable of producing thermal energy with temperatures of up to 160 – 200 °C are already available on the market. Furthermore, with a condenser integrated into the steam generator, these machines can directly produce steam without the need for an intermediate circuit for the heat transfer from the condenser to the steam generator. The paper presents measurement data related to the energy performance of such machines and illustrates possible applications of such heat pumps in a number of industrial processes.

Parole chiave: pompa di calore industriale, elettrificazione, processi termici, COP, vapore.

Key words: industrial heat pumps, electrification, thermal processes, COP, steam.

1. INTRODUZIONE

Per de-carbonizzare le loro attività, prima o poi, le imprese industriali dovranno usare in modo molto significativo fonti energetiche rinnovabili. In Italia, la maggior parte di questi fonti disponibili producono energia elettrica. Perciò, tanti processi industriali che oggi usano metano dovranno essere convertiti per essere alimentati con energia elettrica.

Una pompa di calore elettrica è di gran lunga lo strumento più efficiente per elettrificare processi termici. Infatti, mediamente ci si può aspettare che per ogni unità di energia elettrica usata, una pompa di calore restituisce da 3 a 4 unità di energia termica.

Negli ultimi anni sono stati realizzati dei progressi importanti nello sviluppo di pompe di calore industriali ad alte temperature. Ormai sono disponibile sul mercato delle macchine industriali che hanno una resa termica tra i 300 kW e i 10 MW e che possono raggiungere anche 200 °C. Perciò, la produzione di vapore è ormai fattibile.

Questo lavoro intende presentare una panoramica dello stato dell'arte relativa all'utilizzo di pompe di calore nel settore industriale e in particolare per la produzione di vapore.

2. POMPE DI CALORE AD ALTA TEMPERATURA

Il termine “pompa di calore” copre una varietà di processi termodinamici che hanno come risultato un aumento del livello di temperatura di un flusso di energia termica.

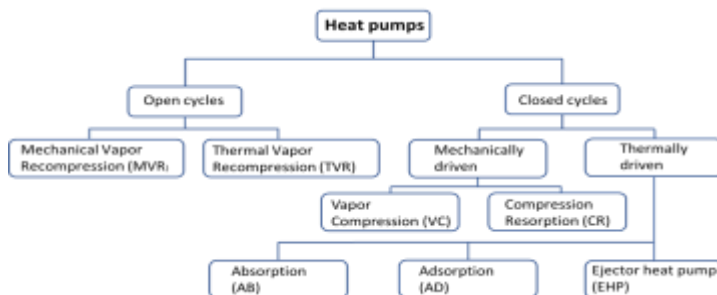


Figura 1 – Classificazione di pompe di calore con ciclo aperto e ciclo chiuso in funzione del metodo di azionamento (Da: Kiss e Infante Ferreira, 2017).

Nella Figura 1, si riporta una panoramica, non esaustiva, delle tecniche oggi disponibili per riqualificare energia termica. La differenza tra le tecnologie riportate nella Figura 1, sta nel modo in cui si crea la differenza di pressione necessaria per far circolare il refrigerante attraverso il ciclo termodinamico (vedi Kiss e Infante Ferreira, 2017, per un approfondimento). Oggi, le tecnologie più diffuse per la produzione di vapore tramite cicli termodinamici, sono le macchine azionate meccanicamente, indicate come VC e MVR nella la Figura 1. Perciò, in questo lavoro ci limitiamo a considerare questi due tipi di macchine.

2.1. Il COP

Questo parametro indica quanta energia termica viene resa disponibile dalla macchina per ogni unità di energia elettrica consumata dal compressore. Il COP non è fisso ma dipende fortemente dall'aumento della temperatura che la macchina deve dare al flusso termico.

Nelle Figure 6 e 7, nel Capitolo 2.4, si mostra la variazione del COP in funzione della differenza di temperatura di evaporazione e la temperatura di condensazione per una pompa di calore ad alta temperatura.

2.2. Pompa di calore azionata meccanicamente circuito chiuso (VC)

Un esempio di un ciclo termodinamico di una pompa di calore del tipo VC è illustrato nella Figura 2.

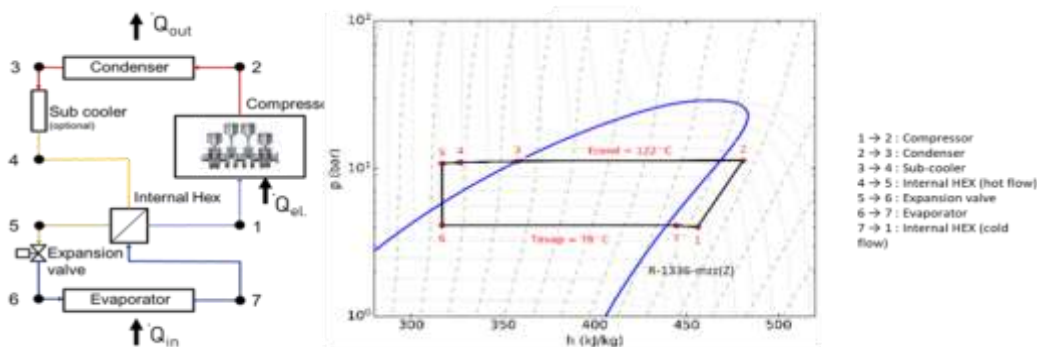


Figura 2 – Rappresentazione di una pompa di calore con un ciclo a monostadio con uno scambiatore interna.

Pompe di calore di questo tipo sono di gran largo la tecnologia più diffusa. Queste macchine possono essere messe in serie (e.g. multistadio) per ottenere un incremento di temperatura più alto o in parallelo per avere una resa termica superiore.

2.3. Pompa di calore a circuito aperto azionata meccanicamente (MVR)

Nelle macchine MVR, il fluido del processo industriale agisce anche come refrigerante. La macchina stessa consiste di uno o più compressori, mentre l'evaporatore ed il condensatore fanno parte degli impianti del processo. Il compressore aumenta, in modo adiabatico, la pressione del vapore e, con questa, anche la sua temperatura. Il vapore, una volta riqualificato, può essere impiegato per riscaldare il processo stesso o per un altro utente. Nella Figura 3 si riporta in modo schematico un esempio di un tale impianto.

L'energia termica all'uscita del MVR consiste nella somma dell'entalpia del vapore all'entrata del compressore e l'energia meccanica usata per comprimerlo. L'uso di acqua come refrigerante ha il vantaggio di consentire di raggiungere delle temperature molto alte, sino a circa 250°C , grazie alla sua temperatura critica elevata (374°C).

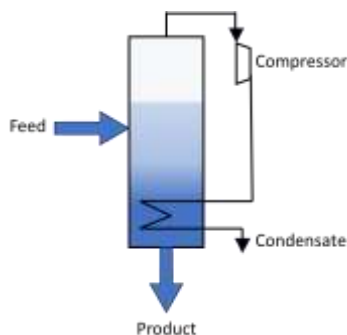


Figura 3 – Rappresentazione schematica di una pompa di calore MVR.

I sistemi MVR a vapore d'acqua sono sconsigliati per temperature di evaporazione al di sotto di circa 120 °C perché, a queste temperature, la pressione di saturazione del vapore d'acqua è molto bassa. Per recuperare calore di scarto a temperature basse per la produzione di vapore, una combinazione di una macchina VC ed una macchina MVR oggi è considerata la soluzione migliore (vedi il Capitolo 3.2).

La pompa di calore del tipo MVR non ha bisogno di scambiatori tra il refrigerante e i liquidi termovettore, e per questo motivo, questa macchina è intrinsecamente più efficiente di una pompa di calore del tipo VC. Si possono ottenere dei COP molto elevati (> 8).

2.4. La resa termica e il COP

Come il COP, anche la resa termica di una pompa di calore dipende fortemente dalle condizioni di funzionamento.

La temperatura di evaporazione¹:

Quando la temperatura di evaporatore scende, il flusso di massa del refrigerante all'uscita del compressore diminuisce, per tre motivi:

1. la pressione del vapore saturo del refrigerante diventa più bassa, perciò, con il flusso volumetrico costante, il flusso di massa all'uscita del compressore si riduce,
2. l'efficienza volumetrica del compressore diminuisce quando il rapporto di compressione aumenta,
3. per certi refrigeranti il calore di evaporazione diminuisce quando la temperatura scende.

I dati delle Figure 4,5 e 6 sono stati calcolati con un modello di simulazione dettagliato, sviluppato per la progettazione di una pompa di calore industriale. La procedura di calcolo tiene conto delle caratteristiche specifiche di un compressore a pistoni, delle proprietà termodinamiche dei refrigeranti e delle dimensioni degli scambiatori. Il modello è

¹ In questo caso, la temperatura di evaporazione è calcolata come la temperatura all'uscita dell'evaporatore meno 2 °C. La temperatura di condensazione è considerata eguale alla temperatura all'uscita del condensatore.

Pompe di calore in grado di produrre di vapore come tecnologia abilitante per la decarbonizzazione di processi industriali

stato validato con le prestazioni energetiche misurate in condizioni di laboratorio (vedi le Figure 8 e 9).

Nella Figura 4, si illustra come la resa termica di una pompa di calore cambia con la temperatura di evaporazione. Dalla Figura 4 si evince che la temperatura di evaporazione ha un impatto molto significativo sulla resa termica. Con una temperatura all'uscita del condensatore pari a 140 °C, quando la temperatura nell'evaporatore diminuisce da 100 a 80 °C, la resa termica si abbassa del 43 % circa. Questo effetto può essere più o meno importante a seconda del tipo di compressore o di refrigerante considerato.

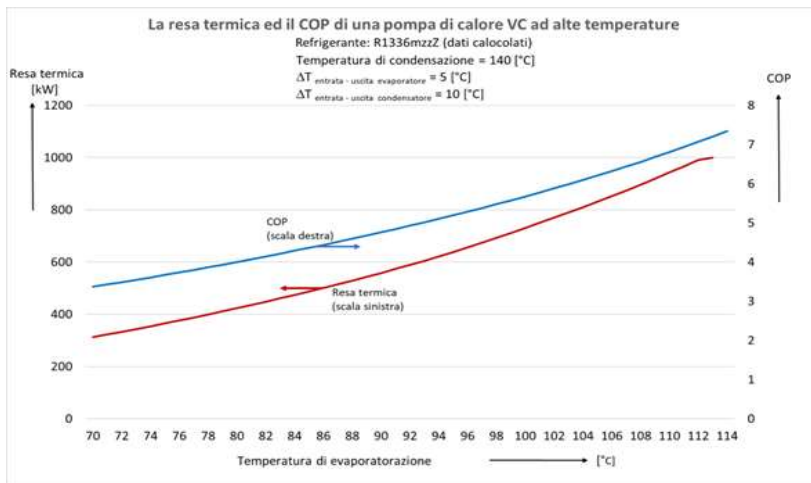


Figura 4 – La resa termica ed il COP di una pompa di calore VC ad alta temperatura con un compressore volumetrico a regime costante, in funzione della temperatura di evaporazione (dati calcolati).

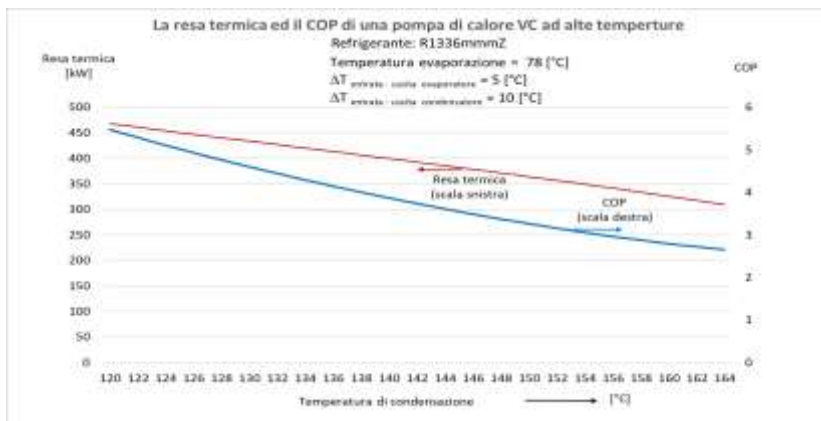


Figura 5 – La resa termica ed il COP di una pompa di calore VC ad alta temperatura con un compressore volumetrico a regime costante, in funzione della temperatura di condensazione (dati calcolati).

La temperatura di condensazione:

Quando la temperatura del condensatore aumenta, il rapporto di compressione aumenta e l'efficienza volumetrica del compressore diminuisce. Nella Figura 5 si illustra come la resa termica di una pompa di calore cambia con la temperatura di condensatore mentre la temperatura di evaporazione rimane invariata pari a 78 °C.

Da un confronto tra le Figure 4 & 5, si evince che la resa termica è meno sensibile alla temperatura di condensazione che alla temperatura di evaporazione. Per esempio, con una temperatura di evaporazione pari 85 °C, quando la temperatura di condensazione aumenta da 130 a 150 °C, la resa termica si abbassa soltanto di circa 16 %.

La variazione della resa termica con la temperatura di evaporazione quando l'innalzamento della temperatura è costante:

Nella Figura 6 si riporta l'andamento del COP e la resa termica, in funzione della temperatura di evaporazione, mentre la differenza tra la temperatura di evaporazione e la temperatura di condensazione è costante pari a 50 °C. La figura mostra chiaramente che la temperatura di evaporazione ha un impatto molto forte sulla resa termica del ciclo, mentre il COP mostra una variazione molto più limitata.



Figura 6 – La resa termica ed il COP di una pompa di calore VC ad alta temperatura con un compressore volumetrico a regime costante, in funzione della temperatura di evaporazione mentre l'innalzamento della temperatura dell'energia termica è costante e pari a 50 °C (dati calcolati).

Assumendo che la macchina dell'esempio riportato nella Figura 6 abbia un CAPEX di 450 k€ e assumendo una temperatura di evaporazione è pari a 70 °C, il costo specifico della macchina sarebbe 1,220 €/kW, mentre il costo specifico per la stessa macchina sarebbe 565 €/kW quando la temperatura di evaporazione fosse pari a 114 °C. Per questo si devono sempre specificare le condizioni operative quando si presenta il costo specifico di una pompa di calore (vedi anche Capitolo 5.2).

2.5. I fluidi di lavoro

Le prestazioni energetiche e l'intervallo di temperatura operativa di una pompa di calore dipendono per una parte importante dalle caratteristiche termodinamiche del refrigerante. I criteri per valutare l'adeguatezza di un refrigerante per un'applicazione con una

Pompe di calore in grado di produrre di vapore come tecnologia abilitante per la decarbonizzazione di processi industriali

pompa di calore sono, tra altro: le caratteristiche termodinamiche, la compatibilità ambientale, la sicurezza, la disponibilità, il costo e altri fattori.

La Tabella I fornisce una panoramica delle proprietà dei refrigeranti utilizzati per pompe di calore ad alta temperatura.

Tabella I - Panoramica delle proprietà dei principali fluidi di lavoro al momento utilizzati nelle pompe di calore ad alta temperatura (Da: IEA Annex 58 Task I, 2023).

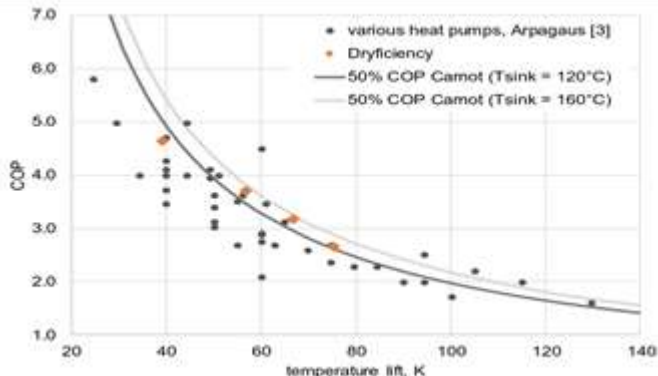
Type	Working fluid	Description	T_{crit} (°C)	p_{crit} (bar)	ODP (-)	GWP (-)	SG
Natural	R-718	Water	373.9	220.6	0	0	A1
	R-717	Ammonia	132.3	113.3	0	0	B2L
	R-744	Carbon dioxide	31.0	73.8	0	1	A1
HC	R-601	n-Pentane	196.6	33.7	0	5	A3
	R-601a	Isopentane	187.8	33.8	0	4	A3
	R-600	n-Butane	152.0	38.0	0	4	A3
	R-600a	Isobutane	134.7	36.3	0	3	A3
	R-290	Propane	96.7	42.5	0	3	A3
HFO	R-1336mzz(Z)	1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene	171.3	29.0	0	2	A1
	R-1234ze(Z)	cis-1,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	150.1	35.3	0	<1	A2L
	R-1336mzz(E)	trans-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene	130.4	27.8	0	18	A1
	R-1234ze(E)	trans-1,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	109.4	36.4	0	<1	A2L
	R-1234yf	2,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene	94.7	33.8	0	<1	A2L
HCFO	R-1233zd(E)	1-chloro-3,3,3-Trifluoro-propene	166.5	36.2	0.00034	1	A1
	R-1224yd(Z)	1-chloro-2,3,3,3-Tetrafluoro-propene	155.5	33.3	0.00012	<1	A1
HFC	R-365mfc	1,1,1,3,3-Pentafluorobutane	186.9	32.7	0	804	A2
	R-245fa	1,1,2,2,3-Pentafluoropropane	154.0	36.5	0	858	B1
	R-134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethane	101.1	40.6	0	1'300	A1

Dove: HC = Hydrocarbons, HFO = Hydrofluoroolefins, HCFO = Hydrochlorofluoroolefins, HFC = Hydrofluorocarbons, T_{crit} = Critical temperature, p_{crit} = Critical pressure, ODP = Ozone Depletion Potential relative to R-11, GWP = Global Warming Potential relative to CO₂ on 100-year time horizon, SG = Safety group classification.

Ogni refrigerante porterà ad un COP e ad una resa termica diversa. Per questo, nel valutare l'impatto ambientale di un refrigerante in confronto con un altro, si deve anche considerare, per ogni caso, quante emissioni si possono evitare durante il ciclo di vita tecnica.

2.6 Prestazioni misurate – “Prove of Concept”

Figura 7 – COP misurati su diverse pompe di calore ad alta temperatura (Da: Wilk et al., 2020).



Nella Figura 7 si riportano i risultati relativi alle prestazioni misurate su diverse pompe di calore ad alta temperatura (Wilk et al, 2020). I punti in giallo si riferiscono alle misure fatte nel Dryficiency Project dell’EU (vedi anche il Capitolo 4.5). Nella Tabella II, si riportano i valori numerici di queste misure.

Tabella II – Prestazioni misurati nel Dryficiency Project dell’EU (da: Wilk et al, 2020).

Tevap,in	Tcond,out	COP
°C	°C	
88,3	120,9	4,6
88,4	140,9	3,7
88,4	150,9	3,2
88,6	160,7	2,7

Pompe di calore in grado di produrre di vapore come tecnologia abilitante per la decarbonizzazione di processi industriali

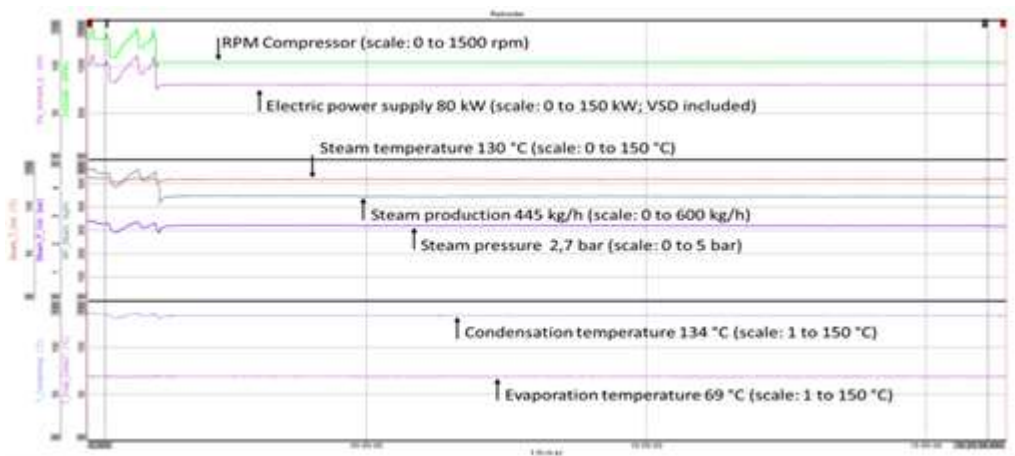


Figura 8 – Dati misurati per la produzione di vapore con una pompa di calore VC e il R1233zd come refrigerante (Da: Hamacher, 2023).

Nella Figura 8, si mostra il risultato di 15 ore di misurazioni in condizioni stabili durante le prove di laboratorio su una macchina commerciale. Durante queste prove, con una differenza tra la temperatura di evaporazione e quella di condensazione pari a 60 °C, il valore medio del COP misurato è 3,5. Questi risultati sono in linea con i dati riportati nella Tabella II e con i dati presentati nelle Figure 4, 5 e 6.

Nella Figura 9 sono riportati delle misure realizzate in condizioni non stazionarie. Nella figura si mostra come i parametri del sistema variano quando la domanda di vapore aumenta velocemente. La pressione scende e, grazie all'incremento della resa termica della macchina, il sistema si stabilizza rapidamente con una produzione di vapore più alta ma con una pressione e temperatura inferiore.

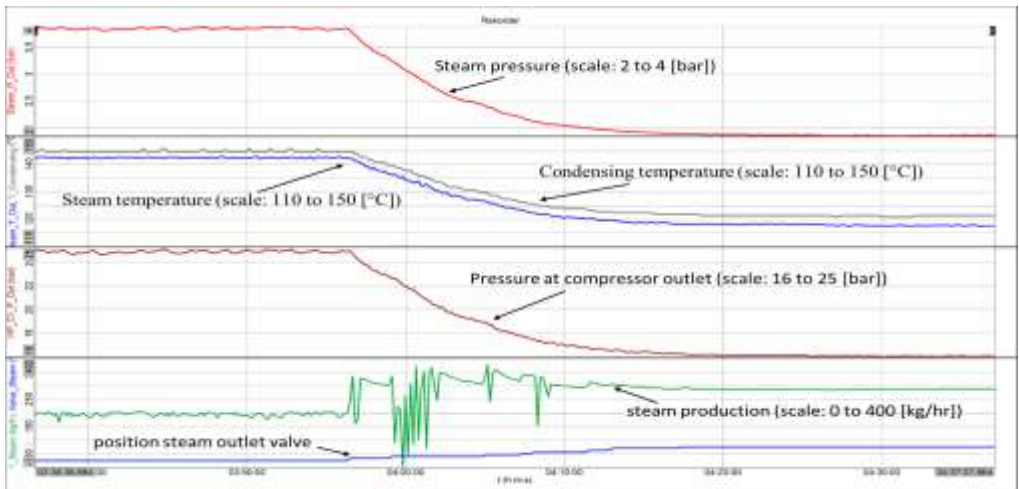


Figura 9 – Il comportamento dinamico misurato di una pompa di calore VC e con il R1233zd come refrigerante durante la produzione di vapore (Da: Hamacher 2024).

3. POMPE DI CALORE PER LA GENERAZIONE DI VAPORE

3.1. La produzione di vapore

Il consumo di vapore nell'industria è molto diffuso. Infatti, per l'energia termica nella fascia di 100–250 °C, il vapore è di gran lunga il vettore più importante per l'energia termica. Di qui l'importanza di poter impiegare delle pompe di calore per la produzione di vapore.

Da Klute et al. 2024, sono stati identificati cinque metodi per produrre vapore con una pompa di calore (vedi la Figura 10). Klute et al. 2024 riportano anche una lista di 20 macchine oggi esistenti che sono in grado di produrre vapore d'acqua tra le 120 e le 180 °C, di cui 15 sono a ciclo chiuso del tipo VC. Cinque macchine usano un ciclo chiuso ad assorbimento (AB). Delle 15 macchine del tipo VC, 4 hanno una valutazione TLR² di 8 o 9.

Queste 4 macchine possono essere usate per produrre vapore secondo le configurazioni A, B, C e D riportate nella Figura 10. Di queste 4 configurazioni le prime due sembrano oggi le più promettenti perché intrinsecamente più semplici e efficienti in confronto con le altre due che usano un generatore di vapore esterno alla pompa di calore.

L'IEA Annex 58 2023 ha identificato 22 fornitori di tecnologia per pompe di calore ad alta temperatura che hanno un TRL di 8 o 9 e una temperatura di condensazione di 120 °C o più alta.

² Il TRL (Technology Readiness Level) è una metrica di valutazione del grado di maturità tecnologica di un prodotto o un processo. È basata su una scala di valori da 1 a 9, dove 1 è il più basso (ricerca di base) e 9 il più alto (prima produzione).

Pompe di calore in grado di produrre di vapore come tecnologia abilitante per la decarbonizzazione di processi industriali

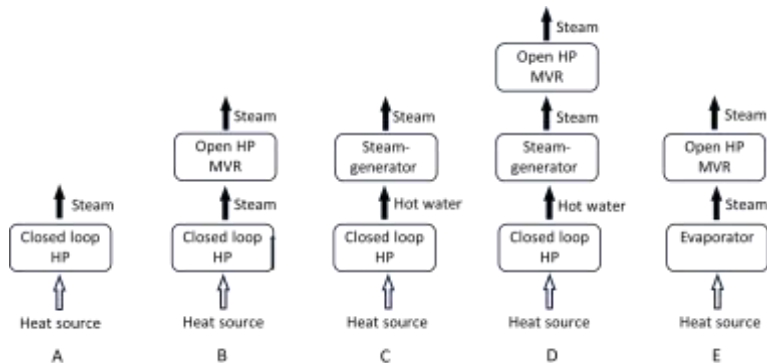


Figura 10 – Cinque concetti per produrre vapore d’acqua riqualificando calore di scarto con una pompa di calore (Da: Klute et al. 2024)..

3.2 Combinazione pompa di calore VC con macchina MVR

Nella Figura 11 si riporta in modo schematico come una pompa di calore VC possa essere combinata con una macchina MVR. Il vantaggio di questa soluzione sta nel fatto che la pompa di calore tipo VC è efficiente per produrre vapore a bassa pressione mentre la macchina MVR è più efficiente per portare il vapore a delle pressioni più elevate.

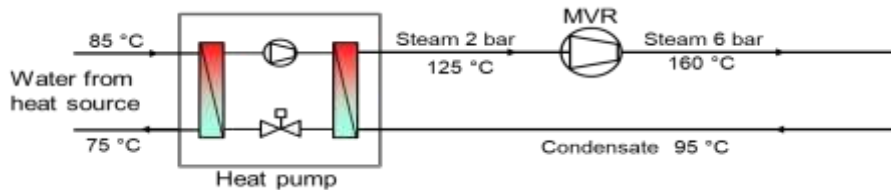


Figura 11 – Combinazione di una macchina VC ed una macchina MVR per produrre vapore a pressioni elevate (> 4 bar circa).

Con le temperature riportate nella Figura 11, si può ottenere un consumo elettrico di circa 20 % inferiore rispetto ad una sola pompa di calore tipo VC.

3.3 Condensatori sviluppati per la produzione di vapore

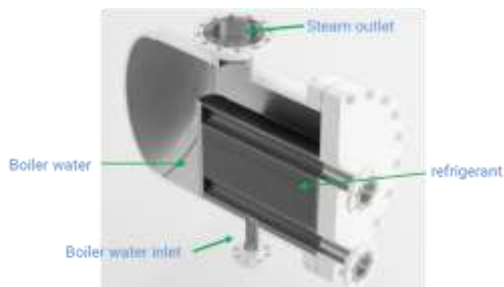


Figura 12 – Esempio di un generatore di calore con un condensatore integrato.

Sono stati sviluppati dei condensatori che possono funzionare come generatore di vapore, per rendere la produzione di vapore più efficiente, (vedi la Figura 12). In questo modo si può evitare un circuito intermedio per trasferire il calore e limitare al massimo la differenza di temperatura tra il refrigerante e l'acqua da evaporare.

4. APPLICAZIONI INDUSTRIALI

4.1 Processi di essiccazione

L'essiccazione è uno dei processi più energivori che si trovano nell'industria. In particolare nelle cartiere, l'agroalimentare e tanti altri.

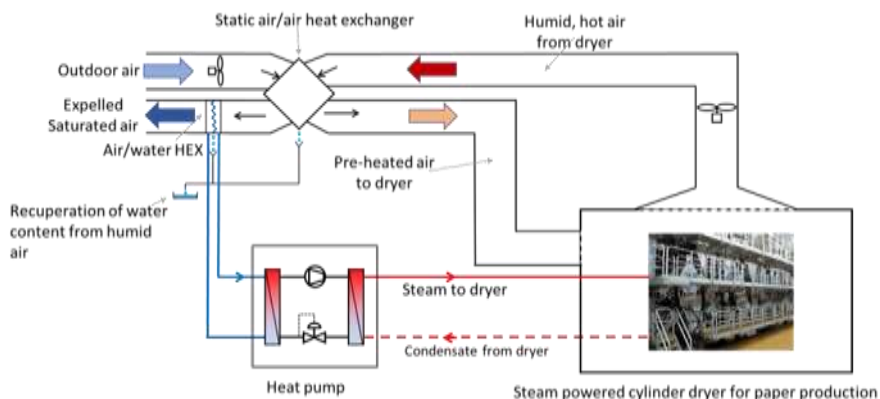


Figura 13 – Impianto di essiccazione aperta alimentata a vapore. La pompa di calore recupera il calore rimanente nelle fumane e la trasforma in vapore per alimentare la macchina continua di una cartiera.

Spesso gli essiccatori sono alimentati con vapore. Una pompa di calore è in grado di recuperare l'energia termica all'uscita dell'essiccatore e di trasformare questa energia in vapore che può alimentare di nuovo il processo, come illustrato nella Figura 13. In questo modo non si recupera soltanto calore ma anche una parte dell'acqua presente nell'aria calda all'uscita dell'essiccatore.

4.2 Processi di distillazione

Il processo di distillazione è caratterizzato dal fatto che tutta l'energia latente fornita al processo per evaporare il distillato, viene recuperata nel condensatore. Nella Figura 14, si mostra come una pompa di calore che produce vapore, può essere utilizzata per riqualificare questo flusso energetico e riutilizzarlo nel ribollitore.

Pompe di calore in grado di produrre di vapore come tecnologia abilitante per la decarbonizzazione di processi industriali

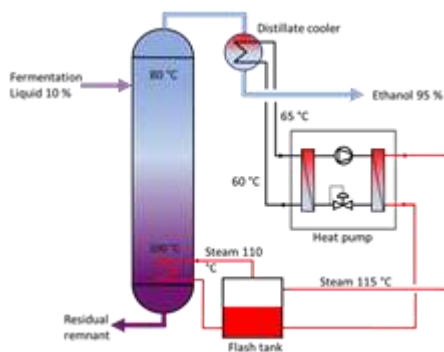


Figura 14 – Impianto di distillazione per la produzione di bioetanolo (da Takenobu Kaida).

4.3 Pompa di calore con cogeneratore MCI

In Italia, gli impianti di cogenerazione con motori a combustione interna sono molto diffusi. Questi sistemi hanno l'inconveniente intrinseco che circa la metà dell'energia termica recuperabile ha una temperatura al di sotto del 95 °C. Là dove nel sistema produttivo si usa soltanto vapore, si può usare una pompa di calore per recuperare questa energia termica a bassa temperatura e trasformarla in vapore, come illustrato nella Figura 15. In certi casi, questa può essere una soluzione molto interessante e permettere l'uso di un cogeneratore MCI in casi in cui un tale impianto da solo non sarebbe economico. Quando il cogeneratore produce energia elettrica in eccesso, questa può alimentare la pompa di calore per ridurre il relativo costo medio.

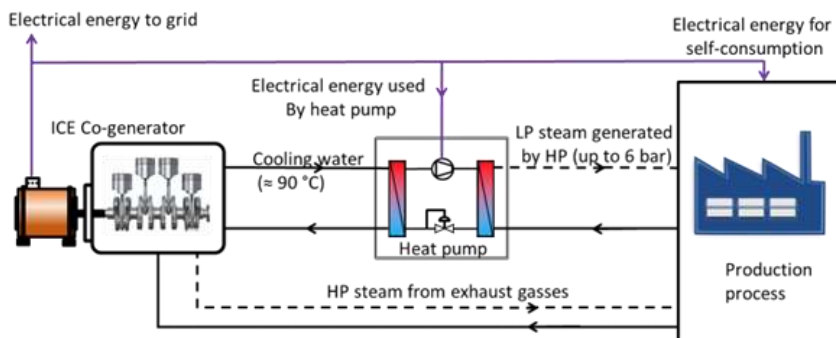


Figura 15 – Vista schematica di un impianto composta da un cogeneratore MCI ed una pompa di calore elettrica in grado di produrre vapore.

4.4 Progetti dimostrativi

Progetti dimostrativi interessanti, con pompe di calore che producono vapore sono:

- 1) Dryefficiency Project. (<https://dryefficiency.eu/demonstrations/scanship-waste-management/>). In questo progetto si usa una macchina MVR per produrre vapore, circa 1 t/h, per alimentare un impianto per l'essiccazione di fanghi.
- 2) AHEAD project (<https://nefi.at/en/project/ahead>). Si produce circa 2,3 t/h vapore a 184 °C usando calore di scarto da un impianto di refrigerazione.

- 3) PUSH2HEAT Project (<https://push2heat.eu/demo-sites/weissenborn-germany/>). In questo progetto si produce circa 1 t/h di vapore a 2,2 bar con una pompa di calore a due stadi sfruttando il calore di scarto delle fumane dell'essiccatore della macchina continua di una cartiera.

5 Aspetti economici

Ogni applicazione industriale ha delle condizioni operative specifiche, per esempio le temperature dei processi, la resa termica richiesta, il numero di ore di funzionamento annuo, ecc. Come illustrato nel Capitolo 2.4 le prestazioni energetiche possono cambiare in modo significativo da caso a caso. Perciò, non si possono stabilire delle regole generali sull'economicità per pompe di calore industriali, ma ogni progetto richiede un'attenta analisi ad hoc.

5.1 Total costs of ownership

Il rapporto CAPEX/OPEX per una pompa di calore è superiore di quello per un impianto a metano. Ciononostante, su 10 anni di funzionamento, il costo per l'energia elettrica, con una tariffa di € 0,175 €/kWh, il COP pari 4 e 7000 ore di funzionamento all'anno, rappresenta circa il 75 % del Total Costs of Ownership di un impianto. Di cui l'importanza di puntare a un COP più alto possibile. Infatti, un aumento del COP del 10 %, e.g. da 4,0 a 4,4, ripaga in 10 anni un incremento dell'investimento di 40 %.

5.2 CAPEX ed OPEX

CAPEX:

Klute et al. 2024 riporta una fascia per il CAPEX da 200 €/kW_{th} a 1300 €/kW_{th}, mentre l'IEA Annex 58 2023, ha trovato una variazione da 100 €/kW_{th} a 2000 €/kW_{th}.

Cause per questa dispersione notevole sono:

- 1) La resa termica dipende da condizioni di funzionamento,
- 2) Il numero delle macchine prodotte annualmente, per certe modelli è ancora molto basso,
- 3) Per l'industria al momento non ci sono soluzioni standard. La maggior parte delle macchine sono state fatte "custom made".

Le macchine in grado di produrre direttamente il vapore costano, indicativamente, il 15 % in più rispetto ai modelli per la produzione di acqua surriscaldata.

OPEX:

Nella Figura 16 si mostrano i prezzi unitari per l'energia elettrica ed il metano per il settore industriale in funzione del consumo annuo del cliente (fonte: Eurostat, per il secondo semestre 2023). Nella stessa figura si riporta anche il costo unitario dell'energia elettrica diviso per quello dell'energia termica prodotto dal metano ($R_c = \text{Costo}_{el}/\text{Costo}_{CH_4}$). Una pompa di calore deve avere, mediamente, un COP superiore a questo rapporto, per poter essere economicamente interessante. Perciò, in Italia, una pompa di calore industriale deve avere un COP medio superiore a 2,5 — 3,0. Dalla Figure 4 e 5 risulta che questa è possibile quando le condizioni in cui la macchina deve operare sono adeguate.

Pompe di calore in grado di produrre di vapore come tecnologia abilitante per la decarbonizzazione di processi industriali

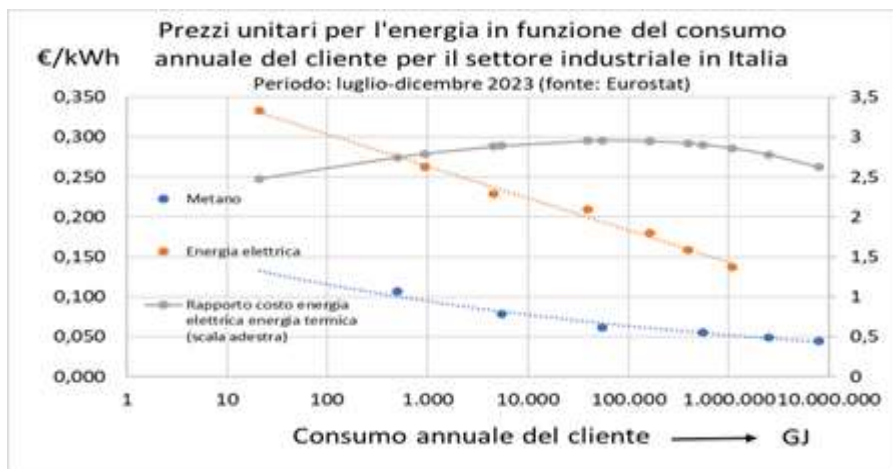


Figura 16 – Prezzi unitari per l'energia in funzione del consumo annuale del cliente per il settore industriale in Italia. Periodo: luglio-dicembre 2023 (fonte: Eurostat).

5.3 Tempo semplice di ritorno

Nella Figura 17 si riporta una matrice che mostra il tempo di ritorno semplice per un impianto con una pompa di calore che produce direttamente vapore, per un intervallo di costi per l'energia elettrica e per l'energia termica (n.b. eventuali incentivi e costi per il CO₂ non sono inclusi).

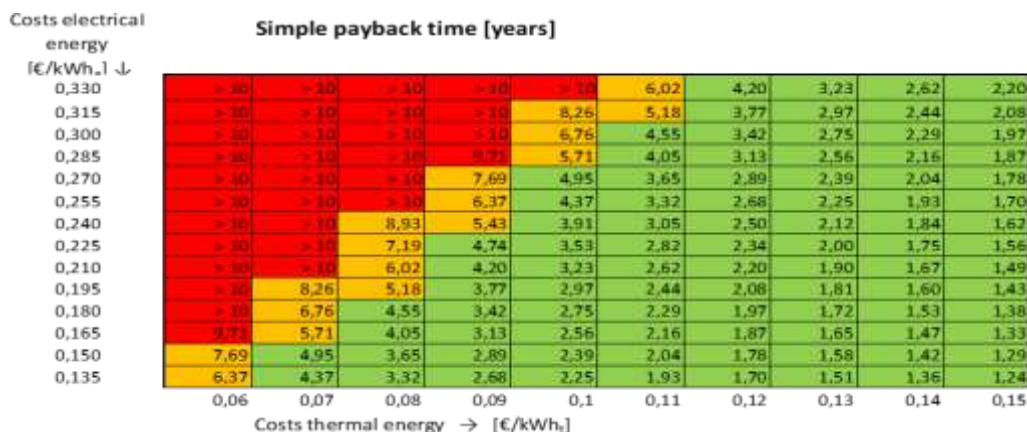


Figura 17 – Tempo di ritorno semplice in anni, per un impianto di una pompa di calore che produce direttamente vapore (Parametri per calcolo: ore di funzionamento = 6.000 ore/anno; COP = 4; potenza termica media in uscita = 600 kW; Investimento = 500 k€; Manutenzione = 16.000 k€/anno).

C'è da tenere presente che il rapporto R_c tra i costi dell'elettricità e i costi dell'energia termica indica soltanto una condizione minima ma non è sufficiente per garantire un ragionevole tempo di ritorno dell'investimento. È il costo dell'energia termica risparmiata che definisce, insieme al rapporto R_c , il tempo di ritorno.

CONCLUSIONI

Pompe di calore ad alta temperatura in grado di produrre direttamente vapore, rappresentano una importante tecnica abilitante, per la decarbonizzazione di tanti processi termici industriali. Con le macchine attualmente disponibile sul mercato tantissimi processi industriali possono già essere elettrificati in modo efficiente e ridurre in questo modo loro impatto ambientale. Misure nel campo e esperienza operativa hanno dimostrato la validità della tecnologia.

Il COP e la resa termica della macchina, in funzione delle temperature operative, sono i parametri principali da valutare in fase di progettazione concettuale. Per una valutazione energetica il COP è l'indicatore più significativo. Per una valutazione economica anche la resa termica va presa in considerazione dato l'impatto di questo parametro sul CAPEX.

Visto la sensibilità di una pompa di calore alle temperature operative e la particolarità di tanti processi industriali, si deve fare uno sforzo particolare per la corretta integrazione di questa tecnologia nel sistema termico in cui deve operare. Perché l'inserimento in modo ottimale è critico per il risultato finale. Una ottimizzazione del sistema termico esistente, per esempio con l'aiuto di un Pinch Analysis fa parte di questo processo.

Dato il peso relativo del costo per l'energia elettrica sull'economicità dell'investimento, in molti casi, conviene massimizzare il COP anche a costo di un CAPEX maggiore.

Disclosure: l'autore è attivo per la promozione sul mercato Italiano di pompe di calore industriali e ha quindi un interesse economico nella diffusione di questa tecnologia.

BIBLIOGRAFIA

- Hamacher T. 2023. Industrial high temperature heat pump for steam and hot water production, 14th IEA Heat Pump Conference, Chicago
- Hamacher T. 2024. Steam production with piston compressor based heat pump. High Temperature Heat Pump Symposium, Copenhagen
- IEA HPT Annex 58. 2023. High-Temperature Heat Pumps Task 1 – Technologies Task Report. Report No. HPT-AN58-2, ISBN 978-91-89821-34-7
- Kiss A., Infante Ferreira C.A. 2017. Heat Pumps in Chemical Process Industry”, CRC Press
- Kluth S., Budt M., van Beek M., Doetsch C. 2024. Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles. Energy Conservation and Management, 199
- Wilk V., Helminger F., Lauermann M., Sporr A., Windholz B. 2020. High temperature heat pumps for drying – first results of operation in industrial environment. 13th IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea