



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea di Primo Livello

Pompe di calore industriali: caratteristiche e applicazioni

Industrial heat pumps: characteristics and applications

RELATORE: Ing Marco Noro

LAUREANDA: Elisabetta Venturelli

ANNO ACCADEMICO: 2010/2011

A mia Nonna

Indice

Sommario	5
Introduzione	7
CAPITOLO 1 Generalità sulle pompe di calore	9
1.1.Pompa di calore e impianto frigorifero a confronto	9
1.2.Efficienza nell'utilizzo delle pompe di calore	10
1.3.COP e performance	11
1.4.Efficienza dal punto di vista delle emissioni di CO ₂	12
1.5.I due principali tipi di pompa di calore	13
1.5.1.Ciclo a compressione meccanica del vapore	13
1.5.2.Ciclo ad assorbimento	15
1.6.Fluidi di lavoro utilizzati	17
1.6.1.Refrigeranti sintetici	17
1.6.1.1.CFC e HCFC	18
1.6.1.2.HCF come sostituti	18
1.6.2.Refrigeranti naturali	19
1.6.3.Miscele	21
1.6.3.1.Nuove miscele	22
CAPITOLO 2 Caratteristiche e prestazioni delle pompe di calore	
 utilizzate in ambito industriale	25
2.1.Panoramica delle pompe di calore industriali	25
2.2.Pompe di calore tradizionali: schemi costruttivi, prestazioni e miglioramenti	28
2.2.1.Pompe di calore attivate meccanicamente	28
2.2.1.1.Sistemi a compressione a ciclo chiuso alimentati elettricamente	29
.1.Modifiche attuabili sul ciclo chiuso	29
2.2.1.2.Pompa di calore a compressione a ciclo aperto alimentata elettricamente	33
2.2.1.3.Pompa di calore a compressione alimentata da motore a gas	34
2.2.1.4.Miglioramenti sui componenti strutturali del ciclo a compressione	36

.1.Compressore	36
.2.Valvole di espansione	38
.3.Scambiatore di calore	39
2.2.2.Pompe di calore attivate termicamente	40
2.2.2.1.Pompa di calore a ricompressione termica di vapore	41
2.2.2.2.Pompa di calore ad assorbimento	42
.1.Pompa di calore ad assorbimento, tipo I	42
.2.Trasformatore di calore	43
.3. Coppie di fluidi di lavoro per pompe di calore ad assorbimento	46
2.2.3.Aree di applicazione	47
2.3.Nuovi cicli a pompa di calore	48
2.3.1.Pompe di calore ad adsorbimento	48
2.3.2.Sistema ibrido ad energia solare	51
2.3.3.Sistema ibrido ad infrarossi e frequenze radio	53
2.3.4.Pompe di calore alimentate da energia geotermica	55
2.3.5.Pompa di calore chimica	56
2.3.6.Pompa di calore termoacustica	58
CAPITOLO 3 Applicazioni della pompa di calore in ambito industriale.....	60
3.1.Integrazione della pompa di calore nei processi produttivi	60
3.1.1.Pinch Technology	61
3.2.Applicazioni nell'industria alimentare	64
3.2.1.Processo di pastorizzazione del latte:	
metodi tradizionali e pompa di calore a confronto	64
3.2.1.1.Prestazioni di una pompa di calore ad assorbimento	66
3.2.1.2.Condizioni operative di una pompa di calore a semplice compressione	67
3.2.2.Recupero di calore in un caseificio per il riscaldamento dell'edificio	68
3.2.3.Sistemi di essiccazione per prodotti alimentari	70
3.2.3.1.Pompa di calore per l'essiccazione di erbe aromatiche	71
3.2.4.Trattamento di acque reflue in un frantoio	73
3.3.Impianti di produzione di legno e cellulosa.....	76

3.3.1.Essiccazione del legno.....	76
3.3.2.Produzione di carta e cellulosa	78
3.4.Processi chimici	82
3.4.1.Processo di cristallizzazione in controcorrente	82
3.4.2.Processo di cristallizzazione evaporativa per contatto diretto.....	83
3.4.3.Processi di distillazione	84
3.4.4.Trasformatore di calore in un'industria di gomma	85
3.4.5.Applicazione di AHP ad un impianto di distillazione multi effetto	86
3.5.Industria tessile.....	88
3.6.Valutazione economica.....	90
3.6.1.Esempio di analisi tra alternative.....	91
Conclusioni	93
Bibliografia	95
Ringraziamenti.....	103

Sommario

La pompa di calore è una tecnologia consolidata per quanto riguarda il riscaldamento di ambienti o di acqua sanitaria, tuttavia il suo potenziale non si limita all'utilizzo nel semplice campo residenziale, ma anche in quello industriale.

L'elaborato presenta una panoramica della tecnologia della pompa di calore utilizzata in ambito industriale: vengono presi in considerazione cicli tradizionali come quelli a compressione e ad assorbimento, su cui sono stati apportati miglioramenti per aumentarne l'efficienza, e nuovi cicli che nell'industria non avevano ancora trovato applicazione.

Infine vengono presentati dei casi applicativi della pompa di calore in processi industriali attraverso schemi costruttivi e dati operativi, come processi di essiccazione, pastorizzazione, distillazione e refrigerazione di acqua di processo.

Introduzione

Negli ultimi due decenni la continua corsa allo sviluppo di energie rinnovabili, come alternativa rispetto all'utilizzo di risorse energetiche fossili, mista ad una maggiore attenzione verso il risparmio energetico, in termini di miglioramento dell'efficienza, hanno portato alla progressiva maturazione di una tecnologia che potrà avere un ruolo chiave all'interno di questo contesto: la pompa di calore.

A causa del continuo aumento del prezzo dei combustibili e degli impatti ambientali dell'azione umana, come il riscaldamento globale, la pompa di calore è diventata un mezzo di notevole interesse per il recupero dell'energia: poiché si tratta di un'apparecchiatura che offre alternative economiche per il recupero del calore da diverse fonti, naturali e non, in modo da permettere lo sfruttamento di queste in varie applicazioni industriali, commerciali e residenziali.

Un semplice esempio consiste nel recupero dell'energia termica di risorse rinnovabili, come il calore naturale oppure quello di scarto da processi industriali, e il conseguente riutilizzo ad una temperatura più elevata in una serie di servizi fondamentali come il riscaldamento o il raffreddamento di ambienti, il riscaldamento dell'acqua sanitaria oppure di nuovo in processi industriali.

Un altro merito che va assegnato a questa tecnologia è il notevole contributo che essa apporta nella riduzione dei gas ad effetto serra, in particolare per quanto riguarda le emissioni di CO₂, grazie soprattutto ai fluidi lavoro che questa utilizza e alla sua possibilità di recuperare calore da numerose fonti. Basti pensare che questa tecnologia può ridurre circa il 50% delle emissioni di anidride carbonica all'interno del settore del riscaldamento di edifici, mentre circa il 5% per quanto riguarda il settore industriale; il tutto può corrispondere ad un risparmio di un 8% sull'emissione globale di CO₂ [1].

L'impatto positivo sull'ambiente dipende però dal tipo di pompa utilizzato, e dall'efficienza della forza motrice utilizzata. A questo riguardo grandi progressi si stanno ottenendo per quanto concerne possibili applicazioni della pompa di calore nei vari settori industriali grazie alle molte attività di ricerca che lavorano per aumentare l'efficienza dei singoli componenti, nonché lo sviluppo di nuovi sistemi ibridi volti al miglioramento dell'efficienza globale del sistema stesso.

In questo elaborato si vuole presentare la situazione della tecnologia pompa di calore in ambito industriale, quindi in particolare le applicazioni di questa tecnologia nell'ambito dei processi industriali. L'elaborato è suddiviso in tre capitoli.

Nella prima parte vi è una trattazione generale delle caratteristiche, nonché principi di funzionamento delle pompe di calore.

La seconda è dedicata più specificatamente all'analisi delle pompe di calore utilizzate nel settore industriale ed i miglioramenti avuti con l'utilizzo di nuove tecnologie e lo sviluppo di nuovi componenti.

La terza parte concerne invece una serie di applicazioni industriali in cui la pompa di calore è utilizzata.

CAPITOLO 1

Generalità sulle pompe di calore

1.1.Pompa di calore e impianto frigorifero a confronto

Il calore in natura fluisce da una sorgente a temperatura maggiore verso una a temperatura minore, tuttavia dalla formulazione del secondo principio della termodinamica possiamo affermare la possibilità di trasferire calore da un corpo a temperatura più bassa a un altro a temperatura più elevata, necessariamente attraverso la somministrazione di lavoro o calore dall'esterno.

Con il termine pompa di calore quindi s'intende un'installazione che, operando con continuità, preleva calore da una sorgente a temperatura più bassa, e lo rende disponibile per l'utilizzo esterno ad una temperatura mediamente superiore.

Quando si parla di riscaldamento termodinamico attraverso una pompa di calore ci si riferisce quindi all'operazione di elevazione del livello termico dell'energia disponibile sotto forma di calore, operazione indispensabile quando si vuole che l'energia termica sia resa utilizzabile a temperatura superiore a quella dell'ambiente naturale esterno [2]

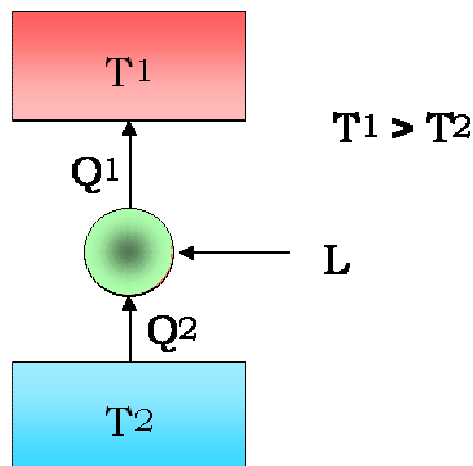


Figura 1.1: Principio operativo di un ciclo inverso [3]

Dal punto di vista del principio operativo non ci sono differenze tra un'installazione frigorifera ed una pompa di calore rappresentato in figura 1.1; la differenza sostanziale consiste in ciò che costituisce l'effetto utile dell'installazione:

- un impianto frigorifero asporta calore Q_2 da un sistema a temperatura inferiore a quella ambiente;

- una pompa di calore cede calore Q_1 ad un sistema a temperatura superiore a quella ambiente.

Di conseguenza risultano differenti solo i campi di temperatura all'interno dei quali lavorano gli impianti frigoriferi e a pompa di calore; tuttavia non sono rari i casi in cui un'installazione lavori come impianto frigorifero allo scambiatore freddo, e come pompa di calore allo scambiatore caldo; in questo caso il campo di temperatura in cui ci si trova ad operare è a cavallo della temperatura ambiente.

Le principali fonti di calore utilizzate in entrambi gli impianti possono essere sorgenti naturali appartenenti all'ambiente esterno come il suolo, aria o acqua oppure fonti di calore artificiali, come flussi di calore emessi da processi industriali e non.

Soprattutto in ambito industriale il pregio delle pompe di calore consiste nella capacità di elevare il livello termico di calore, disponibile già ad una temperatura superiore a quella ambiente, poiché operativamente lo scambiatore freddo preleva il calore di scarto derivante dal processo produttivo e lo utilizza per soddisfare una domanda di calore interna allo stesso processo produttivo, utilizzando comunque una quantità relativamente piccola di energia di alta qualità come elettricità o combustibili.

Inoltre le pompe di calore possono anche essere utilizzate per il raffreddamento in quanto il calore può venire poi trasferito nella direzione opposta cioè dall'applicazione che viene refrigerata verso l'ambiente circostante, quest'ultimo sempre ad una più alta temperatura.

1.2. Efficienza nell'utilizzo delle pompe di calore

Le pompe di calore offrono il modo più efficiente per fornire riscaldamento e raffreddamento in molte applicazioni poiché possono utilizzare fonti di calore rinnovabili accedendone attraverso l'ambiente naturale. Infatti anche a temperature che in genere noi consideriamo essere basse l'aria, la terra e l'acqua contengono calore utile poiché questo è continuamente rigenerato dal sole. Allo stesso modo le pompe di calore possono utilizzare altre fonti di calore derivanti da rifiuti di processi industriali, di impianti di raffreddamento dell'aria o di ventilazione.

Teoricamente il calore totale erogato da una pompa di calore è pari al calore estratto dalla fonte, più la quantità di energia utilizzata per l'alimentazione: per esempio una pompa di calore alimentata da un motore elettrico, utilizzata per il riscaldamento di edifici, riesce con la somministrazione di 20-40 kWh di energia elettrica a produrre in media 100 kWh; pompe di calore industriali invece possono raggiungere prestazioni più elevate tali da riuscire a fornire la stessa quantità di calore con solo 3-10 kWh di energia elettrica[2].

In alcune regioni del mondo, le pompe di calore svolgono già un ruolo importante nei sistemi energetici, ma se il proposito di questa tecnologia è quello di raggiungere un uso

più diffuso, vi è la necessità di attuare uno sforzo più decisivo per stimolare il mercato e ottimizzarne ulteriormente la tecnica.

Infatti nonostante l'evoluzione di questa tecnologia nel corso degli ultimi decenni, essa ancora non viene applicata al massimo delle sue capacità a causa di alcuni problemi come: gli elevati costi iniziali di investimento, la progettazione del sistema, nonché integrazione con i sistemi già funzionanti; dal momento che sono ancora pochi i principali fornitori di sistemi di refrigerazione in grado di offrire pompe di calore di grandi dimensioni.

Una prima classificazione riguardo le pompe di calore esistenti sul mercato può essere fatta in base al tipo di energia richiesta per il funzionamento [4]:

- Energia meccanica (derivante usualmente da motori elettrici) per le pompe di calore con ciclo a compressione di vapore o aria;
- Energia termica ad elevata temperatura per le pompe con ciclo ad assorbimento oppure termocompressione di vapore.

1.3.COP e performance

In termini energetici, le prestazioni di una pompa di calore si valutano per mezzo del valore del coefficiente di effetto utile (Coefficient Of Performance, COP) che è definito come il rapporto tra l'effetto energetico utile e l'energia necessaria per ottenerlo [4].

$$COP_{pc} = \frac{|Q_1|}{|L|}$$

Q_1	calore fornito alla sorgente a temperatura più alta
L	lavoro impiegato per effettuare la fornitura di calore

Il COP è variabile a seconda del tipo di pompa di calore e delle condizioni di funzionamento ed in genere ha valori prossimi a 3. Questo valore però sarà tanto maggiore quanto più bassa è la temperatura a cui il calore viene ceduto nel condensatore e quanto più alta quella della sorgente da cui viene assorbito nell'evaporatore. Va tenuto conto inoltre che la potenza termica resa dalla pompa di calore dipende dalla temperatura a cui la stessa assorbe calore.

Nel caso di pompe di calore elettriche a compressione i termini di questo rapporto diventano a numeratore il calore fornito dalla pompa di calore [kW] e a denominatore l'elettricità fornita al compressore [kW]. Questo vuol dire che per 1 kWh di energia elettrica consumato, fornirà 3 kWh di calore al mezzo da riscaldare.

Per quanto riguarda invece le pompe di calore azionate da energia termica viene definito un altro coefficiente che indica il rapporto di energia primaria (Primary Energy Ratio, PER), in cui l'energia fornita rappresenta il potere calorifero superiore del combustibile fornito.

Tale coefficiente può essere definito anche per le pompe di calore ad azionamento elettrico moltiplicando il COP per l'efficienza della produzione di energia:

$$PER = \eta * COP$$

dove η è intesa come l'efficienza di conversione dell'input di energia primaria derivante dall'azione del compressore.[5]

L'importanza di questi coefficienti deriva dal fatto che ci danno una misura quantitativa del salto di temperatura che il nostro sistema produce, cioè la differenza tra la temperatura della sorgente di calore e la temperatura di uscita del calore dalla pompa stessa, ne troviamo un esempio in tabella 1.1.

Se consideriamo una pompa di calore ideale, cioè che compie un ciclo di Carnot inverso, il COP è determinato unicamente dal rapporto tra la temperatura di condensazione e la variazione tra questa temperatura e quella di evaporazione.

Tabella 1.1: PER e COP per diverse pompe di calore industriali [5]

<i>Tipo di pompa di calore</i>	<i>COP</i>	<i>PER</i>
Compressione meccanica di vapore,ciclo aperto	10-30	-
Elettrica a ciclo chiuso	3.0-8.0	-
Meccanica a ciclo chiuso	-	1.0-2.0
Ad assorbimento	-	1.1-1.8
Trasformatori di calore ad assorbimento	-	0.45-0.48

Le pompe di calore industriali spesso hanno valori più alti per i due coefficienti rispetto a quanto si può trovare nel caso di applicazioni per edifici residenziali.

1.4.Efficienza dal punto di vista delle emissioni CO₂

Dal momento che le pompe di calore consumano meno energia primaria rispetto agli altri sistemi tradizionali di riscaldamento, riescono ad essere un'importante tecnologia per ridurre le emissioni di gas che danneggiano l'ambiente, quali l'anidride carbonica CO₂, anidride solforosa SO_x e ossidi di azoto NO_x [2,6].

Il problema più importante da analizzare riguarda l'effetto serra; poiché una pompa di calore contribuisce ad una diminuzione dell'effetto serra solo se l'intero sistema, compresa la produzione di energia diminuisce le emissioni di CO₂ rispetto agli altri metodi di riscaldamento.

Tuttavia se consideriamo per esempio il caso di pompe ad azionamento elettrico, l' impatto ambientale dipende molto da come l'elettricità è prodotta: per esempio, pompe di calore azionate da energia idroelettrica o energie rinnovabili riducono le emissioni in modo più significativo rispetto a casi in cui l'elettricità sia generata da centrali elettriche a gas, piuttosto che alimentate a carbone.

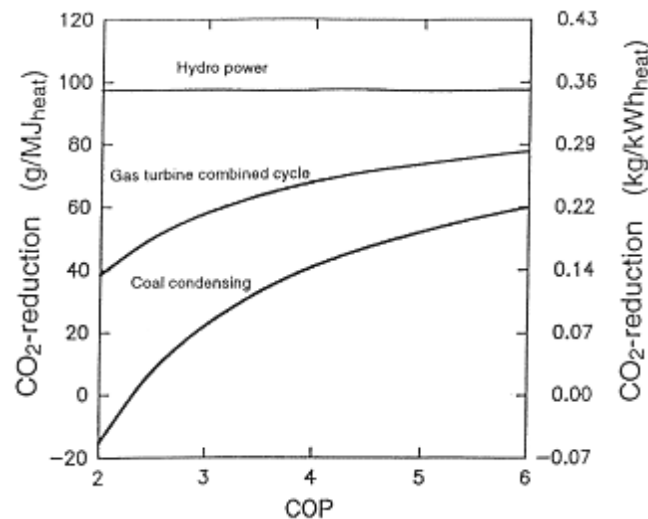


Figura 1.2: Riduzione delle emissioni di CO₂ [6]

Questa figura 1.2 mostra il livello di riduzione del CO₂ in funzione del valore del COP mettendo a confronto pompe di calore elettriche il cui funzionamento dipende da impianti diversi di produzione di energia elettrica come impianti a condensazione di carbone.

1.5.1 due principali tipi di pompe di calore

Riprendendo la classificazione accennata in precedenza che si basava sul tipo di energia richiesta per il funzionamento delle pompe di calore, analizziamo ora in modo più accurato i principi che stanno alla base del funzionamento delle diverse pompe di calore in commercio; più precisamente questi si possono ricondurre a 2 modelli standard :

- ciclo a compressione di vapore;
- ciclo ad assorbimento

1.5.1.Ciclo a compressione meccanica del vapore

La pompa di calore è costituita da un circuito chiuso, percorso da uno speciale liquido volatile definito fluido di lavoro o refrigerante che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato di liquido o di vapore.

I componenti principali in un sistema a pompa di calore, come si vede in figura 1.3, sono 4: il compressore, la valvola di espansione e di due scambiatori di calore, di cui uno funge da evaporatore e l'altro da condensatore [2,4,7].

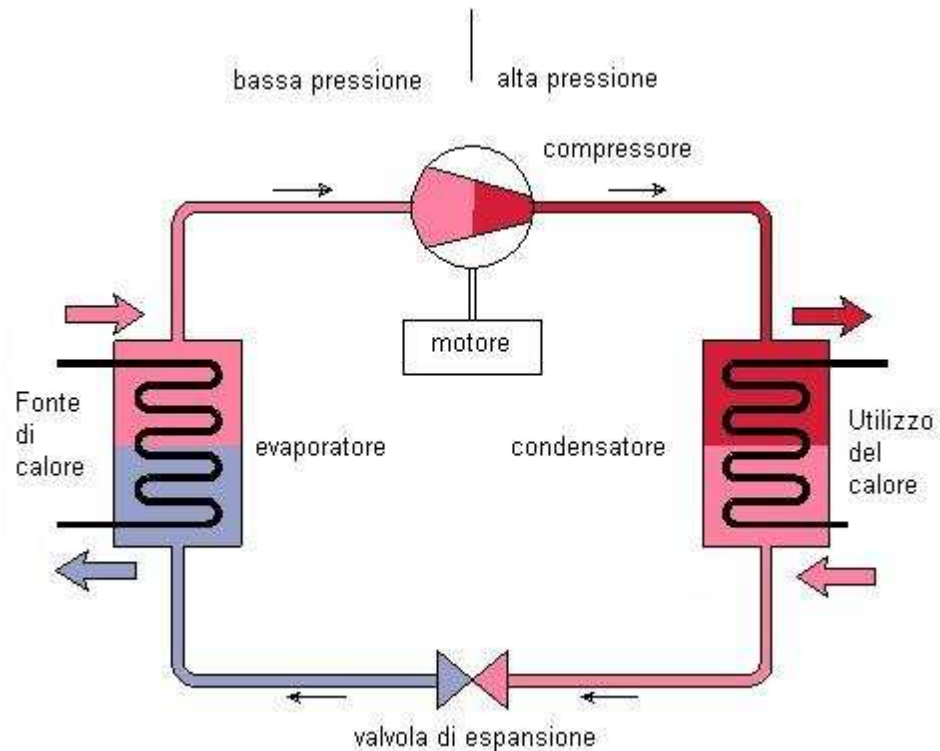


Figura 1.3: Pompa di calore a compressione meccanica [8]

Vediamo ora cosa accade nei vari componenti del ciclo:

1. Nell'evaporatore la temperatura del fluido di lavoro è mantenuta inferiore alla temperatura della sorgente di calore, causando in questo modo un flusso di calore dalla fonte di calore al liquido, in modo da permettere l'evaporazione di quest'ultimo. Ricordando che l'evaporazione di un fluido può avvenire anche a temperature basse purché la pressione sia anch' essa adeguatamente bassa; il vapore così ottenuto viene inviato in un compressore;
2. Nel compressore, il vapore viene compresso affinché raggiunga una pressione e temperatura maggiore;
3. Il vapore caldo entra poi nel condensatore, dove condensa e cede calore utile all'impianto di distribuzione del calore;
4. Attraverso la valvola di espansione il fluido si espande dall'alta pressione in cui si trovava alla pressione e temperatura richiesta dall'evaporatore. Il fluido di lavoro ritornando allo stato originale entra nell'evaporatore.

Di norma il compressore è azionato da un motore elettrico e a volte da un motore a combustione; tuttavia quando un motore a gas o diesel aziona il compressore il calore dell'acqua di raffreddamento e del gas di scarico vengono utilizzati per aumentare il calore ceduto nella fase di condensazione.

Per quanto riguarda questo tipo di pompe applicate in ambito industriale, spesso il fluido di lavoro utilizzato è il fluido di processo stesso, questo tipo di ciclo viene definito aperto e trova la sua applicazione in pompe di calore con ciclo a ricompressione di vapore (Mechanical Vapour Recompression, MVR).

1.5.2.Ciclo ad assorbimento

Questo tipo di ciclo è alimentato termicamente il che significa che è prevalentemente il calore a guidare il ciclo piuttosto che l'energia meccanica. Nel ciclo a compressione meccanica appena descritto per produrre calore si è sfruttata la diversa temperatura tra fase di evaporazione e condensazione del fluido alle diverse pressioni; per chiudere tale tipo di ciclo è necessaria la presenza di un dispositivo che provveda a riportare il fluido dalla pressione più bassa a quella più alta di ciclo, compito svolto dal compressore [2,4,7].

Nel caso di un ciclo ad assorbimento, figura 1.4, il passaggio è effettuato da un sistema composto da un assorbitore, una pompa e un generatore in serie; il lavoro di compressione del fluido quindi è ottenuto in questi 3 organi.

I sistemi di assorbimento sfruttano la capacità di liquidi o sali di assorbire il vapore del fluido di lavoro. I fluidi più comuni utilizzati in questo processo sono: l'acqua, come fluido di lavoro e il bromuro di litio (LiBr) come assorbente, oppure ammoniacca (fluido di lavoro) e acqua (assorbente).

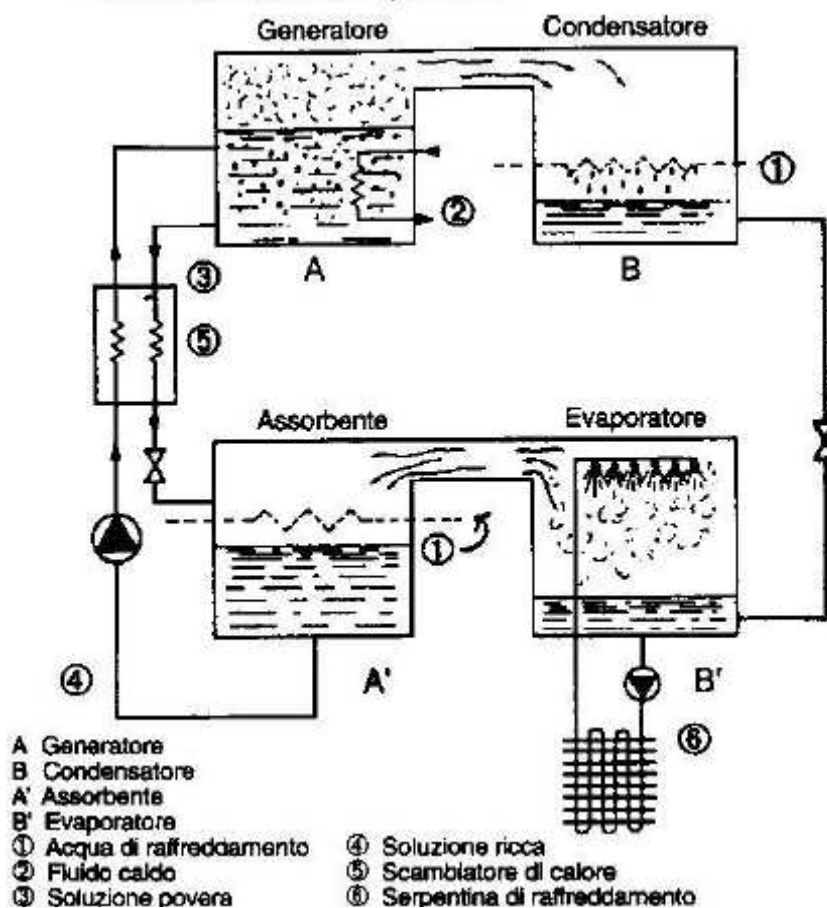


Figura 1.4: Schema di un ciclo ad assorbimento[4]

Operativamente il vapore a bassa pressione presente nell'evaporatore è inviato in un condotto nell'assorbitore, dove tende a passare in soluzione con il liquido assorbente e quindi, tramite una reazione esotermica, sviluppa il cosiddetto calore di assorbimento che aumenta la temperatura del liquido. Man a mano che la soluzione assorbe refrigerante essa perde la capacità di assorbire quindi è necessario ricondurre la soluzione alla concentrazione in refrigerante ritenuta idonea per l'assorbimento.

Successivamente la soluzione viene pompata verso il generatore a più alta pressione, poiché la temperatura di condensazione nel generatore è più alta rispetto quella nell'evaporatore. Nel generatore il liquido viene riscaldato tramite una fornitura di calore dall'esterno, in modo che il refrigerante si separi dalla soluzione che quindi risulterà rigenerata, cioè ritornerà alla concentrazione desiderata.

A questo punto il refrigerante è inviato nel condensatore dove passa alla fase liquida tramite cessione di calore verso l'esterno, da qui tramite una valvola di laminazione tornerà nell'evaporatore ad una pressione più bassa.

La soluzione assorbente invece, una volta rigenerata, potrà ritornare nell'assorbitore ad una pressione più bassa attraverso una valvola di laminazione.

Un particolare tipo di pompa di calore ad assorbimento è il trasformatore di calore, che attraverso il processo di assorbimento può elevare termicamente il calore di scarto senza richiedere la presenza di una fonte di calore esterna.

1.6.Fluidi di lavoro utilizzati

I cicli finora presentati sono entrambi cicli chiusi, in cui il fluido operativo percorre solo gli organi macchina. In genere si parla di refrigerante nel caso delle macchine a compressione e di una miscela nel caso di quelle ad assorbimento; in questa trattazione non si farà distinzione tra i due.

I vari refrigeranti vengono classificati in base al loro ODP cioè potenziale di riduzione dell'ozono, questa caratteristica è influenzata dalla presenza dell'atomo H nel composto poiché ne riduce la stabilità favorendone la degradazione nell'atmosfera.

L'influenza dei vari fluidi sull'effetto serra inoltre è evidenziata dal valore di un altro indice, il GWP che indica il potenziale di riscaldamento globale. Questo indice esprime il danno provocato da un refrigerante sotto un certo orizzonte temporale (tipicamente 100 anni) rapportato al danno provocato dall'anidride carbonica [2,5].

Di seguito forniamo un'analisi dei fluidi refrigeranti più comunemente usati e dei nuovi refrigeranti in commercio. Tradizionalmente i fluidi refrigeranti più comuni si possono raggruppare in tre grandi insiemi:

- Refrigeranti sintetici
- Refrigeranti naturali tra cui:
 - idrocarburi (propano R290, metano R50)
 - composti inorganici (ammoniaca R717, acqua R718, anidride carbonica R744)
- Miscele

1.6.1.Refrigeranti sintetici

All'interno della famiglia dei refrigeranti sintetici possiamo distinguere 3 sottogruppi:

- CFC (cloro-fluoro-carburi) composti completamente alogenati ottenuti per sintesi degli idrocarburi (metano,etano,propano) in cui gli atomi di H sono stati completamente sostituiti dagli atomi di Cl e F;
- HCFC (idro-cloro-fluoro-carburi) composti di sintesi ottenuti dagli idrocarburi in prima alogenazione parziale, cioè in cui non è avvenuta la completa sostituzione di atomi H con Cl e F;

- HFC (idro-fluoro-carburi) composti di sintesi ottenuti dagli idrocarburi per alogenazione parziale con il solo F, il Cl è un atomo completamente assente nella molecola.

1.6.1.1.CFC e HCFC

Le miscele di CFC e HCFC sono state utilizzate inizialmente per la loro stabilità chimica e il loro contenuto di cloro; tuttavia essendo molto nocive per l'ambiente, poiché contribuiscono sia alla riduzione dello strato di ozono che all'effetto serra, nel 1987 il protocollo di Montréal ne ha gradualmente limitato l'uso.

Per rendersi conto dell'effettivo impatto sull'ambiente di questi fluidi basti pensare che gli HCFC hanno una vita media 10 volte inferiore ai CFC, mentre gli HFC hanno per esempio un valore ODP pari a zero; inoltre i CFC oltre ad essere i fluidi con maggiore ODP sono anche quelli con più elevato GWP.

Nel 1996 è cessata, proprio per questo motivo, la produzione dei CFC, provvedimento che coinvolgeva fluidi come R-11 e R-12 derivanti dal metano, o R-113 e R-114 derivanti dall'etano; l'utilizzo è quindi stato gradualmente circoscritto agli impianti già in funzione, fino a che nel 2000 non ne è stata vietata definitivamente la produzione e l'utilizzo in qualsiasi impianto.

Per quanto riguarda HCFC il protocollo prevedeva una graduale riduzione con la cessazione definitiva della produzione dal 2030 per i Paesi industrializzati e dal 2040 per i paesi in via di sviluppo. Con il regolamento UE n. 2037 del 1/10/2000 la produzione è stata congelata ai livelli del 1997 ma ridotta fino al completo divieto nel 2015; mentre l'immissione sul mercato è stata limitata a partire dal 2001 e non più consentita a partire dal 2010.

Un'alternativa possibile a questi tipo di refrigeranti dovrebbe consentire alti livelli di efficienza e minimo rischio per l'ambiente. Questo significa che tale sostanzadovrebbe essere non infiammabile, non tossica e con un potenziale di riduzione dell'ozono pari a zero (ODP) nonché un potenziale di riscaldamento globale (GWP) quasi nullo; inoltre dovrebbe presentare un rapporto costo-efficacia interessante. Questa è una ricerca complessa, infatti l'influenza di vari fattori come il prezzo del fluido, il rendimento che produce, le attrezzature necessarie a contenerlo come anche i lubrificanti da utilizzare, portano a pensare che il fluido ideale non esista.

1.6.1.2.HFC come sostituti

Gli HFC possono essere validi sostituti a questi due tipi di refrigeranti proprio perché, essendo privi di cloro, non contribuiscono alla riduzione dell'ozono e risultano essere

alternative applicabili anche a lungo termine per macchine che precedentemente usavano fluidi HCFC e CFC come R-12, R-22 e R-502.

Un'attenzione particolare va però data all'uso dei lubrificanti nel caso di questi fluidi, poiché gli oli minerali non sono miscibili con questo tipo di refrigeranti; per questo motivo si deve ricorrere agli oli poliesteri durante il riadattamento degli impianti, prestando molta attenzione a rimuovere completamente eventuali residui di oli usati in precedenza.

Fluidi HFC più usati sono:

- **HFC-134a** è abbastanza simile al CFC-12 nelle proprietà termofisiche. Il coefficiente di prestazione (COP) di una pompa di calore con HFC-134a sarà simile a quello con CFC-12;
- **HFC-152a** è stato usato principalmente come una parte di R-500, ma è stato anche applicato con successo in una serie di sistemi a pompa di calore e di piccoli refrigeratori domestici. HFC-152a è attualmente applicato come componente nelle miscele. A causa della sua alta infiammabilità, deve essere utilizzato solo come fluido di lavoro puro in piccoli impianti in cui questo debba sostenere un basso carico di lavoro;
- **HFC-32** è moderatamente infiammabile e ha un GWP vicino allo zero. E' considerato come un sostituto adatto per HCFC-22 per quanto riguarda le aree di condizionamento, pompe di calore e refrigerazione industriale; inoltre è utilizzato come componente in miscele non infiammabili in sostituzione di R-502 e HCFC-22;
- **HFC-125 e HFC-143a** hanno proprietà molto simili a R-502 e HCFC-22. Essi sono principalmente applicati come componenti in sostituzioni di miscele ternarie di R-502 e HCFC-22. Il GWP di questi due tuttavia è superiore di circa tre volte a quello di HFC-134a.

1.6.2.Refrigeranti naturali

I fluidi di lavoro naturali sono sostanze naturalmente esistenti nella biosfera. Essi hanno generalmente effetti ambientali trascurabili, quindi ODP e GWP pari a zero o in un intorno di esso: per questo motivo possono essere anch'essi alternative valide all'utilizzo dei CFC e HCFC. Alcuni di questi fluidi sono infiammabili o tossici, quindi richiedono per l'utilizzo un sistema di progettazione e funzionamento idoneo, nonché una frequenza di manutenzione adeguata.

Esempi di fluidi di lavoro naturali sono:

- **Ammoniaca (R-717)** è in molti paesi il fluido di lavoro leader per l'utilizzo in grandi e medi impianti di refrigerazione e celle frigorifere. Per far fronte alle caratteristiche di tossicità e infiammabilità di questa sostanza sono stati sviluppati codici,

regolamenti e norme. Termodinamicamente ed economicamente l'ammoniaca è un'ottima alternativa ai CFC-12 e HCFC-22 nelle nuove attrezzature a pompa di calore poiché presenta i seguenti vantaggi:

- Assenza di ODP e nessun GWP per l'ambiente
- Bassi costi e comportamento termodinamico e fisico ben noto
- Elevato COP e coefficiente di scambio termico sul lato primario degli scambiatori che riduce la superficie di scambio termico
- Elevata disponibilità

Finora è stata utilizzata solo in sistemi a pompa di calore di grandi dimensioni, e in compressori ad alta pressione hanno sollevato la temperatura massima di condensazione ottenibile da 58 °C a 78 °C. L'ammoniaca può anche essere utilizzata per sistemi di piccole dimensioni, quindi nella maggior parte del mercato delle pompe di calore.

Non bisogna trascurare però gli aspetti riguardanti la sicurezza: per esempio gli impianti di piccole dimensioni possono essere gestiti utilizzando apparecchiature a basso carico di lavoro per il fluido oppure altre misure come sistemi di distribuzione indiretta (sistemi di salamoia), sistemi ermetici di contenimento delle macchine e sistemi di ventilazione a sicurezza intrinseca. Uno svantaggio per l'utilizzo di questo fluido riguarda la sua compatibilità con i materiali dei componenti dei sistemi poiché la sua elevata corrosività riduce il campo al solo acciaio.

- **Idrocarburi (HC)** sono ben noti per essere liquidi infiammabili, tuttavia posseggono elevate proprietà termodinamiche, come anche caratteristiche di compatibilità con diversi materiali. Attualmente propano, propilene, miscele di propano, butano, isobutano ed etano sono considerati come i più promettenti fluidi nella famiglia degli idrocarburi da utilizzare in sistemi a pompa di calore. HC sono ampiamente usati nell'industria petrolifera, applicati ancora sporadicamente nella refrigerazione per il trasporto, nei frigoriferi o congelatori domestici e nelle pompe di calore residenziali (in particolare in Europa). A causa dell'elevata infiammabilità, il carico a cui essi sono sottoposti deve essere adattato quindi vengono applicati in impianti con basso carico di lavoro per il fluido. Per garantire la necessaria sicurezza durante il funzionamento, dovrebbero essere prese precauzioni adeguate come recinzione della pompa di calore, sistemi di ventilazione, l'aggiunta di gas traccianti al fluido di lavoro oppure l'uso di rilevatori di gas.

- **CO₂ (R-744)** ha un forte potenziale come refrigerante e sta attirando una crescente attenzione da tutto il mondo. Le caratteristiche positive di questo fluido sono la non tossicità né infiammabilità e l'elevata compatibilità con i normali lubrificanti nonché con i materiali comuni impiegati per la fabbricazione di impianti. La capacità volumetrica di refrigerazione è elevata ma il rapporto di pressione è notevolmente ridotto. Tuttavia, il COP teorico di un ciclo a pompa di calore convenzionale con la CO₂ è piuttosto scarso, e l'effettiva applicazione di questo refrigerante dipende dallo sviluppo di metodi adeguati per raggiungere un basso consumo di energia durante il funzionamento in un intorno del punto critico. Sistemi che utilizzano la CO₂ sono ancora in fase di sviluppo, ma la ricerca continua per migliorare i sistemi e componenti.
- **Acqua (R-718)** è un fluido di lavoro eccellente per le pompe di calore industriali per via delle sue proprietà termodinamiche poiché lavorano ad alte temperature e per il fatto che non è né infiammabile né tossica. L'acqua è stata utilizzata soprattutto come un fluido lavoro in impianti a ciclo aperto con ri-compressione di vapore, ma ci sono anche alcune a pompe di calore a compressione a ciclo chiuso che utilizzano questo fluido.
Le temperature di lavoro di questo fluido stanno in un range tra gli 80°C e i 150°C, tuttavia si sono raggiunti anche i 300°C; il principale svantaggio è che la capacità volumetrica di assorbire calore è bassa (kJ/m³): ciò richiede l'impiego di costosi e grandi compressori, soprattutto a basse temperature.

1.6.3.Miscele

La ricerca per trovare adeguati sostituti per fluidi CFC e HCFC ha condotto, oltre allo studio di HFC, anche verso la possibilità di ideare miscele di HFC, che abbiano proprietà termodinamicamente simili al liquido di cui andranno a prendere il posto.

Una miscela è data dalla composizione di due o più fluidi puri, e può essere:

- azeotropica, cioè realizza processi di cambiamento di fase a temperatura costante
- quasi azeotropica
- zeotropica, la quale in un determinato campo di temperatura e pressione non presenta una singola coincidente temperatura di evaporazione e condensazione ma temperature diverse; la differenza tra queste temperature è definita "glide" di temperatura

Questo salto di temperatura delle miscele zeotropiche può essere sfruttato per migliorare le prestazioni di un sistema anche se ciò richiederebbe delle modifiche alle attrezzature.

Le prime miscele per la sostituzione di CFC-12 e R-502 contenevano HCFC-22 e altri fluidi refrigeranti appartenenti sempre ai HCFC, come ad esempio HCFC-124 e HCFC-142b, e sono quindi considerate miscele di transizione.

La nuova generazione di miscele per la sostituzione di R-502 e R-22 sono senza cloro, e saranno principalmente a base di HFC (HFC-32, HFC-125, HFC-134a, HFC-143a) e idrocarburi (propano ad esempio).

1.6.3.1. Nuove miscele

Due tra le più promettenti alternative sono le miscele di R-410A e R-407C. La differenza principale tra le due è la composizione chimica: R-410A è una miscela di R-32 e R-125, mentre la R-407C è costituito da R-32, R-125 e R-134 [9].

Uno studio [10] condotto sulle nuove miscele di refrigerante ha constatato un'efficienza del refrigerante R410A circa il 12% superiore a quello di unità alimentata a R-22. Le pompe di calore che utilizzano le nuove sostanze chimiche sono più efficienti perché i compressori che utilizzano R410A consumano meno energia e hanno meno probabilità di surriscaldarsi. In aggiunta, R410A assorbe e rilascia il calore in modo più efficiente, il che significa che i sistemi che utilizzano necessiteranno di meno energia elettrica nonché daranno la possibilità di ridurre le dimensioni degli scambiatori di calore, evaporatore e condensatore, rispetto a quanto usato finora per R-22. Lo svantaggio principale riguarda la pressione di esercizio che è superiore rispetto a quella in cui è usato R-22, il che indica che dovrebbe essere rivista la resistenza a pressione della maggior parte dei componenti dei sistemi in funzione.

R-407C, studiato in [11], è l'unico refrigerante disponibile per l'uso immediato in sistemi esistenti ad R-22 dal momento che le proprietà termiche e le condizioni operative sono simili. Tuttavia, a causa del suo glide di temperatura, è adatto solo per determinati sistemi, anche se l'uso di questo refrigerante è in aumento.

Un altro nuovo refrigerante, R-433A, ha mostrato nello studio [12], un enorme potenziale per migliorare l'efficienza energetica delle pompe di calore; al riguardo è stata condotta una prova comparativa tra R-433A e R-22 utilizzando una pompa di calore di prova. I principali risultati di questo studio hanno indicato che il coefficiente di performance di R433A è del 4,9-7,6% superiore a quello di HCFC-22 mostrando anche una temperatura di scarico significativamente più bassa.

Il futuro porrà sempre nuove sfide per i produttori di sistemi a pompa di calore, specialmente in relazione allo sviluppo di nuovi refrigeranti, nonché alla realizzazione di nuovi cicli in modo da soddisfare in modo efficiente le numerose esigenze di refrigerazione.

CAPITOLO 2

Caratteristiche e prestazioni delle pompe di calore utilizzate in ambito industriale

2.1.Panoramica delle pompe di calore industriali

La pompa di calore è ormai una tecnologia consolidata per quanto riguarda il riscaldamento di ambienti e dall'inizio degli anni '90 molto interesse è stato nutrito anche per il suo utilizzo in ambito industriale: dapprima come semplice fonte di recupero di calore, nonché di riduzione delle emissioni di CO₂, in cui essa veniva considerata principalmente come unità separata dall'intero processo produttivo, ma lentamente si è affermata come un apparecchio fortemente integrato nel processo che riesce ad apportare miglioramenti alla produzione stessa.

La pompa di calore utilizzata in ambito industriale quindi può offrire l'opportunità di rilassare i vincoli di un processo produttivo per consentire un aumento della produzione, nonché un miglioramento della sua qualità. A vantaggio di questo aspetto bisogna sottolineare come la maggior parte delle macchine nel settore industriale, siano assemblate per lo più nello stabilimento di utilizzo.

Confrontando le apparecchiature industriali con quelle utilizzate per il semplice riscaldamento residenziale e commerciale, si possono notare quindi alcuni vantaggi rispetto a quest'ultime [13]:

- elevati COP visti i bassi incrementi di temperatura e/o gli alti livelli da cui viene tratto il calore;
- lunghi periodi di operatività di questi apparecchi;
- costi relativamente bassi per gli investimenti, visti i grandi apparecchi coinvolti;
- periodi di recupero abbastanza brevi, tra i 2 e i 5 anni;
- la domanda e la conseguente produzione di calore si verificano allo stesso tempo.

Bisogna sottolineare il fatto che definire "industriali" le pompe di calore non significa tanto indicare una specifica tipologia di macchina, ma riferirsi principalmente alla potenza che queste possono erogare, visti i processi in cui esse sono installate. Una pompa di calore industriale è un sistema che eleva il livello termico dell'energia attraverso il recupero di cascami termici industriali, mettendola a disposizione per l'uso nel processo industriale o per il riscaldamento. Dal momento che i cascami di calore provenienti dai processi

industriali si trovano a diversi livelli di temperatura, tipicamente tra i 50 e 100°C, in generale questi sistemi dovrebbero essere in grado di produrre calore ad una temperatura tra i 100 e 250°C, range al di sopra del quale è difficile lavoro rare (figura 2.1)[14].

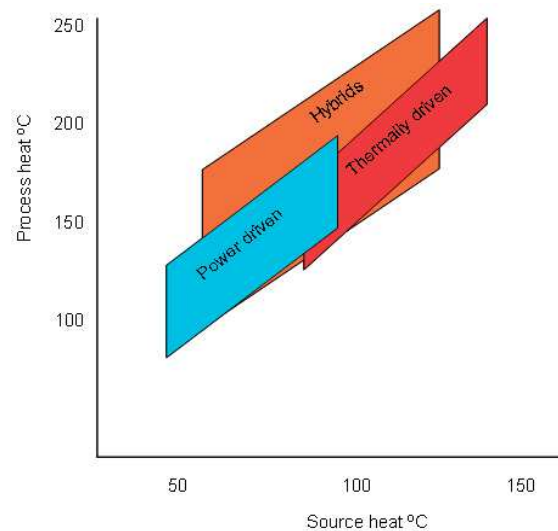


Figura 2.1: Range di temperatura di diversi tipi di pompe di calore industriali [14]

Come si vede in figura 2.1 le tre grandi aree in cui è divisibile la famiglia delle pompe di calore si basa sulla fonte energetica che consente lo svolgimento del processo: energia meccanica, termica e ibridi, che sfruttano entrambe le tipologie.

La tabella 2.1 inserita qui di seguito, pur non essendo esaustiva, mostra quali sono i campi principali in cui la pompa di calore è stata applicata e quali siano le tipologie più diffusamente usate.

Le principali categorie di pompe di calore utilizzate come si può vedere sono:

- Ciclo chiuso a compressione azionato da motore elettrico o a gas;
- Ciclo aperto a ricompressione meccanica del vapore;
- Ciclo aperto a ricompressione termica del vapore;

Nonostante non vi siano espressamente citate, l'utilizzo delle pompe di calore ad assorbimento, tra cui anche i trasformatori di calore, in alcuni processi produttivi è stato preferito rispetto alla classica tipologia di pompa di calore a compressione.

Tabella 2.1: Panoramica indicativa sulle applicazioni della pompa di calore all'interno dell'industria manifatturiera(adattata da US Department of Energy [15]).

Industry	Manufacturing Activity	Process	Heat-Pump Type
Petroleum Refining and Petrochemicals	Distillation of petroleum and petrochemical products	Separation of propane/propylene, butane/butylene and ethane/ethylene	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
Chemicals	Inorganic salt manufacture including salt, sodium sulfate, sodium carbonate, boric acid	Concentration of product salt solutions	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	Treatment of process effluent	Concentration of waste streams to reduce hydraulic load on waste treatment facilities	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	Heat recovery	Compression of low-pressure waste steam or vapor for use as a heating medium	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	Pharmaceuticals	Process water heating	Mechanical Compression, Closed cycle
Wood Products	Pulp manufacturing	Concentration of black liquor	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	Paper manufacturing	Process water heating	Mechanical compression, Closed cycle
	Paper manufacturing	Flash-steam recovery	Thermocompression, Open cycle
	Lumber manufacturing	Product drying	Mechanical Compression, Closed cycle
Food and Beverage	Manufacturing of alcohol	Concentration of waste liquids	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	Beer brewing	Concentration of waste beer	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	Wet corn milling/corn syrup manufacturing	Concentration of steep water and syrup	Mechanical Vapor Compression, Open cycle Thermocompression, Open cycle
	Sugar refining	Concentration of sugar solution	Mechanical Vapor Compression, Open cycle Thermocompression, Open cycle
	Dairy products	Concentration of milk and of whey	Mechanical Vapor Compression, Open cycle Thermocompression, Open cycle
	Juice manufacturing	Juice concentration	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	General food-product manufacturing	Heating of process and cleaning water	Mechanical Compression, Closed cycle
	Soft drink manufacturing	Concentration of effluent	Mechanical Compression, Closed cycle
Utilities	Nuclear power	Concentration of radioactive waste	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
		Concentration of cooling tower blowdown	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
Miscellaneous	Manufacturing of drinking water	Desalination of sea water	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	Steam-stripping of waste water or process streams	Flash steam recovery	Thermocompression, Open cycle
	Electroplating industries	Heating of process solutions	Mechanical Compression, Closed cycle
		Concentration of effluent	Mechanical Vapor Compression, Open cycle
	Textiles	Process and wash-water heating	Mechanical Compression, Closed cycle
		Space heating	Mechanical Compression, Closed cycle
		Concentration of dilute dope stream	Mechanical Compression, Closed cycle
	General manufacturing	Process and wash-water heating	Mechanical Compression, Closed cycle
		Space heating	Mechanical Compression, Closed cycle
	District heating	Large-scale space heating	Mechanical Compression, Absorption Closed cycle
	Solvent recovery	Removal of solvent from air streams	Mechanical Compression, Open cycle

Nel primo capitolo abbiamo fornito una breve spiegazione del principio di funzionamento di questi cicli perché tutti si possono ricondurre ai due cicli fondamentali di compressione e di assorbimento.

In questo capitolo analizzeremo le condizioni operative di questi diversi apparecchi. E' da sottolineare il fatto che non vi sono stati notevoli miglioramenti per quanto riguarda la struttura dei cicli termodinamici sopra considerati, dal momento che la ricerca si è concentrata principalmente sul miglioramento dell'efficienza dei vari componenti del ciclo, e ha posto molta attenzione alle condizioni operative in cui questi devono operare all'interno del processo industriale.

Proprio per quest'ultimo motivo si sono resi interessanti per l'applicazione industriale anche nuovi cicli che erano stati presentati solo in forma sperimentale oppure che avevano avuto un primo semplice utilizzo in ambito residenziale. Le nuove tecnologie HP che prenderemo in considerazione saranno per esempio: il ciclo ad adsorbimento, le pompe di calore chimiche che pur non avendo ancora una notevole diffusione vengono visti come tecnologie interessanti per uno sviluppo futuro.

2.2.Pompe di calore tradizionali: schemi costruttivi, prestazioni e miglioramenti

All'interno di questo paragrafo suddivideremo le pompe di calore a seconda dell'energia da esse richiesta per svolgere le trasformazioni del ciclo.

2.2.1.Pompe di calore attivate meccanicamente

Questo tipo di pompe di calore che sfruttano l'energia meccanica per ottenere l'incremento di temperatura, possono utilizzare come strumento di alimentazione motori elettrici oppure a gas, in particolar modo sono molto più utilizzati i primi.

Le pompe di calore commercialmente disponibili possono fornire calore ad una temperatura di circa 130°C fino a giungere a 190°C nel caso di cicli aperti; l'incremento di temperatura ottenibile si aggira intorno ai 90 kelvin.

All'interno di questa classificazione troviamo pompe di calore a compressione meccanica di vapore a ciclo chiuso e a ciclo aperto, come si era già anticipato nel primo capitolo.

2.2.1.1. Sistemi a compressione a ciclo chiuso alimentati elettricamente

Il primo ciclo sfrutta la compressione meccanica di un fluido di lavoro, in genere un refrigerante scelto tra le famiglie descritte nel primo capitolo, per innalzare la temperatura del calore assorbito ad una bassa temperatura in corrispondenza dell'evaporatore; in questo modo deve essere percorso da un fluido di lavoro in grado di evaporare e di condensare a dei livelli di temperatura appropriati.

In questo tipo di pompa di calore, considerando un'efficienza del compressore accoppiato ad un motore elettrico tra il 70 e il 90%, a seconda del tipo di compressore utilizzato e del carico che si trova a sostenere, possiamo vedere in figura 2.2 la dipendenza del COP dalla temperatura di evaporazione, nonché da quella di condensazione.

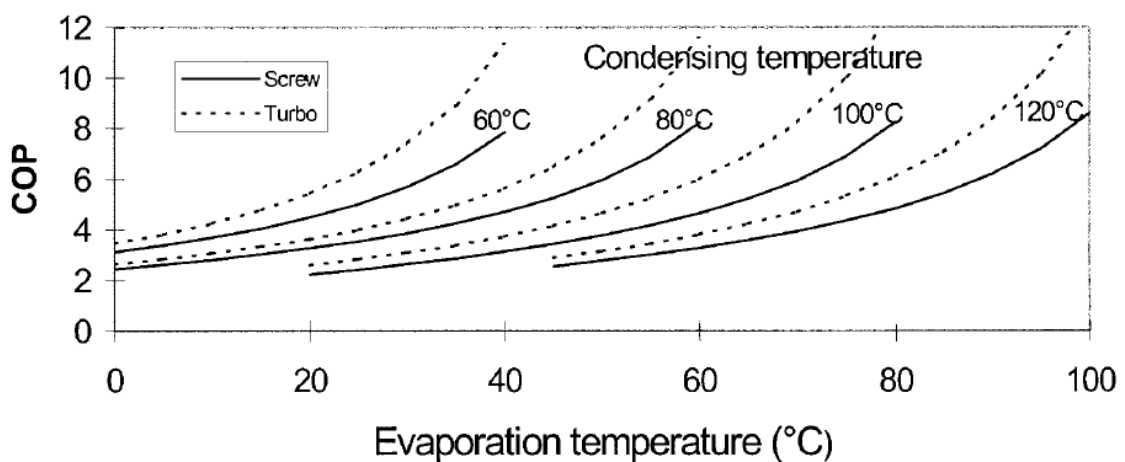


Figura 2.2: Relazione tra COP e temperatura di evaporazione in una pompa di calore a compressione di vapore

Come si vede dalla figura sopra l'utilizzo di un turbo-compressore, rispetto un compressore a vite, migliora il COP notevolmente. Il valore del COP ottenibile con questo tipo di ciclo standard si trova in un intervallo tra 5 e 10, con la possibilità di fornire calore al condensatore ad una temperatura massima di 120°C.

2.2.1.1.1. Modifiche attuabili sul ciclo chiuso

Per migliorare il COP di una pompa di calore a semplice compressione come quella appena trattata sopra vi sono parecchie modifiche che possono essere attuate sul ciclo termodinamico, la più utile è quella di sfruttare un ciclo multistadio che presenta più di una fase di compressione [9].

Il principale vantaggio di questo tipo di ciclo consiste nel fatto che essendovi la presenza di due o più compressori che lavorano a pressioni diverse, il rapporto di compressione che si

può ottenere è più piccolo e quindi l'efficienza della compressione è incrementata per ogni singolo stadio di compressione. Come si vede in figura 2.3 la presenza di due compressori, uno che lavora ad alta pressione e l'altro che lavora a bassa, crea all'uscita del compressore del basso stadio e l'ingresso del alto stadio una pressione intermedia che, di solito, per avere un elevato COP per il sistema, è determinata uguagliando i rapporti di compressione tra le due fasi.

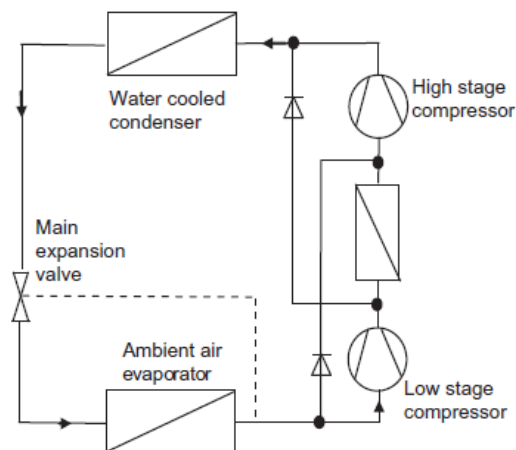


Figura 2.3: Pompa di calore a doppio stadio con intercooler [9]

In aggiunta alla compressione multistadio naturalmente si possono attuare semplici modifiche al ciclo come:

- Sub-raffreddamento del refrigerante dopo che ha attraversato il condensatore, utilizzando un dissipatore di calore in modo da aumentare il calore fornito alla fonte a più alta temperatura. Questa configurazione proposta in figura 2.4 permette di aumentare la potenza termica senza incrementare il lavoro del compressore. Questo tipo di ciclo è conveniente quando il vettore termico a cui trasferire calore è in forma liquida; più precisamente i miglioramenti del COP e della capacità corrispondono ad 1% per ogni grado kelvin di sottoraffreddamento.

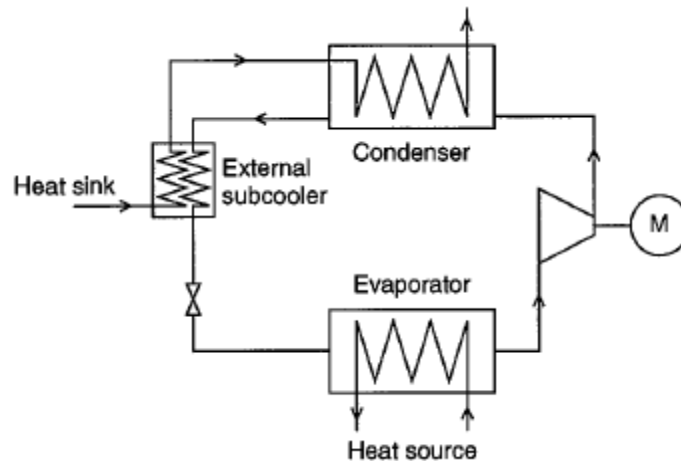


Figura 2.4: Ciclo a semplice compressione con dissipatore di calore [16]

- Inserimento di un economizzatore come si può vedere in figura 2.5 permette di dividere l'espansione del condensato in uscita dal condensatore in due fasi: il vapore del refrigerante viene compresso dopo aver passato la prima valvola di espansione nel compressore di alta pressione direttamente; in modo da ridurre la necessità di compressione richiesta dal vapore e ridurre il salto di temperatura che esso deve subire. Questa configurazione a doppio stadio di compressione è molto utilizzata in ambito industriale, come si vedrà nel terzo capitolo.

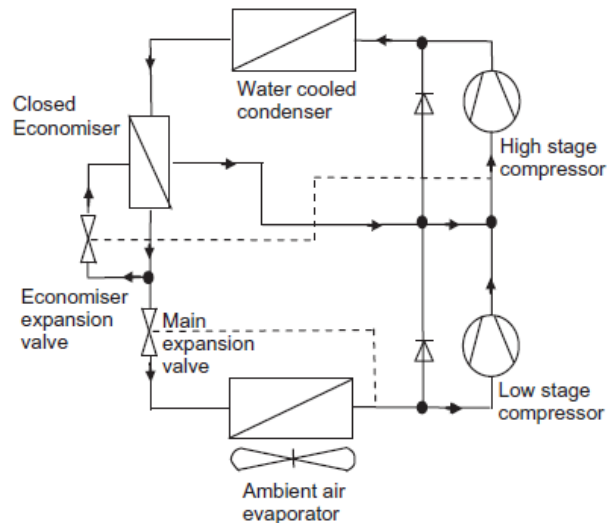


Figura 2.5: Pompa di calore multistadio con economizzatore [9]

- Un'alternativa al ciclo appena descritto prevede la presenza di un flash intercooler, che dà teoricamente prestazioni migliori rispetto al ciclo con economizzatore però presenta il rischio che delle gocce di liquido vengano trascinate nel secondo compressore, nonché vi sia una considerevole perdita di pressione nel

raffreddatore. Il vantaggio principale è che la percentuale di vapore in questo ciclo è aumentata, anche se l'incremento di temperatura ottenibile è ridotto.

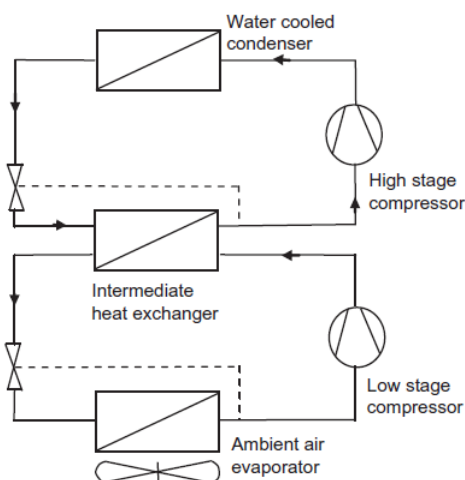


Figura 2.6 :Ciclo a cascata [9]

Nel caso si necessiti di grandi incrementi di temperatura il ciclo a cui più frequentemente si ricorre consiste in un sistema a cascata come in figura 2.6. La peculiarità di questi ciclo è che consentono di utilizzare diversi fluidi refrigeranti ognuno dei quali lavora a temperature diverse poiché deriva dall'accoppiamento di due cicli a singolo stadio di refrigerazione: il ciclo inferiore mantiene una temperatura di evaporazione bassa e produce l'effetto di refrigerazione, mentre il sistema superiore opera a temperatura di evaporazione più alta. I due sistemi sono collegati tra loro grazie ad uno scambiatore di calore che funziona da condensatore per il ciclo inferiore ed evaporatore per quello superiore.

Un'altra possibile variante ai sistemi presentati coinvolge direttamente uno dei componenti principali del ciclo: l'evaporatore. Uno studio sperimentale [17] ha presentato l'ipotesi di suddividere l'evaporatore in due stadi in modo da ovviare alla difficoltà tecnica, presente in tutti questi cicli, della dipendenza tra capacità di recupero del calore e superficie di scambio disponibile.

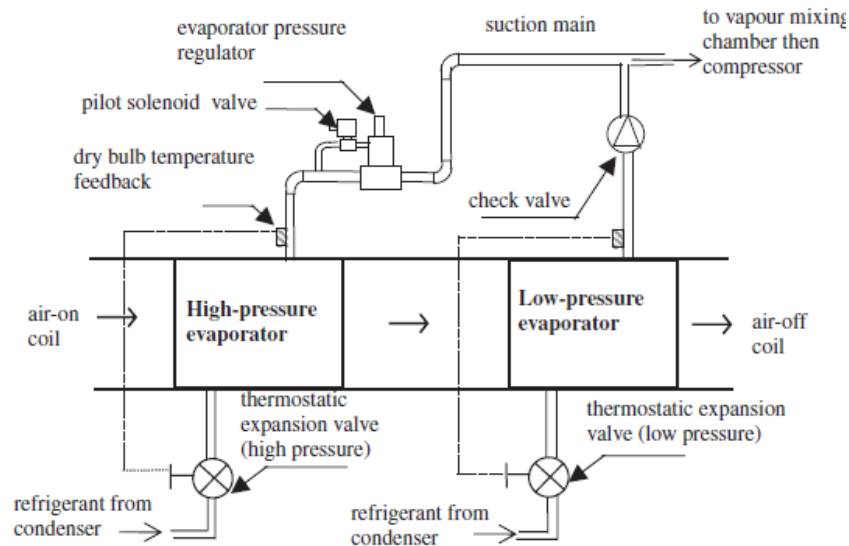


Figura 2.7: Schema di un evaporatore a doppio stadio

La figura 2.7 mostra lo schema di questo prototipo utilizzato per un processo di asciugatura: all'uscita del condensatore il liquido refrigerante viene diviso in due flussi che entrano rispettivamente nell'evaporatore ad alta e bassa pressione. Come si vede all'uscita dell'evaporatore di alta pressione, il vapore entra in un regolatore di pressione prima di essere miscelato con l'altro flusso ed essere inviato al compressore. Questo prototipo ha mostrato la possibilità di un aumento fino al 35% per quanto riguarda il recupero del calore rispetto ad un sistema a singolo stadio di evaporazione.

2.2.1.2. Pompa di calore a compressione a ciclo aperto alimentata elettricamente

Il ciclo aperto invece definito a ricompressione meccanica del vapore (Mechanical Vapour Recompression, MVR) e sfrutta il fluido del processo a cui questa pompa viene collegata. Nonostante vi siano varie configurazioni di sistemi di questo tipo, la più comune è quella mostrata in figura 2.8 in cui il vapore è compresso direttamente, per poi essere condensato in uno scambiatore di calore; questo tipo di ciclo è un ciclo semi aperto, chiamato anche diretto.

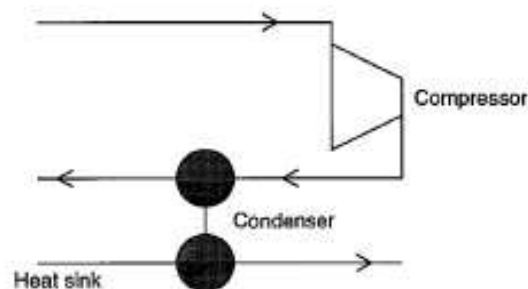


Figura 2.8: Ciclo MVR semi aperto [16]

Vi è anche un altro tipo di ciclo a ricompressione molto meno usato poiché presenta solo un evaporatore connesso al compressore, senza quindi la presenza di un condensatore. Questo ciclo è utilizzato esclusivamente se si richiede una fornitura di vapore ad alta temperatura, che non potrebbe venire ceduto direttamente dal processo. La figura 2.9 mostra questo secondo tipo di ciclo semi aperto.

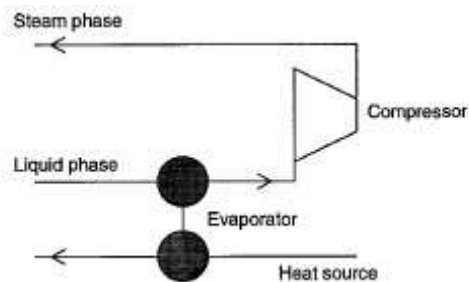


Figura 2.9: Ciclo MVR semi aperto per la produzione di vapore ad alta temperatura [16]

Come si era già sottolineato nel precedente capitolo il COP di questi sistemi a compressione di vapore dipende molto dall'incremento di temperatura che questi possono apportare al calore prelevato dal ciclo di lavorazione; in figura 2.10 si vede la dipendenza tra questi due fattori. La possibilità di aprire il ciclo di compressione permette di ottenere un COP molto più alto, il valore è compreso tra 10 e 30.

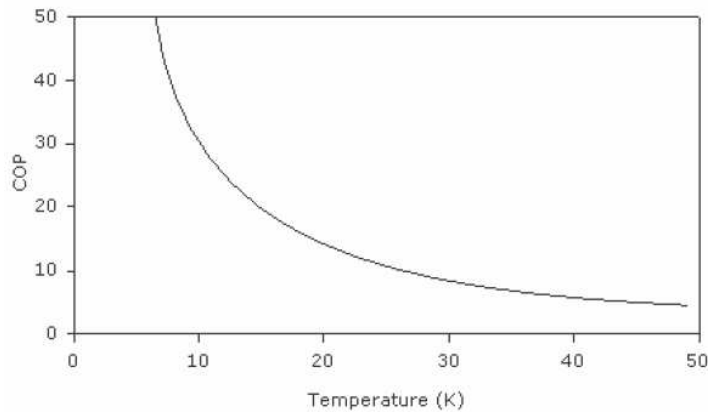


Figura 2.10: COP di una pompa di tipo MVR in funzione dell'incremento di temperatura[13]

2.2.1.3. Pompa di calore a compressione alimentata da motore a gas

Nelle pompe di calore alimentate elettricamente il combustibile fossile viene convertito in energia elettrica nelle centrali, poi inviata alla pompa e convertita in energia meccanica dal motore; queste due conversioni energetiche però comportano grosse perdite. A questo proposito quindi la conversione di energia direttamente in loco tramite la combustione in motori a gas può aumentare l'efficienza energetica.

Una pompa di calore alimentata a gas (Gas Engine Heat Pump, GEHP) presenta un compressore aperto azionato da un motore a combustione interna; questi motori a gas presentano un'efficienza del 30-45% ma il pregio sta nel fatto che il calore derivante dalla combustione può essere recuperato per circa 80%. Quello appena descritto è uno dei principali vantaggi di GEHP che deriva dal recupero del calore dei gas di scarico e dal raffreddamento della camicia dei cilindri del motore in aggiunta all'elevata efficienza termica permessa dalla possibilità di regolare la velocità del motore. Oltre a questo vantaggio questo sistema può utilizzare come fonti energetiche il gas naturale, propano, GPL, al posto dell'energia elettrica e diventare in alcuni casi un sistema più economico [18].

Le principali applicazioni si rivolgono al riscaldamento/raffreddamento di ambienti e produzione di acqua sanitaria tuttavia è un sistema che può essere utilizzato anche in applicazioni industriali come processi di essiccazione. Ci sono pochi studi che presentano l'impiego di GEHP in sistemi di essiccazione. Uno di questi [19] coinvolge un GEHP con una capacità di 18 kW, un compressore scroll che presenta iniezione di vapore, un asciugatore e un collettore solare; l'impianto è presentato in figura 2.11. Questo sistema è stato studiato sperimentalmente in alternativa ai tradizionali sistemi di essiccazione per prugne, broccoli e prezzemolo.

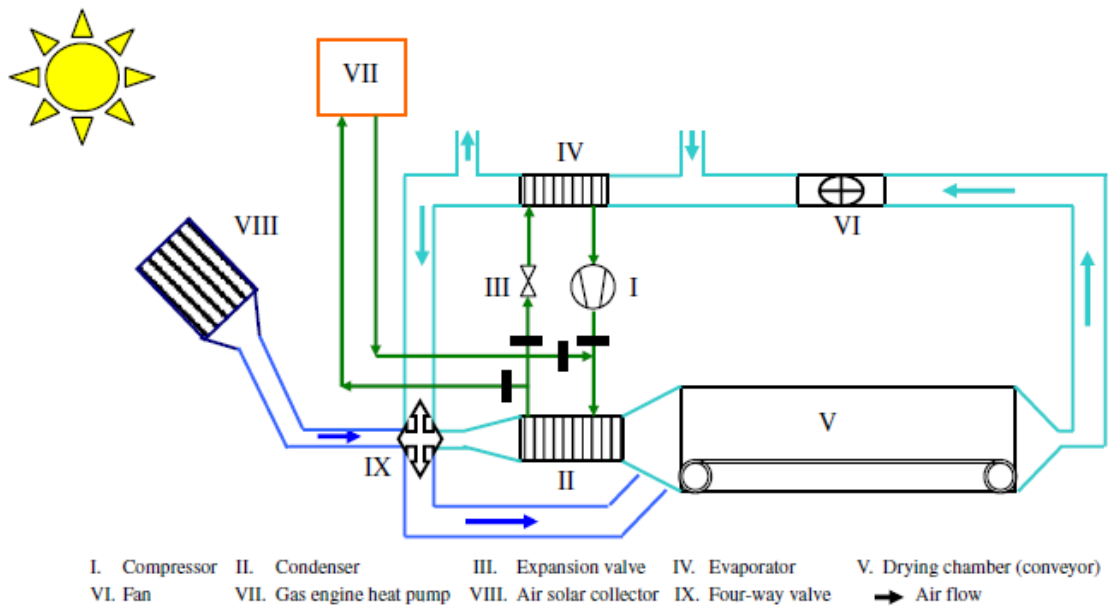


Figura 2.11: Sistema di asciugatura che sfrutta GEHP e collettori solari

2.2.1.4. Miglioramenti sui componenti strutturali del ciclo a compressione

Oltre alle modifiche attuabili sul ciclo termodinamico che riguardano l'aggiunta di organi per il recupero del calore o l'associazione di più cicli in cascata, l'attenzione si è concentrata anche sul miglioramento dei singoli componenti del ciclo affinché possano venir ridotte le inefficienze di ognuno di essi. In questo campo però la sfida continua per mantenere contemporaneamente dimensioni contenute per le varie parti e limitarne i costi di installazione.

Negli ultimi anni, una serie di metodi sono stati proposti per migliorare il rendimento energetico dei sistemi a pompa di calore. Gli sforzi si sono focalizzati su tre aree principali, vale a dire: una più efficiente compressione di vapore refrigerante per rapporti di compressione elevati, scambiatori di calore con maggior superficie di scambio e infine dispositivi che riducono l'irreversibilità del processo di espansione caratteristica delle valvole di laminazione.

2.2.1.4.1. Compressore

L'efficienza complessiva di un sistema a pompa di calore è fortemente dipendente dalle prestazioni del compressore. I compressori utilizzati nelle pompe di calore incontrano un'ampia gamma di condizioni rispetto a quelle in cui si trovano a lavorare i semplici condizionatori d'aria, inoltre la loro durata è molto maggiore. In questo contesto la combinazione di rapporti di compressione elevati e lunghi tempi di funzionamento rappresenta una sfida per tutti i produttori.

Fino a pochi anni fa i compressori utilizzabili in pompe di calore a ciclo chiuso erano principalmente di tre tipi: alternativi, a vite e turbocompressori. I compressori alternativi sono stati usati in sistemi fino ai 500 kW, compressori a vite fino a 5 MW e turbocompressori nei grandi impianti (oltre ai 2 MW). L'efficienza di questi compressori varia a seconda del fluido lavoro ma è approssimabile a 0,45 per un compressore a pistoni, 0,55 per un compressore a vite e 0,64 per un turbocompressore [9].

Le ricerche effettuate in questo settore hanno riguardato la progettazione di nuovi compressori, nuove tecniche di controllo della compressione, tuttavia ci si è al contempo soffermati su un possibile miglioramento dei compressori già esistenti, attraverso strumenti per esempio come l'iniezione di vapore.

Negli ultimi anni si è affermato anche nel campo della pompa di calore l'utilizzo del compressore scroll in sostituzione a quello alternativo, dal momento che si è dimostrato essere il 10% più efficiente rispetto quest'ultimo.

Le motivazioni principali di questa affermazione sono state definite nello studio [20] secondo cui: processi di aspirazione e di scarico sono separati, il processo di rotazione

coinvolge 540° gradi di rotazione al posto dei 180° del compressore alternativo, inoltre permette di eliminare le valvole di aspirazione e scarico che determinano in genere perdite di pressione. Altri vantaggi del compressore scroll sono naturalmente la riduzione del rumore e delle vibrazioni, inoltre la maggiore affidabilità a causa di un minor numero di componenti in movimento, caratteristica che gli permette di poter lavorare anche in presenza di liquido. Per quest'ultimo motivo questo compressore è stato studiato anche in presenza di iniezione di vapore. Il motivo di questa integrazione è duplice: aumentare l'efficienza complessiva della pompa di calore e diminuire la temperatura di scarico del refrigerante riducendo così l'usura del compressore.

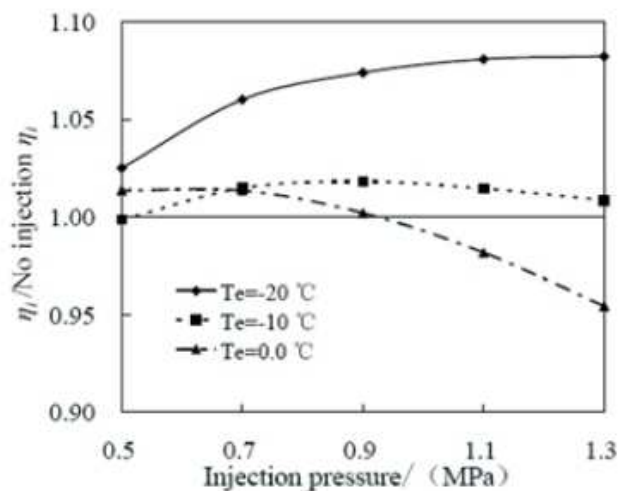


Figura 2.12: Confronto sull'efficienza di un compressore scroll con e senza iniezione di vapore

L'effetto ottenuto tramite l'iniezione del refrigerante sull'efficienza di un compressore scroll è stato studiato in [21] e in figura 2.12 viene mostrato il risultato ottenuto: l'efficienza del compressore con e senza iniezione di vapore varia a seconda della pressione di iniezione. Il grafico quindi mostra che un ottimo punto per iniettare il refrigerante esiste e ha senso solo in corrispondenza di alti livelli di pressione.

Negli ultimi anni si è considerata una buona soluzione per risolvere le inefficienze anche l'utilizzo di un controllo sulla capacità del compressore; molte forme di controllo sono già in uso per compressori alternativi, per quanto riguarda però il compressore scroll una proposta consiste nel compressore scroll digitale. Questo tipo di compressore utilizza una valvola solenoidale per controllare la pressione nella camera di modulazione; ciò gli permette di operare tra 10 e 100% della sua capacità totale [22].

Un'altro miglioramento dell'efficienza ottenibile può sfruttare l'utilizzo di un compressore a velocità variabile, questa installazione può condurre ad un aumento dell'efficienza del 15% se si installa questo compressore in un ciclo esistente al posto di un compressore

standard, mentre si può giungere intorno al 40% se tutti i componenti del sistema sono stati concepiti per il funzionamento a velocità variabile [23].

In alcuni studi effettuati negli ultimi anni [24,25] si è proposto un compressore frigorifero nuovo chiamato "Revolving Vane" il cui punto di forza secondo i ricercatori è l'utilizzo di un cilindro rotativo che si muove in contemporanea con il meccanismo di compressione in modo da ridurre le perdite energetiche; effettivamente le perdite e gli attriti sono stati ridotti, al punto che i dati sperimentali hanno mostrato una riduzione del consumo energetico intorno all' 80% rispetto gli altri sistemi in commercio [24].

2.2.1.4.2.Valvole di espansione

Nel ciclo a semplice compressione di calore standard viene solitamente utilizzata come dispositivo di espansione la valvola di laminazione, che è un dispositivo economico ma soggetto a molte perdite. Per questo motivo si è sviluppato un nuovo tipo di valvola che permetta un maggior controllo sulle condizioni di funzionamento: la valvola elettronica di espansione termostatica (TEV). L'attenzione, oltre all'utilizzo di forme di controllo per i dispositivi di espansione esistenti, si è concentrata anche su nuovi apparecchi come espansori, eiettori, tubi vortex; tutti dispositivi che possono aumentare l'efficienza delle prestazioni del ciclo.

In figura 2.13 vengono mostrate diverse proposte di intervento sul ciclo. Nel caso a) è mostrato l'inserimento di un espansore, di solito accoppiato meccanicamente al compressore, il quale permette di recuperare il lavoro di espansione del gas che passa dal condensatore ad alta pressione verso l'evaporatore a bassa pressione. A seconda della scelta dell'espansore si potrà avere un recupero diverso: si può pensare ad un miglioramento dell'efficienza del 28% nel caso di espansori comuni (vite, scroll, rotativi) fino ad arrivare ad un 44% nel caso dell'utilizzo di espansori con pistoni oscillatori [26].

Nel caso c) invece viene proposto l'utilizzo di un tubo vortex che non ha parti in movimento al suo interno poiché sfrutta l'effetto Ranque. Questo effetto si ha quando un gas ad alta pressione è iniettato tangenzialmente in un tubo, in questo caso si crea un vortice al suo interno che determina due zone con differente temperatura e pressione: il gas al centro del tubo è certamente ad una temperatura e pressione minore rispetto a quello a contatto con le pareti. Il gas poi può venire estratto separatamente da entrambe le due regioni [27].

Nel caso b) invece viene presentato l'utilizzo di un eietto: la finalità di questo dispositivo è quella di aumentare la pressione del gas in aspirazione del compressore attraverso l'aumento dell'energia cinetica.

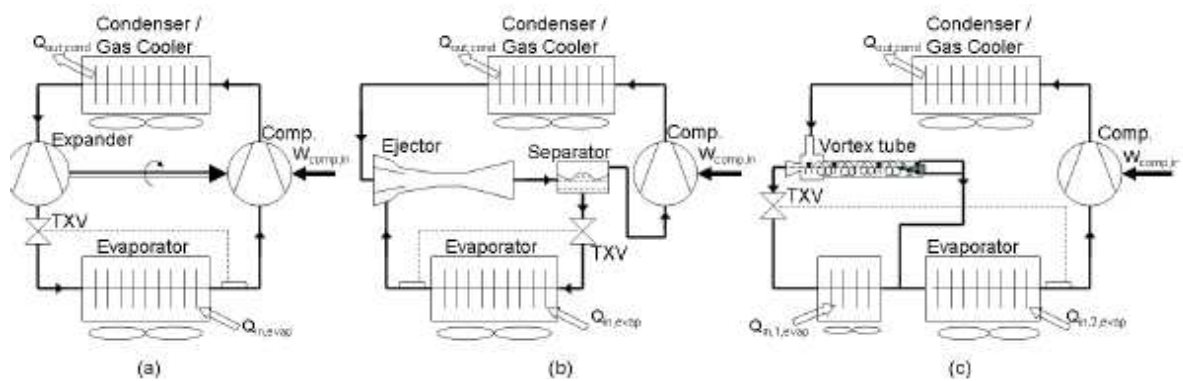


Figura 2.13: a) Ciclo con espansore, b) Ciclo con eiettore, c) Ciclo con tubo vortex [27]

Uno studio [28] è stato condotto sulle prestazioni di una pompa di calore con eiettore rispetto ad un semplice ciclo di compressione standard. Lo schema impiantistico mostrato in figura 2.14 utilizza un eiettore per eseguire diversi gradi di compressione del refrigerante, naturalmente a seconda della pressione del refrigerante in uscita dal condensatore e dalla quantità di calore recuperata nell'evaporatore. La presenza di un separatore gas-liquido separa le due fasi del refrigerante, in modo che il gas fluisca direttamente nel compressore ad alta pressione mentre la fase liquida fluisce nell'evaporatore; in questo modo l'eiettore riduce l'assorbimento di potenza del compressore, fino a ricoprire completamente la necessità di potenza nel caso in cui il calore di recupero sia elevato. Questo tipo di miglioramento ha portato ad un aumento delle prestazioni circa del 21%.

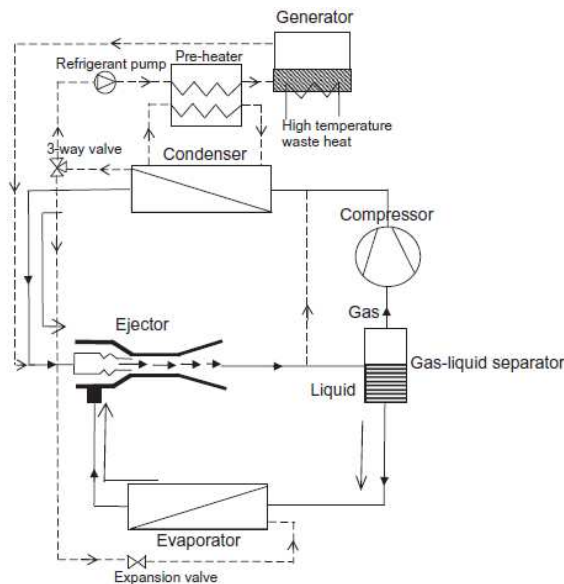


Figura 2.14: Sistema a compressione con eiettore

2.2.1.4.3. Scambiatore di calore

Guardando la distribuzione della carica di fluido di lavoro all'interno di un sistema a pompa di calore è del tutto evidente che la parte dominante si trova in corrispondenza

dell'evaporatore o del condensatore di vapore per le unità che lavorano con un ciclo di compressione e ricomprensione meccanica del vapore. Ridurre quindi il carico di lavoro su questi organi senza però diminuire l'efficienza energetica del sistema può sembrare un compito difficile perché bisogna tenere in considerazione dei vincoli presenti, come la dimensione dell'area di scambio termico che non dovrebbe essere assolutamente diminuita. La soluzione più attuabile per risolvere questo problema è quella di diminuire l'area del canale sezione trasversale, vale a dire il diametro idraulico. Fortunatamente, un diametro ridotto può offrire possibilità di aumentare i coefficienti di scambio di calore; proprio verso questo obiettivo si sono mosse le ricerche negli ultimi anni per giungere alla costruzione di scambiatori di calore compatti che diano buoni risultati anche in presenza di un fluido bifase e non solo monofase, dove il loro utilizzo è già consolidato [29].

Lo studio effettuato in [29] commissionato dal centro IEA mostra una vasta gamma di scambiatori di calore compatti che hanno le potenzialità per essere utilizzati nell'ambito delle pompe di calore. La definizione di scambiatori di calore compatti deriva dalla loro caratteristica principale: l'elevato rapporto tra superficie di scambio e volume occupato. Questa continua ricerca volta ad aumentare la superficie di scambio riducendo il volume occupato ha portato anche allo sviluppo di scambiatori di calore a micro canali e con alette forate come in figura 2.15. Questi scambiatori di solito costruiti in alluminio riducono volume e peso di condensatori ed evaporatori; è da notare che in genere gli scambiatori a micro canali sono montati verticalmente per favorire il drenaggio della condensa di vapore acqueo. L'utilizzo di questi scambiatori, sebbene sia già proposto in ambito residenziale, è ancora sotto un'attenta analisi prima della sua diffusione anche in campo industriale.

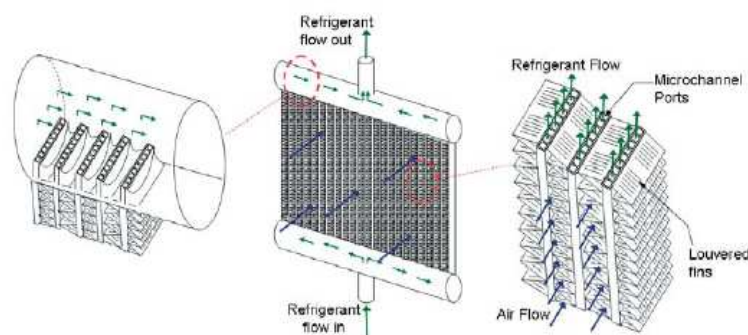


Figura 2.15: Scambiatori di calore a micro canali [27]

2.2.2. Pompe di calore attivate termicamente

Questo tipo di pompa di calore si differenzia dalle precedenti perché utilizza il calore di scarto per generare l'incremento di temperatura; in genere questo calore dovrebbe aver un livello di temperatura superiore ai 100°C per essere effettivamente utilizzabile.

All'interno di questa classificazione troviamo tre tipi principali di pompa di calore: a ricomprensione termica di vapore, ad assorbimento e i trasformatori di calore.

2.2.2.1. Pompa di calore a ricompressione termica di vapore

A differenza delle pompe ad azionamento meccanico, questo tipo di pompa a ciclo aperto utilizza un eiettore e vapore ad alta pressione (tra 7-15 bar) per ottenere il calore di alimentazione della macchina. I componenti principali di questo sistema sono evaporatore, condensatore ed eiettore; non contiene parti in movimento come si vede dalla figura 2.16.

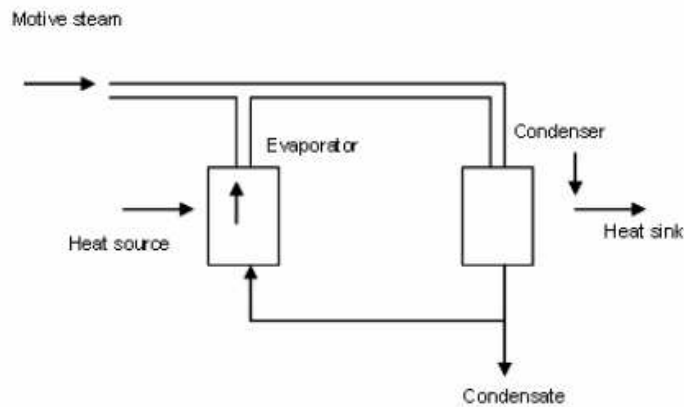


Figura 2.16: Schema di un ciclo a ricompressione termica di vapore [16]

Il COP in questo caso è definito come il rapporto tra il calore ceduto al condensatore e il calore ottenuto dal vapore iniettato; dalla figura 2.17 si può osservare la dipendenza del COP dall'incremento di temperatura ottenibile. Come si vede in figura 2.17 per avere un incremento di temperatura di circa 40 K, a partire per esempio da basse temperature come 50°C, si otterrà un valore per il COP che si aggira intorno a 1,2-1,5.

E' da notare il fatto che questo tipo di ciclo può essere regolato attraverso una riduzione del vapore iniettato o l'utilizzo di ugelli di diverso diametro, inoltre anche l'utilizzo di eiettori multipli consente di ottenere una vasta gamma di capacità.

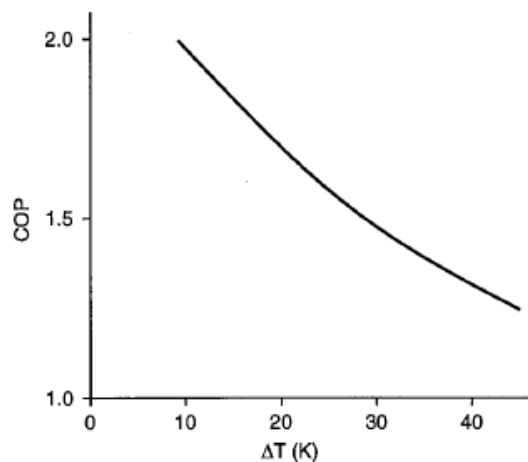


Figura 2.17: Dipendenza del COP dall'incremento di temperature [16]

2.2.2.2.Pompa di calore ad assorbimento

Il principio di funzionamento di questo ciclo è stato descritto nel primo capitolo in dettaglio, qui presentiamo le due configurazioni che questo può assumere; esse sono adatte per scopi diversi: pompa di calore ad assorbimento (Absorption Heat Pump, AHP tipo I) e trasformatore di calore (AHP, tipo II) [16].

La differenza tra i due cicli consiste nel livello di pressione nei quattro scambiatori di calore principali (evaporatore, assorbitore, desorbitore e condensatore), che influenza i livelli di temperatura dei flussi di calore.

2.2.2.2.1.Pompa di calore ad assorbimento, tipo I

In una pompa di calore ad assorbimento il calore è innalzato da un basso livello di temperatura ad un livello intermedio, sfruttando l'energia termica fornita dalla fonte ad alta temperatura. L'incremento di temperatura ottenibile con questo tipo di ciclo si aggira intorno ai 50 K.

Nella tabella iniziale il ciclo ad assorbimento non viene preso in considerazione per le applicazioni industriali tuttavia, nonostante i vincoli dovuti al basso incremento di temperatura che esso consente e al pericolo della cristallizzazione del fluido di lavoro nello svolgimento del ciclo, trova comunque applicazioni industriali.

Come per il ciclo a compressione meccanica di vapore, la modifica più semplice attuabile in questo ciclo è quella di inserire uno scambiatore di calore che, posto come in figura 2.18, permette alla soluzione proveniente dall'assorbitore di essere preriscaldata prima di entrare nel generatore; in questo modo viene ridotto l'apporto di calore al generatore [30].

Nel ciclo vi può essere la presenza anche di un rettificatore, nel caso si utilizzi una coppia lavoro acqua-ammoniaca, perché occorre purificare il refrigerante prima che questo entri nel condensatore. Utilizzando l'acqua come assorbente, questa evaporerà con l'ammoniaca (refrigerante) e senza il rettificatore verrà condensata, accumulandosi infine nell'evaporatore e riducendo le prestazioni del ciclo.

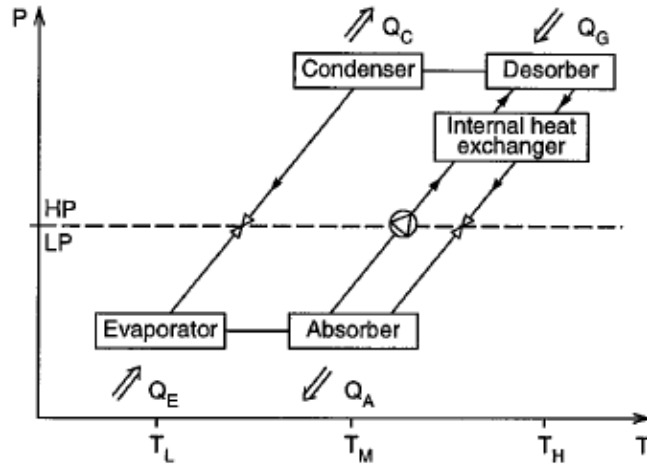


Figura 2.18: Schema di pompa di calore ad assorbimento con uno scambiatore di calore (HX, heat exchanger)[16]

2.2.2.2.2. Trasformatore di calore

Il trasformatore di calore è utile per recupero di calore industriale ad un livello di temperatura media tra i 60 e 100°C, poiché grandi quantità di calore sono rilasciate industrialmente a queste temperature. Dal momento che il sistema appartiene alla famiglia della pompa di calore ad assorbimento, possiede gli stessi vantaggi di quest'ultima: la possibilità di lavorare con calore a bassa temperatura (anche per esempio con energia solare), la necessità di scarsa manutenzione vista l'assenza di parti in movimento.

La differenza rispetto al ciclo ad assorbimento, come si vede in figura 2.19, sta nel fatto che i livelli di pressione sono invertiti e quindi anche il flusso di calore si muove in modo diverso rispetto al ciclo precedente. La fonte da cui si recupera calore è posta ad un livello intermedio; una parte di questo calore è portata ad una temperatura elevata, l'altra parte invece è scaricata ad una temperatura inferiore.

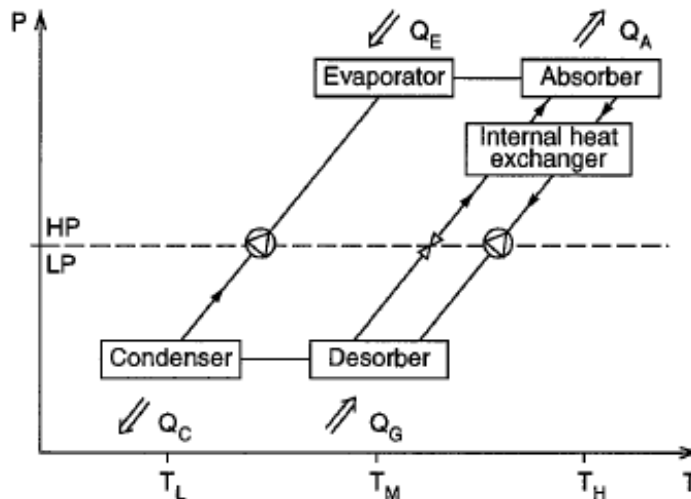


Figura 2.19 : Diagramma termodinamico di un trasformatore di calore [16]

Questo ciclo ha componenti simili a quelli di un ciclo ad assorbimento a singolo effetto, con l'unica differenza che il dispositivo di espansione installato tra il condensatore e l'evaporatore viene sostituito da una pompa. Quest'organo è utilizzato per pompare il liquido refrigerante dal condensatore verso l'evaporatore ad alta pressione; qui è vaporizzato grazie al calore asportato dal generatore che è alla stessa temperatura; a questo punto il vapore refrigerante è assorbito dalla soluzione nell'assorbitore dove il calore viene ceduto ad alta temperatura. Le prestazioni del trasformatore sono migliorate con l'installazione di uno scambiatore di calore controcorrente tra il generatore e l'assorbitore che permette di recuperare il calore sensibile dalla soluzione.

Il fluido di lavoro più utilizzato in ambito industriale per questo ciclo è la coppia acqua-bromuro di litio che permette un' incremento di temperatura di circa 50-60 K per aggiornare il calore da una temperatura di 100°C ad una di circa 150°C.

Un prototipo studiato dal ECN (Energy Research Centre of the Netherlands) utilizzando un fluido di lavoro dato dalla combinazione di LiCl+ MgCl₂ +ammoniaca ha prodotto vapore a 200°C a partire da una fonte di calore a 130°C [14].

Il COP calcolato per il trasformatore di calore si aggira tra i valori 0,45 e 0,50, ciò significa che circa la metà del calore di scarto può essere recuperato e fornito ad una temperatura maggiore senza l'aggiunta di energia.

Come già detto per i sistemi a compressione meccanica di vapore, anche per i sistemi ad assorbimento la temperatura del condensatore influisce sulle prestazioni del sistema. Dalla figura 2.20 si vede come l'aumento della temperatura del condensatore diminuisca il COP del sistema, perché si ridurrà la capacità di assorbimento. Al contrario invece un aumento della temperatura dell'evaporatore e del generatore comporterà un aumento del livello di pressione e un COP maggiore come si vede in figura 2.21. Una variazione sul COP la si vede anche nel caso in figura 2.22 in cui la temperatura dell'evaporatore sia diversa da

quella del generatore: più precisamente se la temperatura del generatore rimane costante e si fa variare solo quella dell'evaporatore ad un livello superiore si vede che il COP e la capacità di assorbimento aumentano, tuttavia si rischia di incorrere nel processo di cristallizzazione. Nello studio [31] sono state riscontrate queste caratteristiche riguardanti il trasformatore di calore, in più è stato visto che questo sistema è in grado di lavorare anche a carico parziale con una buona efficienza.

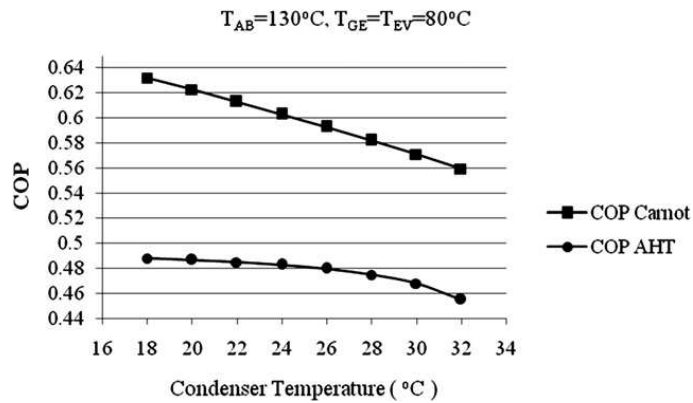


Figura 2.20: Relazione tra COP e la temperatura del condensatore

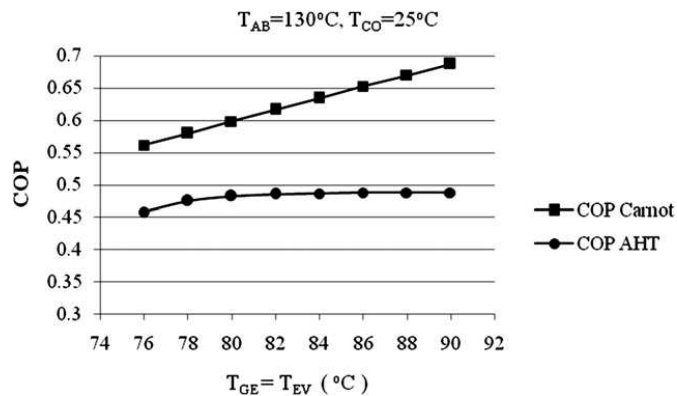


Figura 2.21: Relazione tra COP e la temperatura del generatore

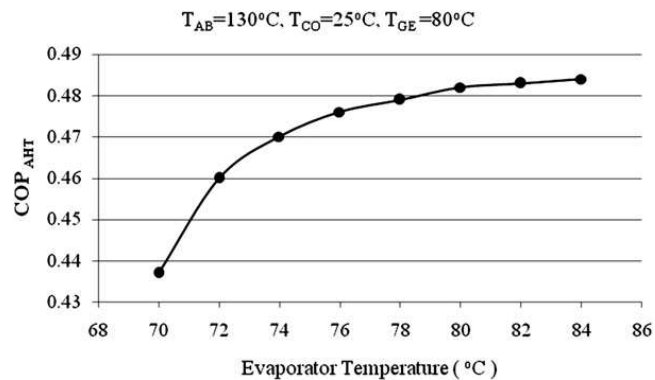


Figura 2.22: Relazione tra COP e la temperatura dell'evaporatore

Modifiche a questo tipo di ciclo sono state studiate in passato con lo scopo di aumentare la quantità di calore ceduto dall'assorbitore, ma la loro attuazione e le loro prestazioni sono risultate inferiori rispetto al ciclo tradizionale. Per esempio sono stati proposti: cicli multi effetto che, pur essendo in grado di elevare la temperatura di circa la metà del calore fornito, permettono un incremento di temperatura molto ridotto; cicli multi livello, al contrario, presentavano un incremento di temperatura notevole, ma il calore che veniva effettivamente recuperato era meno della metà di quello fornito [32].

2.2.2.2.3. Coppie di fluidi di lavoro per pompe di calore ad assorbimento

Naturalmente nel primo capitolo abbiamo già elencato i fluidi di lavoro fino ad oggi utilizzati per questo ciclo, ammoniaca-acqua e acqua-bromuro di litio; in ambito industriale sicuramente il più utilizzato è la coppia acqua-bromuro di litio.

Tuttavia, le soluzioni acquose di bromuro di litio sono in grado di corrodere fortemente le attrezzature in acciaio-ferro e cristallizzare facilmente quando la concentrazione bromuro di litio è alta. Per riuscire a superare questo problema si è osservato che l'aggiunta di additivi alla miscela può ridurre la concentrazione di bromuro di litio e quindi aumentare il limite di cristallizzazione.

Uno studio in questa direzione [33] ha mostrato che $H_2O+LiBr+HO(CH_2)_3OH$ può aumentare il limite di cristallizzazione del 8% rispetto a quello della soluzione di bromuro di litio; in alternativa, un fluido di lavoro proposto in uno studio [34] presentava una miscela di acqua e idrossidi (assorbente) riuscendo ad operare in maniera soddisfacente ad una temperatura del generatore tra i 130 e 160°C. Tra gli studi effettuati sugli additivi possibili l'utilizzo di $LiNO_3$ si è dimostrato essere adatto a ridurre la corrosività della soluzione e aumentare la solubilità dell'assorbente; i vantaggi che questa miscela può apportare riguardano, come si vede dal confronto tra i due fluidi in tabella 2.2, il COP e le temperature di recupero e cessione del calore.

Tabella 2.2: Confronto tra le performance delle due miscele

	Cooling medium of evaporator		Concentration of absorbent		Generator		Condenser	Absorber	COP	
	Input	Output	Strong solution	Weak solution	Steam Temp.	Heat load	Heat load	Heat load	TOC	
	°C	°C	wt%	wt%	°C	kW	kW	kW	°C	
LiBr + H ₂ O	40	30	65.6	60.6	149	692	546	678	38	1.69
LiBr + LiNO ₃ +H ₂ O			66.7	61.7	145	665	521	665	36	1.73
LiBr + H ₂ O	35	25	68.3	63.3	158	703	551	686	7	1.68
LiBr + LiNO ₃ +H ₂ O			69.6	64.5	152	670	523	677	19	1.72
LiBr + H ₂ O	25	20	71.1	66.1	167	711	558	689	—	1.67
LiBr + LiNO ₃ +H ₂ O			72.3	67.4	159	682	525	692	5	1.72

—: Crystallization.

Prendendo in considerazione una pompa di calore ad assorbimento con un carico termico all'evaporatore di 500 kW percorsa da $\text{LiBr}+\text{LiNO}_3+\text{H}_2\text{O}$ si vede che il COP ottenibile con la nuova soluzione è superiore circa del 5% rispetto all'utilizzo della miscela di semplice $\text{H}_2\text{O}+\text{LiBr}$; inoltre la nuova miscela permette di poter lavorare anche a basse temperature in corrispondenza dell'evaporatore, consentendo un maggior recupero di calore anche da flussi a bassa intensità energetica. In aggiunta le alte temperature dell'assorbitore e del condensatore risultano essere più sostenibili dalla nuova miscela rispetto alla coppia tradizionale; l'acqua di raffreddamento quindi attraverso l'evaporatore e l'assorbitore può essere riscaldata ad una temperatura più elevata con questa nuova miscela [35]. La ricerca per trovare nuovi fluidi che non provochino i problemi sopra descritti come cristallizzazione, corrosione, elevata pressione di lavoro, si è concentrata anche sui liquidi ionici: sali con un punto di fusione inferiore ai 100°C che presentano risposte positive a tutti questi problemi [36]. Un'analisi sul comportamento di un liquido ionico (1,3-dimethylimidazolium dimethylphosphate ([MMIM][DMP])) agente come assorbente associato a tre diversi tipi di refrigeranti (acqua, etanolo e metanolo) ha mostrato dei risultati interessanti tanto da renderli buoni candidati per pompe di calore e trasformatori da utilizzare in applicazioni industriali [36].

2.2.3. Aree di applicazione

In ambito industriale tutti i cicli presentati hanno già un ruolo consolidato all'interno dei processi produttivi come si è visto dalla tabella 2.1. Raggruppando le varie pompe di calore a seconda dei processi in cui sono utilizzate possiamo trovare le seguenti applicazioni:

- Riscaldamento: è consolidato l'utilizzo di pompe di calore a compressione di vapore poiché permettono di utilizzare fonti di calore convenzionali per riscaldare ambienti o edifici industriali, oppure recuperare calore da cascami termici industriali che non potevano essere usati direttamente con il fine di elevarlo ad una temperatura superiore.
- Riscaldamento/raffreddamento di acque di processo. In molti settori l'acqua ad una temperatura tra i $40-90^\circ\text{C}$ è utilizzata per il lavaggio e la sanificazione, in questi campi vengono utilizzate pompe di calore a compressione di vapore, ma trovano applicazione anche pompe di calore ad assorbimento e trasformatori di calore.
- Produzione di vapore. Nei processi industriali, sono consumate grandi quantità di vapore a bassa, media e alta pressione in un intervallo di temperatura tra i $100-200^\circ\text{C}$. Le pompe di calore in grado di produrre vapore ad alta temperatura sono sistemi aperti o semi aperti a ricompressione meccanica di vapore, a ciclo chiuso

come pompe di calore a compressione, sistemi a cascata e in alcuni casi trasformatori di calore.

- Essiccazione e deumidificazione. Le pompe di calore sono ampiamente usate per la deumidificazione e i processi industriali di essiccazione ad una temperatura inferiore ai 100°C. Le principali applicazioni riguardano l'essiccazione di prodotti alimentari e non, in genere tutti comunque molto sensibili alla temperatura alla quale vengono essiccati. Le pompe di calore coinvolte in questo processo sono sia a ciclo chiuso che a ciclo aperto come ricompressione meccanica e termica di vapore.
- Evaporazione, distillazione e concentrazione. Questi sono processi ad alta intensità energetica che vengono svolti in industrie chimiche e alimentari. La maggior parte dei sistemi sono a ciclo chiuso a compressione di vapore e a ciclo aperto a ricompressione di vapore.

2.3.Nuovi cicli a pompa di calore

Accanto a queste tecnologie consolidate iniziano a comparire, anche in ambito industriale e non solo residenziale e commerciale, nuovi tipi di pompe di calore che sono stati sottoposti a studi e miglioramenti nel corso degli ultimi anni.

Stiamo parlando, per esempio, di pompe di calore ad adsorbimento che risultano essere di grande utilità in applicazioni dove sia richiesto un contemporaneo effetto di riscaldamento e raffreddamento.

In via di sviluppo sono le pompe di calore chimiche utilizzabili anche all'interno di processi di essiccazione oltre che per industrie che sfruttano reazioni chimiche.

Pompe di calore ibride sono state sviluppate nell'ambito di processi di essiccazione, come per esempio: pompe di calore accoppiate a collettori solari, utilizzate anche per la dissalazione; pompe di calore che sfruttano energia geotermica e ad infrarossi

Nel campo della distillazione compare anche un nuovo tipo di pompa di calore ibrida definita termoacustica che potrà trovare applicazione in un mercato futuro.

Presentiamo qui di seguito una panoramica dei nuovi tipi di pompa che si stanno affermando nei processi industriali.

2.3.1.Pompe di calore ad adsorbimento

Negli ultimi anni, l'importanza delle pompe di calore ad adsorbimento e dei sistemi di refrigerazione ad adsorbimento è aumentata, in quanto questi tipi di sistemi possono utilizzare direttamente fonti di energia termica primarie (come energia solare, geotermica), nonché il calore residuo generato in vari processi industriali.

Le pompe di calore ad adsorbimento appartengono quindi alla famiglia delle pompe alimentate termicamente come quelle ad assorbimento, tuttavia si differenziano dai sistemi finora considerati. Ponendole a confronto con i sistemi a compressione di vapore si vede che queste hanno il vantaggio di poter ottenere un maggior risparmio energetico, perché alimentate da calore di scarto o energia solare, inoltre presentano un più semplice controllo, assenza di vibrazioni e costi operativi più bassi [37].

Spostando questo confronto poi sui sistemi ad assorbimento, si vede che il ciclo ad adsorbimento può essere alimentato da una vasta gamma di temperature, a partire dai 50°C fino ai 600°C o anche oltre; non c'è bisogno di inserire una pompa per il liquido o un rettificatore per il refrigerante, inoltre non si presenta alcun problema di corrosione. Una differenza sostanziale tra i due sistemi consiste nel fluido di lavoro: nel ciclo ad assorbimento il refrigerante viene assorbito, quindi disciolto nell'assorbente, nel caso del ciclo ad adsorbimento il refrigerante viene assorbito dai pori del mezzo assorbente. Naturalmente le coppie di fluido di lavoro sono diverse, infatti si utilizzeranno assorbenti solidi che rivestiranno le superfici interne degli scambiatori come zeolite/acqua, gel di silice/acqua tra le più usate, ma anche carbone attivo/ammoniaca oppure carbone attivo/metanolo; come si vede dalla tabella 2.3, le performance tra i due sistemi saranno diverse.

Tabella 2.3: Confronto tra le prestazioni di pompe di calore ad assorbimento ed adsorbimento [37]

Process	Adsorption		Absorption		
	water silica gel	water zeolite	water/LiBr Single-effect	water/LiBr double-effect	ammonia water
Temperature Heat source [°C]	60–90	75–150	75–110	135–200	100–180
Capacity [kW]	7.5–500	7–15	15–12000	200–6000	18–700
COP heat pumping	1.4–1.6	1.3–1.5	1.4–1.6	1.8–2.2	1.4–1.6
COP cooling	0.5–0.7	0.4–0.6	0.6–0.7	0.9–1.3	0.5–0.7

Come per le pompe ad assorbimento, il ciclo lavora su tre livelli di temperatura e presenta come componenti: un assorbitore che contiene l'assorbente, condensatore, evaporatore e una valvola d'espansione. Come si vede in figura 2.23 il fluido di lavoro è vaporizzato nell'evaporatore grazie al calore assorbito dalla sorgente termica a più bassa temperatura, e rilasciato ad una temperatura intermedia attraverso il processo di assorbimento; il

processo di desorbimento invece asporta calore dal livello più alto e lo rilascia ad un livello intermedio attraverso la condensazione del fluido di lavoro.

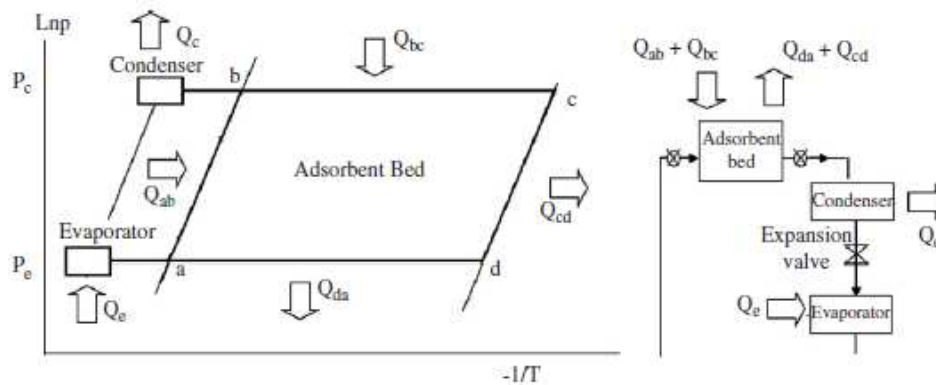


Figura 2.23: Ciclo termodinamico di una pompa di calore ad adsorbimento [38]

Vi sono comunque svantaggi riguardanti questa tecnologia che cercano di essere superati attraverso la ricerca di nuovi cicli in grado di aumentare il COP, nuove coppie di fluidi di lavoro e miglioramenti per il letto assorbente, affinché questo consenta un maggiore scambio di calore. Negli ultimi anni si è dedicata molta attenzione a risolvere questi problemi come mostrato nello studio [38].

In ambito industriale l'applicazione di questa tecnologia si limita ancora ad un campo molto ristretto di processi, in quanto deve ancora esserci un miglioramento delle prestazioni affinché questa sia competitiva con le altre pompe già presenti sul mercato; tuttavia trova un'ottima applicazione nei frantoi dal momento che riesce a soddisfare la richiesta di riscaldamento e raffreddamento che questo processo richiede.

La principale coppia utilizzata è zeolite-acqua, come si vede anche dallo studio [39] che mostra l'applicazione di un sistema ad adsorbimento per trattare le acque reflue di un frantoio e fornire un effetto di raffreddamento. Uno svantaggio di questa tecnologia in quest'ambito consiste nel fatto che per elevare il COP e riuscire ad avere più vantaggi rispetto le altre tecnologie, oltre a dover ridurre la differenza di temperatura tra evaporatore e condensatore, bisogna anche ridurre il rapporto tra massa metallica e la massa dell'assorbente per consentire un maggior scambio di calore. Si è osservato dall'analisi svolta che aumentando lo spessore dello strato di zeolite da 100 a 400 μm il COP del sistema aumenta (figura 2.24), anche se va comunque trovato un compromesso con la potenza del sistema che si riduce con l'aumento dello spessore. Lo spessore ottimale corrisponde a 75 μm poiché, come si vede in figura 2.25, consente il massimo scambio di energia.

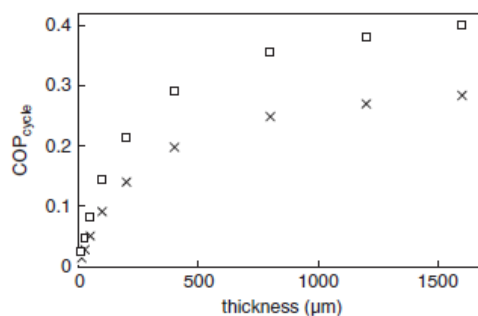


Figura 2.24: Variazione del COP_{ciclo} in relazione con lo spessore dello strato di zeolite nel caso in cui la temperatura dell'evaporatore e del condensatore siano (x) 5 e 60°C (□) 5 e 30°C

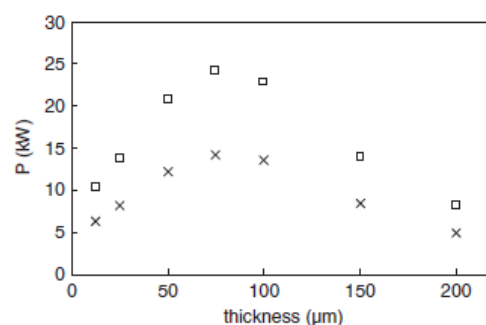


Figura 2.25: Variazione della potenza in relazione allo spessore di zeolite quando le temperature all'evaporatore e al condensatore siano (x) 5 e 60°C (□) 5 e 30°C

2.3.2. Sistema ibrido ad energia solare

Questo tipo di sistema ibrido trova applicazione innanzitutto nell'ambito del riscaldamento dell'acqua sanitaria, ma anche in processi essiccativi.

In figura 2.26 è mostrato uno schema semplificato per un asciugatore a pompa di calore associato a collettori solari. L'aria per l'essiccazione attraversa la camera di essiccazione e assorbe l'umidità del prodotto, questa poi viene convogliata nell'evaporatore che funge da deumidificatore. Durante il processo di deumidificazione, l'aria umida viene prima raffreddata sensibilmente fino al suo punto di rugiada, poi un ulteriore raffreddamento produce la condensazione dell'umidità. Il calore recuperato nell'evaporatore viene utilizzato per l'evaporazione del refrigerante, che sarà poi inviato al condensatore. Nel collettore solare, la radiazione solare proveniente dal sole viene convertita in calore sensibile che permette di riscaldare l'aria deumidificata che attraversa i tubi presenti nel pannello e a cui va ad aggiungersi poi il calore del condensatore per ottenere l'aria adatta per il processo di essiccazione.

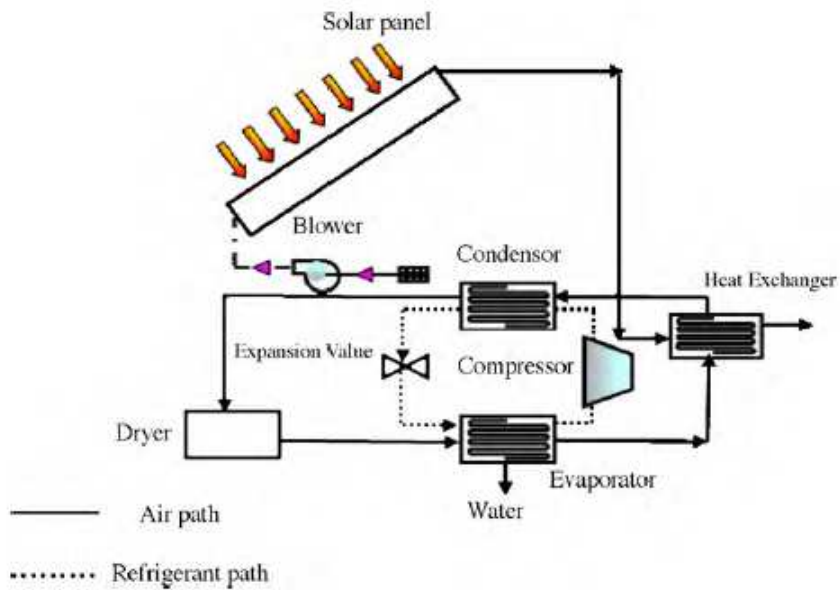


Figura 2.26: Schema di un essiccatore a pompa di calore accoppiato con collettori solari [41]

Uno studio [40] relativo all'essiccazione di prodotti agricoli ha osservato che l'accoppiamento di una pompa di calore ad un collettore solare termico ha migliorato l'efficienza di quest'ultimo portandola da un valore compreso tra 0,7-0,75 ad un valore tra 0,8-0,86. L'accoppiamento di collettori solari non è stato studiato solo con pompe di calore a compressione meccanica di vapore ma anche con pompe di calore ad assorbimento. Nello studio [41] si è proposta l'essiccazione di noccioline con un essiccatore solare accoppiato ad una pompa ad assorbimento (figura 2.27).

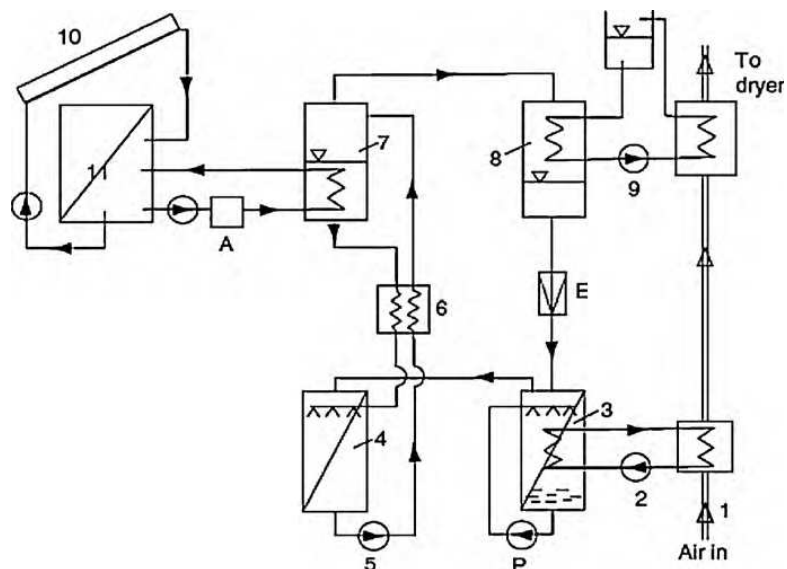


Figura 2.27: Essiccatore solare accoppiato ad una pompa ad assorbimento

Un altro sistema ibrido è stato studiato per l'essiccazione di fagioli e la produzione di acqua calda, il cui schema è riportato in figura 2.28. L'aria, che è il mezzo di essiccazione, è

riscaldata utilizzando dei collettori solari e deumidificata poi grazie alla pompa di calore a compressione di vapore. Vi sono due cicli percorsi separatamente dall'aria e dal refrigerante R-134 che servono il primo per il processo di essiccazione e il secondo per il sostanziale riscaldamento dell'acqua. Il COP ottenuto da questo ciclo si avvicina al valore 7, inoltre l'efficienza del collettore si avvicina a 0,86 [42].

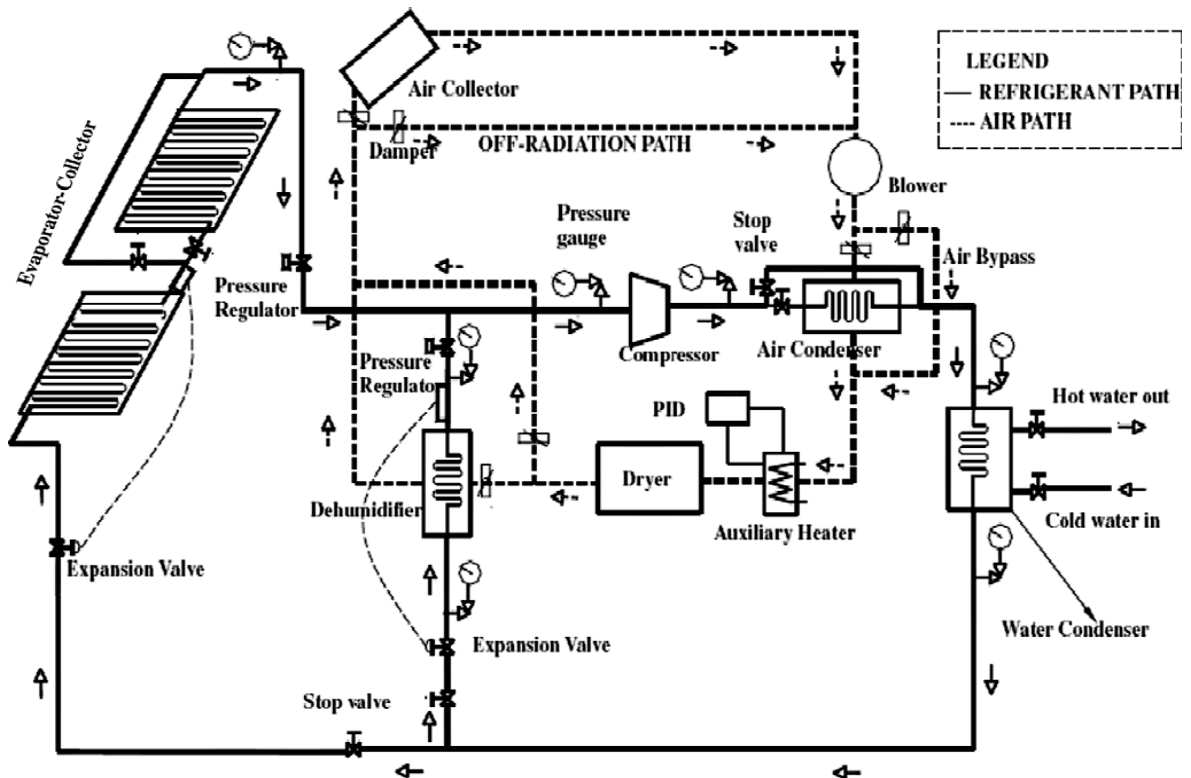


Figura 2.28: Diagramma di un essiccatore a pompa di calore accoppiato a collettori solari utilizzato anche per il riscaldamento dell'acqua

Un sistema ibrido solare, oltre all'utilizzo in processi di asciugatura, è stato proposto anche per il processo di desalinizzazione perché il consumo di energia potrebbe essere inferiore rispetto a sistemi che usano una pompa di calore a compressione meccanica. Uno studio [43] effettuato su un sistema per la produzione di acqua potabile ha mostrato che, oltre a produrre un litro d'acqua desalinizzata per ora, il COP di tale sistema si trovava in un range tra 5 e 9.

Una panoramica sugli essiccatori a pompa di calore accoppiati a collettori solari si può trovare nello studio [44].

2.3.3. Sistema ibrido ad infrarossi e frequenze radio

Accanto ai sistemi ibridi che sfruttano l'energia solare possiamo porre sistemi che utilizzano infrarossi o frequenze radio per processi di essiccazione. Nel primo caso, come si vede in figura 2.29, il processo di essiccazione radiante-convettiva si è dimostrato essere un metodo di rimozione dell'umidità superficiale rapido nelle prime fasi di essiccazione; inoltre, se a questa fase segue un'asciugatura ad intermittenza, si riesce a ridurre il tempo di asciugatura e migliorare la qualità del prodotto [45].

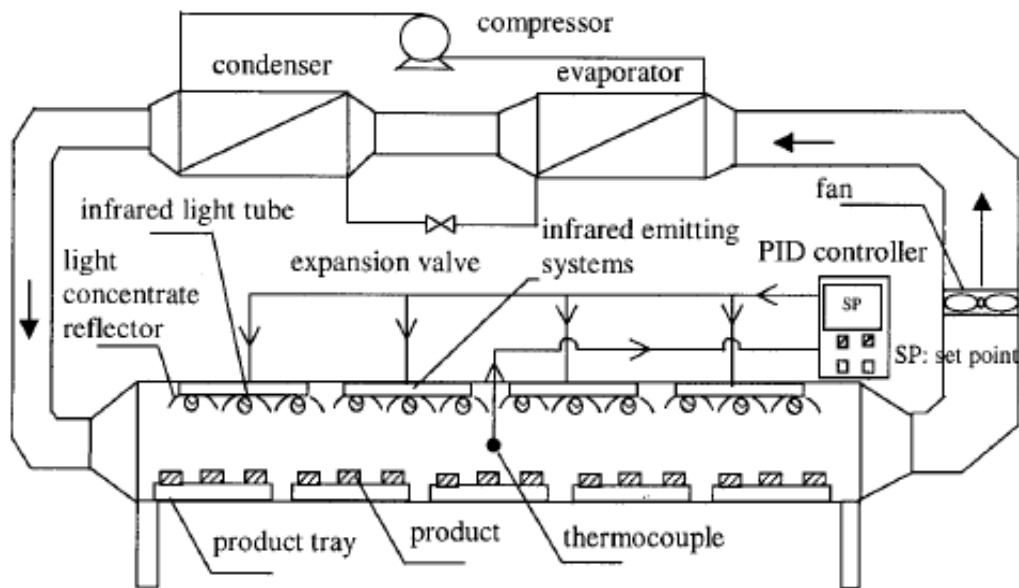


Figura 2.29: Schema di un essiccatore a pompa di calore ad infrarossi

Un essiccatore a pompa di calore che sfrutta invece le frequenze radio (figura 2.30) può rappresentare un valido sistema di asciugatura per materiali difficili da asciugare con il riscaldamento convettivo come ceramica e fibre di vetro. Tramite metodi tradizionali il prodotto rischia di presentare problemi come crepe, superficie scolorita; tutto questo utilizzando il nuovo sistema non si presenta perché la radiofrequenza riscalda contemporaneamente tutte le parti del prodotto ad una temperatura non superiore agli 80°C, facendo sì che l'acqua evapori dal prodotto con il comportamento di un gas e non per azione capillare [46].

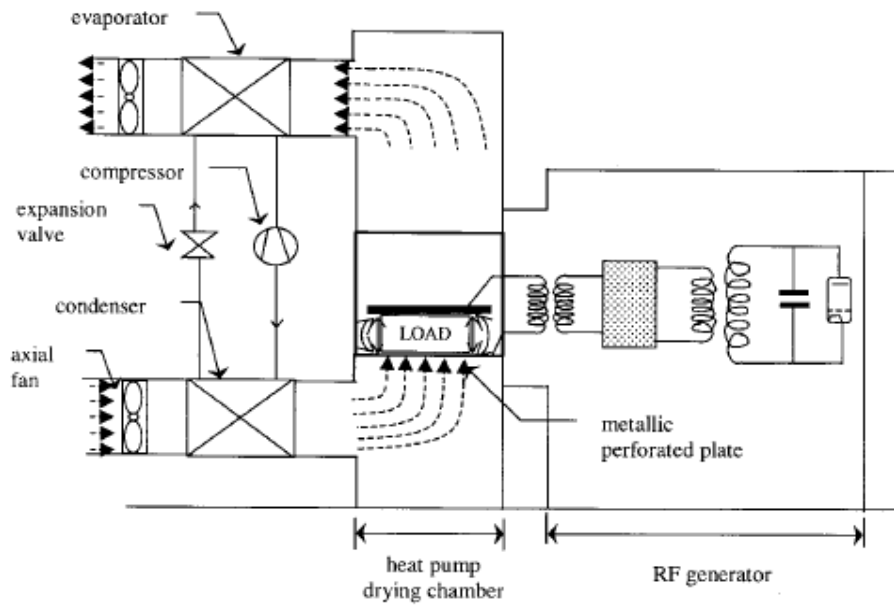


Figura 2.30: Schema di un essiccatore a pompa di calore assistito da onde radio

2.3.4. Pompe di calore alimentate da energia geotermica

La maggior parte degli studi su questa pompa di calore riguardano le applicazioni nell'area del riscaldamento di ambienti e dell'acqua sanitaria. Queste pompe sono una valida alternativa ai metodi convenzionali di riscaldamento perché il terreno è un mezzo di scambio termico più stabile rispetto all'aria, inoltre riesce a mantenere un elevato livello di prestazioni nei climi più freddi. Tuttavia oltre alle sole applicazioni residenziali questa tecnologia è stata studiata anche in ambito industriale più precisamente per processi di essiccazione come foglie di menta [47] o alloro [48].

Uno schema dell'impianto utilizzato è mostrato in figura 2.31: si può vedere come sia composto da tre sottosistemi: uno scambiatore di calore posto nel terreno, una pompa di calore a compressione e una camera di essiccazione [49].

In questo sistema il calore è estratto dal terreno dallo scambiatore di calore, che è percorso da una soluzione di acqua e antigelo; da qui, tramite l'evaporatore, il calore viene trasferito al refrigerante e attraverso il ciclo a compressione è portato ad una temperatura superiore, pronto per essere fornito di camera di essiccazione.

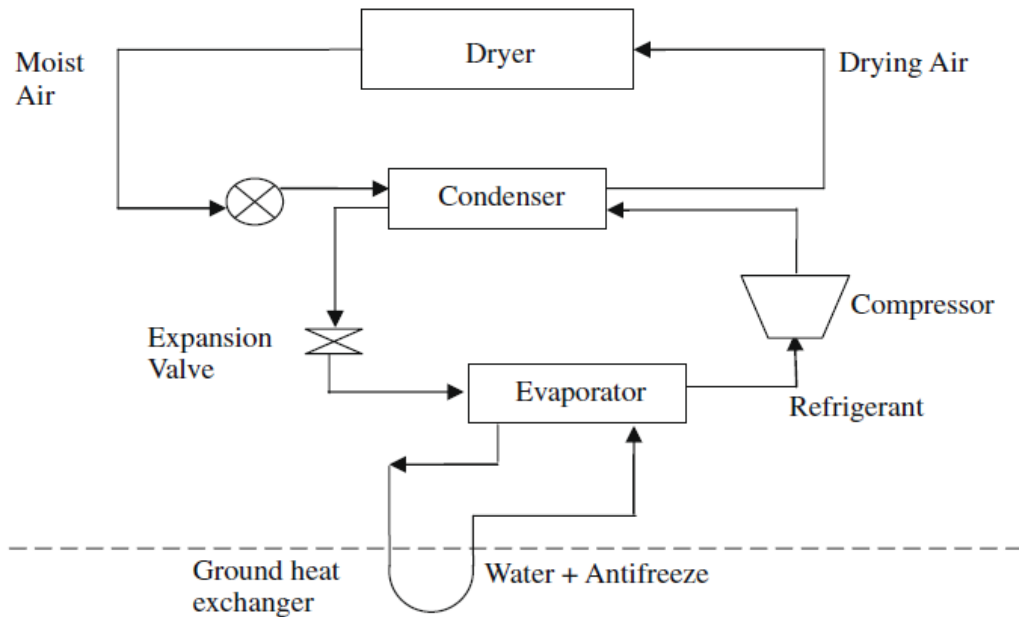


Figura 2.31: Schema di un essiccatore a pompa di calore che sfrutta l'energia geotermica

2.3.5. Pompa di calore chimica

La pompa di calore chimica si propone come una delle potenziali tecnologie per l'utilizzo in modo efficace dell'energia in vari processi industriali. Tra i processi industriali questa unità può essere efficacemente utilizzata in operazioni come distillazione, evaporazione ed essiccazione.

La principale caratteristica di una pompa di calore chimica consiste nella sua capacità di immagazzinare energia termica sotto forma di energia chimica attraverso una reazione endotermica, con il conseguente rilascio a diversi livelli di temperatura tramite reazioni esotermiche. Una pompa di calore chimica sfrutta, in linea di principio, due reazioni chimiche che avvengono a diverse temperature: la sequenza di reazioni serve per elevare la temperatura dell'energia termica e non per altri scopi come produzione di sostanze o altro. In genere questi sistemi sono composti da due unità principali: un reattore endotermico, che riceve calore a bassa temperatura, e un reattore esotermico, il quale rilascia il calore ad alta temperatura [50].

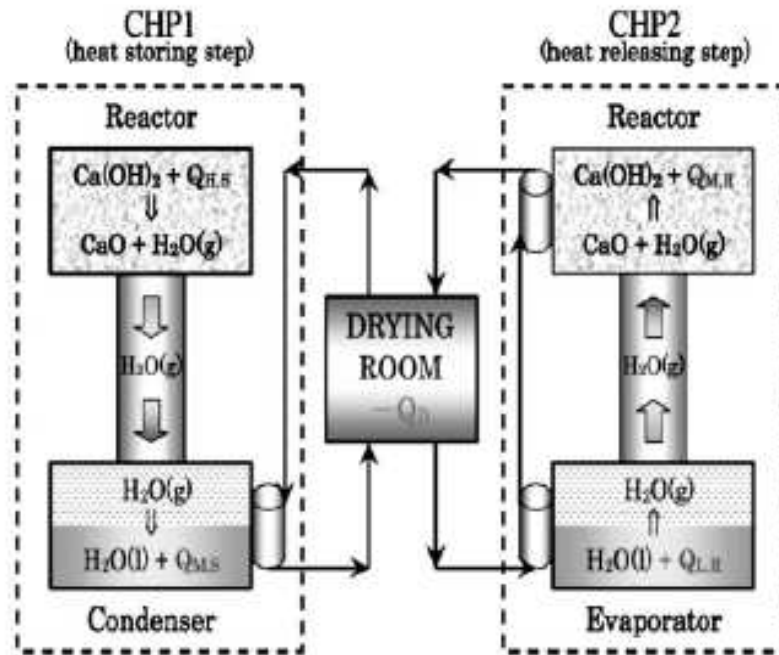


Figura 2.32: Pompa di calore chimica

Lo sviluppo principale di questa pompa di calore si è avuto nell'ambito della distillazione di composti chimici: per esempio, si è visto come sia possibile svolgere il processo di deidrogenazione di i-propanolo e idrogenazione di acetone; tuttavia ha trovato applicazione anche nel campo dell'essiccazione come si vede dalla figura 2.32 in cui una pompa di calore chimica che utilizza $\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ è stata accoppiata con un asciugatore convettivo per ottenere aria calda utilizzando aria a temperatura ambiente. L'unità, oltre ad essere utilizzata per aumentare la temperatura dell'aria, ha permesso anche la deumidificazione della stessa, caratteristica molto importante per una buona essiccazione [51]. In uno studio [52] è stato verificato per l'appunto che un sistema di idratazione/disidratazione basato sull'ossido di calcio risulta essere una tecnologia adatta per il processo di asciugatura dal punto di vista del livello di temperatura che raggiunge, la sicurezza e la corrosione dell'impianto.

Vi sono stati studi sull'utilizzo di questa pompa accoppiata ad un asciugatore anche per l'essiccazione di materiale ingombrante come la corteccia e il legname [53], tuttavia può essere adatto a qualsiasi processo essiccativo, in particolare quello di carta e cellulosa.

2.3.6. Pompa di calore termoacustica

Una pompa di calore termoacustica è una nuova tecnologia che va ad affiancarsi nei processi di distillazione, alle pompe a compressione di vapore.

Il processo di distillazione è un processo molto inefficiente dal punto di vista termodinamico poiché il calore fornito è utilizzato per portare ad ebollizione una miscela di liquidi, per poi venire rilasciato durante la condensazione ad una temperatura inferiore rispetto a quella a cui è stato fornito. Il calore di condensazione poi può essere riutilizzato nella stessa colonna di distillazione innalzando la sua temperatura con una pompa di calore, affinché possa essere riutilizzato nella successiva distillazione.

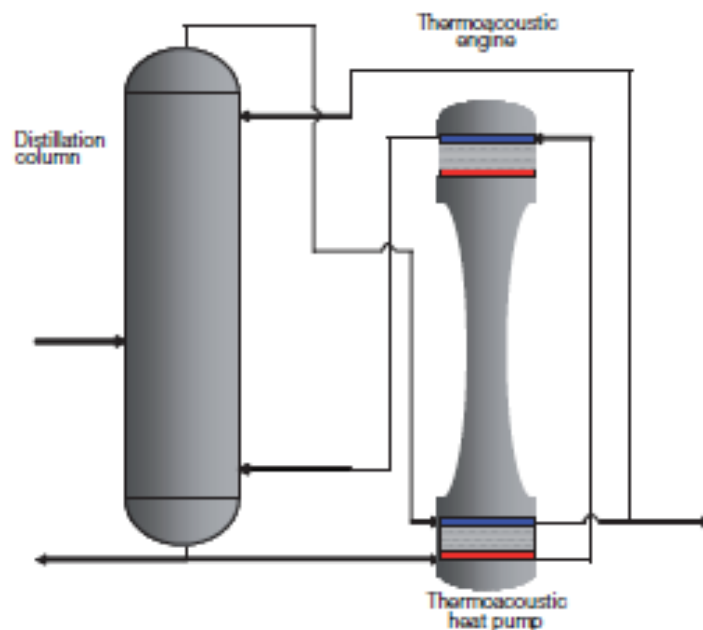


Figura 2.33: Schema di una colonna di distillazione associata ad una pompa di calore termoacustica

Una pompa di calore termoacustica è in grado, in questo contesto, di innalzare la temperatura oltre i 100°C in maniera efficace; in figura 2.33 è mostrata l'applicazione di questa pompa ad una colonna di distillazione. Il motore della pompa è alimentato da un generatore ad alta temperatura (bruciatore) oppure da vapore ad alta pressione e raffreddato dal flusso presente in fondo alla colonna. La differenza di temperatura tra questi due crea un'onda sonora intensa. Questa onda sonora aziona la pompa di calore nella parte inferiore dell'impianto. In questo componente il calore del flusso della parte superiore della colonna viene aggiornato a un livello di temperatura sufficiente per riscaldare il flusso inferiore [54].

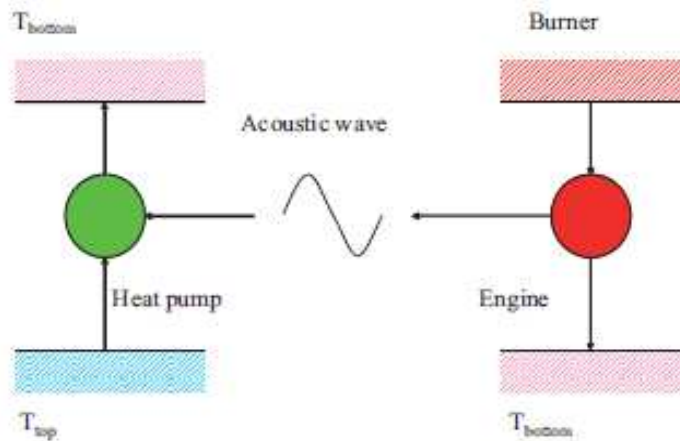


Figura 2.34: Processi di conversione tra calore ed energia sonora

Dal punto di vista termodinamico il processo è rappresentato in maniera schematica in figura 2.34 attraverso i processi di conversione tra il calore e la potenza sonora. La quantità totale di calore che viene fornita per scaldare la colonna proviene da: la parte a bassa temperatura del motore e il lato ad alta temperatura della pompa di calore; la somma di questi flussi di calore dovrebbe essere molto più grande del calore in ingresso alla sorgente ad alta temperatura (bruciatore).

I risparmi energetici che possono essere realizzati con questa tecnologia dipendono dall'efficienza dei processi di conversione; questa a sua volta dipende dal livello di temperatura del flusso di fondo (ribollitore) e la differenza di temperatura nella colonna.

CAPITOLO 3

Applicazioni della pompa di calore in ambito industriale

3.1. Integrazione della pompa di calore nei processi produttivi

Come si è visto dalla tabella 2.1 l'impiego delle pompe di calore in ambito industriale si è notevolmente ampliato negli ultimi anni, non solo per quanto riguarda la tecnologia già esistente rappresentata da pompe di calore a compressione meccanica di vapore e termocompressione, ma anche per quanto concerne le nuove tecnologie sviluppate.

In questo capitolo passeremo in rassegna degli esempi applicativi all'interno di processi industriali; molti esempi ripropongono semplici tecnologie perché mirano a sottolineare l'importanza di saper valutare, all'interno di un processo produttivo, le aree potenzialmente più vantaggiose in termini di possibili risparmi energetici.

I principali campi in cui le pompe di calore sono impiegate coinvolgono processi per i quali, oltre ad introdurre un notevole risparmio energetico, consentono di ottenere altri benefici come miglioramenti nella qualità dei prodotti sottoposti alla lavorazione, aumenti della produzione nonché una maggiore affidabilità nell'esecuzione del processo stesso.

Alcuni dei campi in cui queste sono maggiormente utilizzate, che proporremo in questo capitolo, oltre naturalmente al condizionamento dell'aria e riscaldamento dell'acqua sanitaria, sono industrie di trasformazione di prodotti alimentari, soprattutto per quanto riguarda recupero di calore in caseifici e in impianti di fabbricazione di carta e cellulosa, processi in cui è coinvolta l'essiccazione in industrie alimentari e non, il trattamento di acque reflue e infine processi di distillazione e cristallizzazione.

Le applicazioni qui proposte sono studi sperimentali che risultano essere interessanti per un'applicazione futura in ogni campo; inutile sottolineare il fatto che ogni applicazione industriale è un caso a sé in quanto solo attraverso un accurato studio dei flussi energetici nel processo è possibile, compatibilmente con un'attenta analisi dei costi, trovare la posizione più consona per l'applicazione di ogni tecnologia. La scelta del tipo di pompa di calore va eseguita tenendo conto delle condizioni di funzionamento in cui essa si trova a lavorare.

La maggior parte degli impianti esistenti ha un ciclo di vita abbastanza lungo quindi al momento bisogna concentrarsi sul possibile recupero energetico in impianti già in funzione. Uno strumento indispensabile per poter analizzare i flussi di calore dispersi in un processo, nonché le aree critiche in cui questi potrebbero essere riutilizzati, è la Pinch Technology.

Nel primo paragrafo viene dato un breve accenno a questo modello di analisi per poi passare in rassegna i diversi casi esemplificativi.

3.1.1. Pinch Technology

In ambito industriale la scelta della sorgente termica da valorizzare tramite la pompa di calore non è sempre semplice come in ambito residenziale, dal momento che molto spesso vi sono numerose alternative tra cui scegliere, visti i numerosi flussi di calore che vengono emessi dal processo. La necessità, in questo contesto, di trovare l'esatto punto in cui collocare la pompa di calore affinché questa scelta possa essere tecnicamente ed economicamente valida, ha portato nel corso dell'ultimo decennio a sfruttare un insieme di metodi di analisi termodinamica, chiamati "Pinch Technology", al fine di mappare tutti i flussi di calore presenti nel processo, nonché le opportunità di scambio. Questo strumento di analisi, chiamato "pinch analysis", è stato utilizzato inizialmente per migliorare l'efficienza energetica di processi chimici fino ad essere esteso, grazie allo studio effettuato dall'IEA [16], a tutti i processi e le apparecchiature che svolgono la funzione di recupero di calore, come scambiatori, economizzatori ecc.

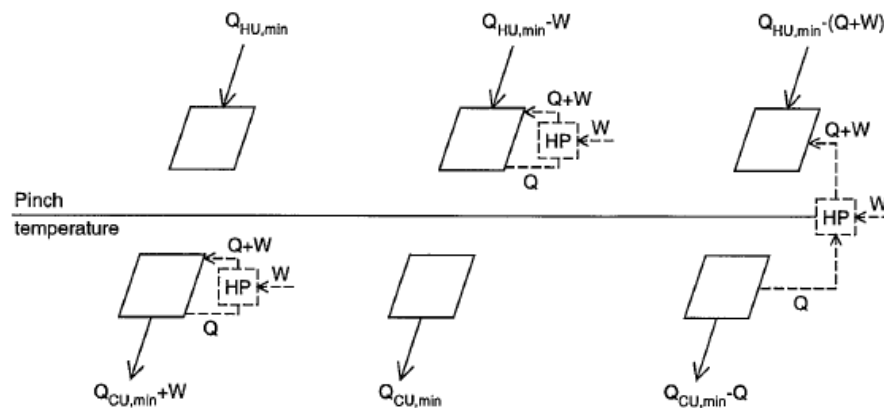


Figura 3.1: Posizionamento di una pompa di calore secondo pinch point

La "pinch analysis", come mostrato in figura 3.1, si basa essenzialmente sulla determinazione di una temperatura definita "pinch point" che divide l'insieme di flussi di calore, emessi dal processo industriale, in due categorie separate: una al di sopra e l'altra al di sotto di tale punto. I flussi che si trovano al di sopra di questo livello vengono definiti "flussi freddi" perché necessitano di una quantità di calore, la quale idealmente dovrà essere fornita dai flussi di processo definiti "caldi", presenti al di sotto del "pinch point", che presentano un eccesso di calore. Una volta stabilita questa suddivisione, la collocazione di una pompa di calore dovrà seguire i principi fondamentali, secondo cui l'evaporatore andrà sistemato dove vi sarà un eccesso di calore (al di sotto del "pinch point"); il condensatore al

contrario, dove vi è un deficit di calore quindi sopra il “pinch”. Idealmente quindi il buon posizionamento di una pompa di calore è a cavallo del “pinch point”.

Oltre a questa semplice analisi si sono sviluppati anche altri modelli per capire la distribuzione dei flussi caldi e freddi: la prima consiste in una rappresentazione grafica che sfrutta le “composite curves” (CC), come si vede in figura 3.2. Le due curve presenti nel diagramma temperatura-variazione di entalpia corrispondono ai due flussi caldo e freddo, ottenute aggiungendo ad ogni intervallo di temperatura il contenuto di calore dei due flussi. Dove queste curve si sovrappongono orizzontalmente vi può essere scambio di calore diretto, visto che la distanza verticalmente tra le due rappresenta la differenza di temperatura tra i due flussi all’interno dello scambiatore.

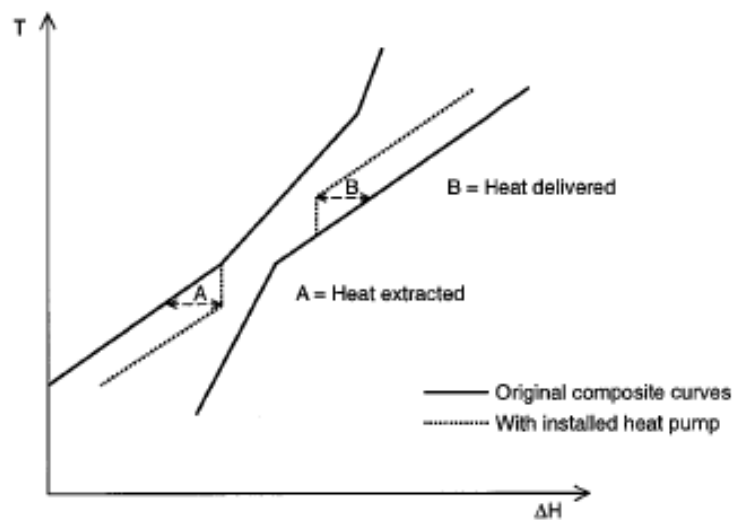


Figura 3.2: Composite curves

Dove le due curve non si sovrappongono è necessario fornire calore oppure un effetto di raffreddamento dall'esterno: in questa zona si andrà a posizionare la pompa di calore.

Un altro strumento di analisi consiste nelle “gran composite curves” (GCC) mostrate in figura 3.3 in un piano temperatura-carico termico, costruite invece calcolando per ogni temperatura il calore netto richiesto. In corrispondenza del “pinch point” la richiesta di calore netto è nulla, quindi la distanza tra la curva e l'asse verticale della temperatura è nulla.

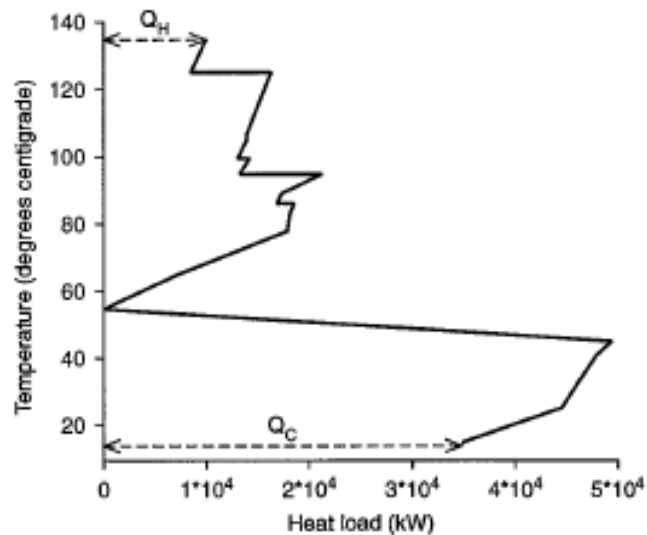


Figura 3.3: Esempio di una curva gran composito

Al di sopra di tale punto la distanza tra la curva e l'asse della temperatura rappresenta il calore netto richiesto e in corrispondenza della temperatura più alta raggiungibile troveremo l'ammontare di calore dell'utenza calda. Al di sotto invece la distanza in questione rappresenta il calore netto disponibile ad ogni livello di temperatura.

Tutte queste tecniche ed anche altre sviluppate negli ultimi anni, come le "advanced gran composite curves" [55], sono indispensabili per svolgere un'attenta analisi dei flussi per capire come posizionare la pompa di calore o la tecnologia di recupero scelta, in modo da massimizzare il recupero di calore all'interno dell'impianto. Bisogna però sottolineare il fatto che la pinch analysis non è l'unica tecnica utilizzata per riuscire ad apportare un miglioramento concreto nell'efficienza energetica dei processi. In molti studi, tra cui quelli presentati qui di seguito, si è preferito utilizzare un'analisi exergetica effettuata sui vari componenti del processo per capire i miglioramenti da apportare sulle singole parti.

3.2.Applicazioni nell'industria alimentare

All'interno della letteratura si trova un'ampia gamma di processi che risultano adatti all'applicazione della pompa di calore in ambito alimentare, come l'evaporazione, l'essiccazione, la sterilizzazione, la cottura, refrigerazione e lavaggio di impianti.

3.2.1.Processo di pastorizzazione del latte: metodi tradizionali e pompa di calore a confronto

All'interno di uno studio effettuato in un caseificio [56] viene analizzato l'impiego di una pompa di calore per la pastorizzazione del latte effettuando un confronto energetico con i metodi di pastorizzazione classica. La tecnologia analizzata consiste in una pompa di calore a compressione di vapore di tipo liquido-liquido integrata con un scambiatore di calore a piastra latte-latte utilizzato come economizzatore.

Prima di questo studio l'utilizzo delle pompe di calore nell'industria casearia era già stato indagato. Per esempio, in uno studio [57] si sono valutate le possibilità tecniche ed economiche di integrazione di una pompa di calore ad assorbimento in un impianto di latte in polvere, giungendo alla conclusione che in molti casi un sistema ad assorbimento ad alta temperatura per il recupero del calore è economicamente più conveniente rispetto all'applicazione di un sistema ad assorbimento che svolga la sola funzione di refrigerazione.

Vi sono applicazioni di pompe di calore in stati come Canada e Norvegia per quanto riguarda le latterie e le industrie casearie, invece in stati come Paesi Bassi e Stati Uniti le applicazioni si riducono alle industrie casearie. Il numero di queste applicazioni tuttavia è limitato nonostante siano confermati i dati riguardanti un potenziale recupero energetico per questi processi di produzione [16].

Il prototipo di pompa di calore utilizzato in questo impianto [56] è illustrato in figura 3.4 ed ha una capacità limitata essendo stato progettato appositamente. Come si può vedere il sistema è composto da due circuiti: un sistema in cui scorre il refrigerante R-114 ed uno in cui scorre il latte.

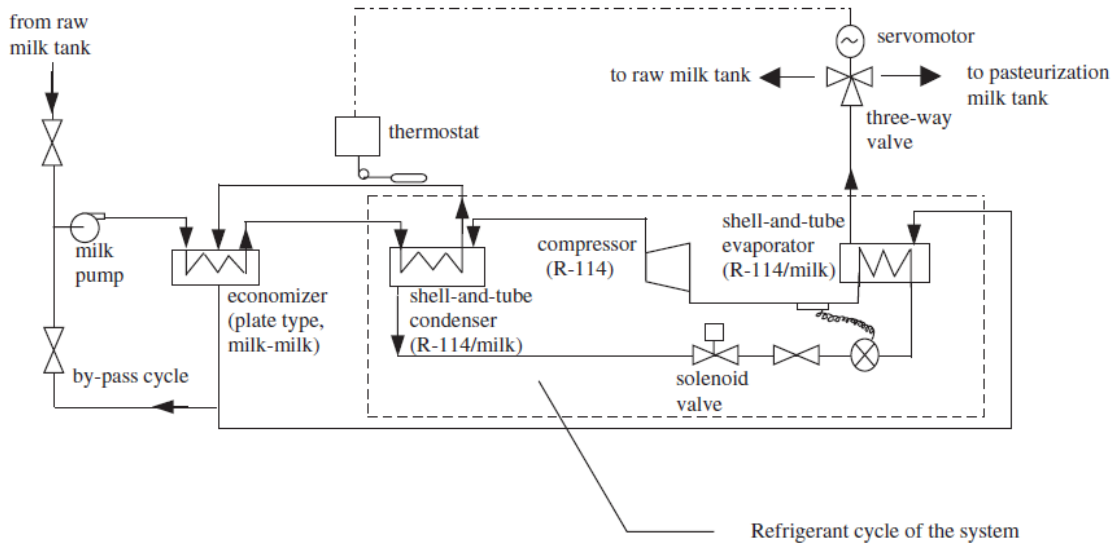


Figura 3.4: Schema dell'impianto di pastorizzazione

Il latte crudo inizialmente è contenuto in un serbatoio (riempito a mano), da cui poi è inviato tramite una pompa all'economizzatore, qui subisce un preriscaldamento da parte del latte più caldo proveniente dal condensatore. Contemporaneamente il latte caldo è pre-raffreddato nell'economizzatore grazie al latte crudo, prima di essere inviato all'evaporatore.

Una volta che il latte ha raggiunto la temperatura di pastorizzazione (che si aggira intorno ai 72 °C) nel condensatore, è inviato all'evaporatore per essere raffreddato fino alla temperatura di coagulazione di 32°C. Nel caso in cui la temperatura del flusso di latte caldo giunto nel condensatore sia inferiore a quella di pastorizzazione, questo verrà pompato nel serbatoio del latte crudo al posto di essere inviato nel serbatoio del latte pastorizzato, affinché sia nuovamente sottoposto al processo di pastorizzazione. Quando tale temperatura sarà stata raggiunta il latte potrà essere inviato al serbatoio di latte pastorizzato.

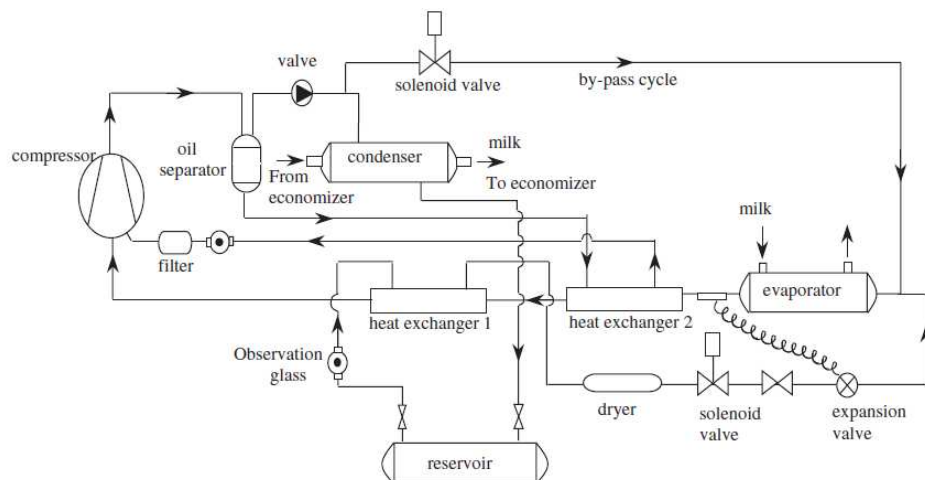


Figura 3.5: Pompa di calore

La pompa di calore a semplice compressione utilizzata in questo impianto utilizza il refrigerante R-114 ed è composta da: un compressore, un condensatore e un evaporatore entrambi a fascio tubiero, una valvola di espansione, un serbatoio, due scambiatori di calore e alcuni dispositivi di misura ausiliari, come è meglio evidenziato in figura 3.5.

Il COP medio di questa pompa è risultato essere 2,7 mentre quello del sistema circa pari a 2,4.

Bisogna notare che l'utilizzo di una pompa di calore rispetto ai sistemi tradizionali comporta un risparmio notevole, circa il 66% in termini di energia primaria, visto che il funzionamento di questa richiederà circa 182 kJ/kg rispetto ai 346 kJ/kg necessari per un pastorizzatore a piastra o i 509 kJ/kg per una caldaia a doppio rivestimento; il secondo sistema consuma quindi circa 1,9 volte in più rispetto alla pompa di calore mentre il terzo circa 2,8 volte.

3.2.1.1. Prestazioni di una pompa di calore ad assorbimento

Nello studio [56] viene presentato anche un confronto tra i consumi specifici di:

- un impianto caseario tradizionale fig.3.6 cioè dotato di un generatore di vapore per l'apporto di calore e una macchina elettrica a compressione che fornisca l'effetto frigorifero necessario.

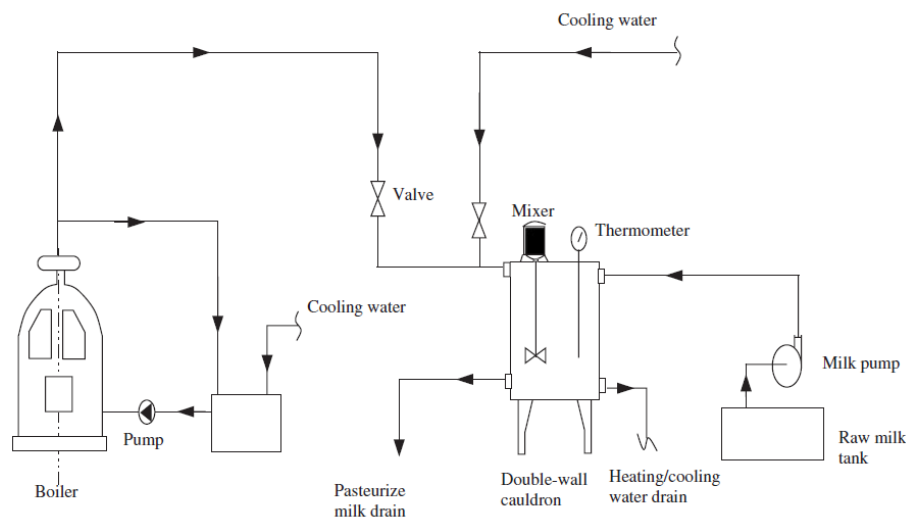


Figura 3.6: Impianto di pastorizzazione tradizionale con generatore di vapore

- una pompa di calore ad assorbimento (AHP) che va ad inserirsi nell'impianto esistente, il cui evaporatore prende il posto del condensatore dell'impianto di raffreddamento, raffreddato ad acqua; solo una parte del calore apportato dal vapore della caldaia viene fornito dalla pompa di calore;

- una pompa di calore a riassorbimento (RHP) che si sostituisce l'impianto tradizionale formato da un generatore di vapore e la macchina di raffreddamento; questo impianto comprende una AHP a cui è stato aggiunto un compressore che ha il compito di innalzare la pressione dell'evaporatore al livello di quella dell'assorbitore.

Energy consumption specifications	Existing plant		Retrofit AHP		New plant RHP	
	Input	Output	Input	Output	Input	Output
Steam generator ($\text{MNm}^3 \text{a}^{-1}$)	2.18	51.3	1.70	40.0		
Cooling machine (TWha^{-1})	2.08	6.0	2.08	6.0	2.08	6.0
Cooling machine heat delivery (TJ a^{-1})				11.3		
Absorption heat pump (TJ a^{-1})			38.8	50.1		
Resorption heat pump ($\text{MNm}^3 \text{a}^{-1}$)					1.70	51.3
Total primary energy (TJ a^{-1})	101		83.7		83.7	
Specific energy consumption (SEC) (GJt^{-1})	1.01		0.84		0.84	

Tabella 3.1: Confronto tra impianti caseari differenti presenti nel settore alimentare (dati riferiti al consumo di 100.000 t/a di latte) [58]

La tabella 3.1 mostra il confronto tra queste tre configurazioni: come si vede dall'ultima riga, che identifica il consumo di energia specifica, entrambe le configurazioni che coinvolgono una pompa di calore ad assorbimento comportano una riduzione dei consumi energetici specifici (si passa da 1,01 GJ/t a 0,84 GJ/t).

Questi risultati mostrano quindi che nel campo delle industrie casearie l'utilizzo di un sistema ad assorbimento è più vantaggioso rispetto ai sistemi tradizionali.

3.2.1.2. Condizioni operative di una pompa di calore a semplice compressione

Un altro impianto impiegato per la pastorizzazione e rappresentato in figura 3.7 è stato studiato in [59]; questo impianto si avvale di uno scambiatore rigenerativo, un riscaldatore ausiliario e una pompa di calore a semplice compressione. L'analisi teorica effettuata riguarda i valori ottimali per le temperature che il latte contenuto nel ciclo principale deve raggiungere.

Come dati di progetto si hanno:

- temperatura di progetto dell'evaporatore dipendente dalla temperatura di uscita del latte $T_E = 270.15 \text{ K} = -3 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura di condensazione $T_C = 343.15 \text{ K} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura di progetto del latte riscaldato $T_{m,hot} = 345.15 \text{ K} = 72 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura di ingresso del latte $T_{m,in} = 288.15 \text{ K} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura di progetto del latte in uscita $T_{m,out} = 276.15 \text{ K} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$

- massa di latte che scorre nell'impianto $m = 1,8 \text{ kg/s}$

In questa configurazione si è calcolato che le temperature per ottenere il massimo guadagno, utilizzando uno scambiatore di calore rigenerativo e contemporaneamente ridurre i costi, sono:

- temperatura del latte all'entrata del condensatore $T_1=66,6 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura del latte all'uscita del condensatore prima di entrare nel riscaldatore ausiliario $T_2=67,4 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura del latte all'entrata nell'evaporatore $T_3=20,3 \text{ }^\circ\text{C}$

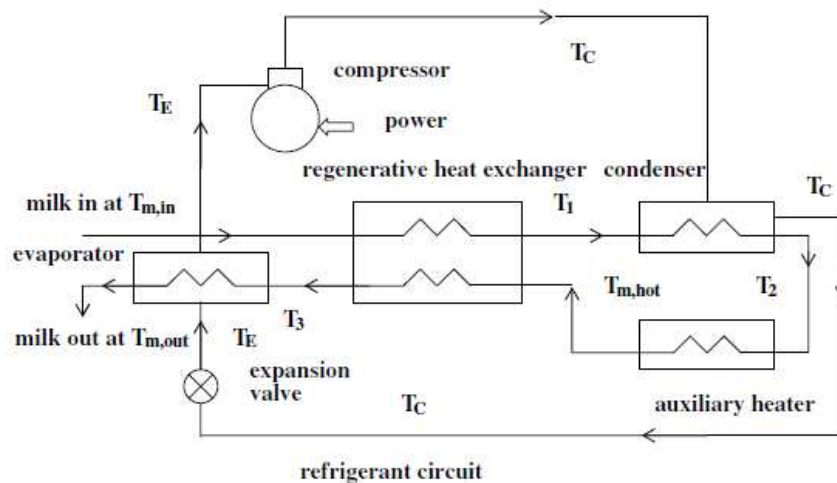


Figura 3.7: Schema di una pompa di calore all'interno di un sistema di pastorizzazione

Il COP del sistema che lavora in queste condizioni si aggira intorno a 1,85; la potenza richiesta dal compressore è circa 66 kW, la capacità di raffreddamento dell'evaporatore è 122 kW e la capacità del riscaldatore ausiliario invece 32 kW.

Le informazioni riportate in questo studio possono risultare utili per le future progettazioni di pompe di calore in latterie al fine di ottenere un corretto dimensionamento del sistema.

3.2.2. Recupero di calore in un caseificio per il riscaldamento dell'edificio

Per quanto riguarda il recupero di calore prodotto da processi di trasformazione alimentare in vista di un suo riutilizzo non direttamente nel processo produttivo, ma nel sistema di riscaldamento dell'impresa, un esempio viene fornito nello studio [60] riguardante recupero di calore all'interno di un'industria ucraina di produzione di formaggio.

Il sistema di refrigerazione dell'industria consiste in una pompa di calore a semplice compressione di ammoniaca, tuttavia, nella configurazione originale, l'energia contenuta

nell'ammoniaca surriscaldata dopo la compressione non viene utilizzata bensì espulsa attraverso le torri di raffreddamento.

Le proposte fatte in questo studio riguardano il recupero di questo calore di scarto attraverso due diverse configurazioni dell'impianto: la prima mostra l'aggiunta di una rete di scambiatori di calore compatti scelti secondo quanto è stato descritto in [61], compatibilmente con le esigenze del processo; la seconda invece introduce nell'impianto un nuovo compressore in modo da aumentare la temperatura di condensazione, per riuscire ad aumentare la portata di acqua calda sanitaria erogabile per le esigenze dell'impresa.

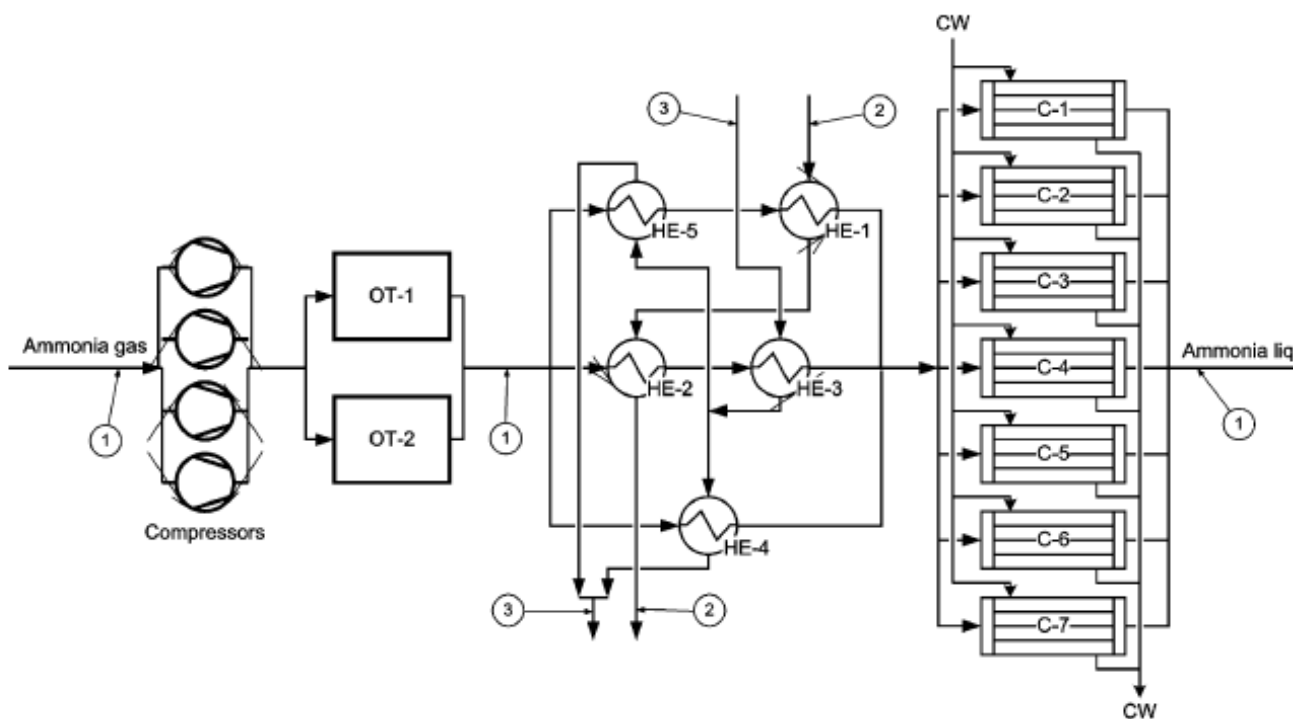


Figura 3.8: Sistema di refrigerazione in presenza di soli scambiatori di calore compatti

Il calore recuperato nella prima configurazione di fig. 3.8, progettata secondo i dati ottenuti attraverso l'analisi delle curve composite, sarà di circa 0,75 MW. Tale potenza verrà spesa in parte per il riscaldamento dell'acqua di processo nel demineralizzatore (0,47 MW), mentre i rimanenti 0,28 MW servirà per le esigenze di riscaldamento dell'acqua utilizzata dalle utenze.

La seconda configurazione mostrata in fig. 3.9 presenta un sistema di scambiatori di calore compatti con l'aggiunta di un compressore, il tutto permette di avere un'area di scambio di circa 69 m², circa 5 m² in più rispetto la precedente configurazione. L'ulteriore compressione inoltre consente di aumentare il recupero di energia termica del sistema, ma

implica una spesa maggiore di energia elettrica, circa 60 kW, per la compressione dell'ammoniaca. In questo caso il recupero è aumentato a 930 kW, valore assai maggiore se paragonato con quello relativo al caso privo di compressori aggiuntivi.

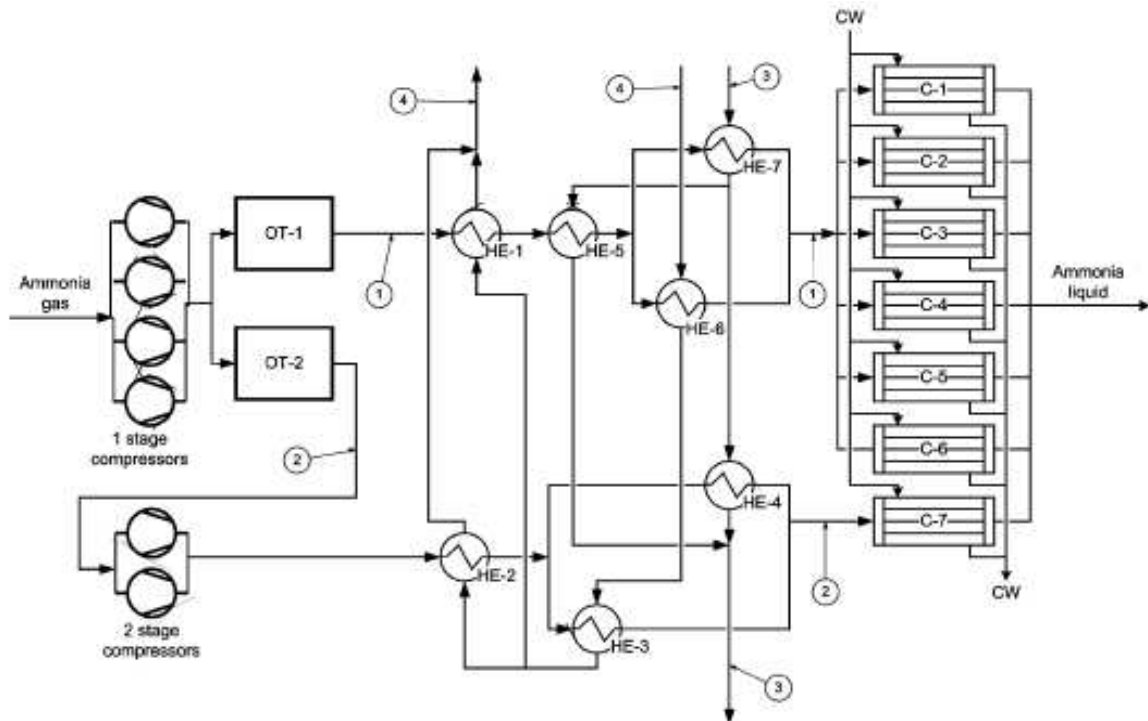


Figura 3.9: Diagramma della rete di scambiatori con i compressori aggiuntivi (OT CW- acqua raffreddata, C1-C7-condensatori, HE1-HE7-scambiatori di calore)

In entrambi i casi il potenziale risparmio energetico è piuttosto grande, quindi un'applicazione di tali risultati alle industrie che fanno uso di impianti di refrigerazione ad ammoniaca per processi alimentari (per esempio in stati dell'Est quali Bielorussia, Kazakistan e Ucraina) potrebbe apportare una riduzione dei costi di funzionamento a queste stesse imprese, compatibilmente con le caratteristiche delle stesse.

3.2.3. Sistemi di essiccazione per prodotti alimentari

L'essiccazione è un processo ad alta intensità energetica che consuma il 10-15% di tutta la domanda di energia industriale [62]; al fine di ridurre il consumo di energia è necessario selezionare un efficiente sistema di riscaldamento e la pompa di calore si propone per l'appunto come una tecnologia efficiente e rispettosa dell'ambiente, grazie al suo basso consumo di energia. Inoltre, oltre alla funzione di riscaldamento dell'aria di essiccazione, permette un maggior controllo sulle condizioni di asciugatura grazie alla possibilità di utilizzare l'evaporatore del sistema come deumidificatore.

3.2.3.1. Pompa di calore per l'essiccazione di erbe aromatiche

Vi sono molti vantaggi per l'utilizzo di essiccatori a pompa di calore piuttosto che metodi di asciugatura tradizionali: uno di questi consiste nel fatto che i primi operano in circuito chiuso quindi non risentono delle condizioni ambientali, come il livello di umidità dell'aria, aspetto che influisce molto sull'utilizzo di metodi di essiccazione convenzionali.

Inoltre un'essiccazione ad alta temperatura compromette la qualità del materiale fino a renderne addirittura impossibile l'uso.

Tutti questi aspetti nel caso dell'essiccazione di colture speciali, come il ginseng, l'echinacea ed altre erbe, sono particolarmente accentuati poiché devono essere essiccate a bassa temperatura (intorno ai 30-45 °C) per ottenere un prodotto di qualità. Per questo motivo, come già detto nel capitolo precedente, numerosi studi hanno analizzato tecnologie sempre più adatte a svolgere questo tipo di processi; una possibile configurazione viene presentata all'interno di un articolo [63] in cui si propone l'utilizzo di una pompa di calore a compressione di vapore accoppiata con un essiccatore a letto continuo con flusso trasversale (figura 3.10).

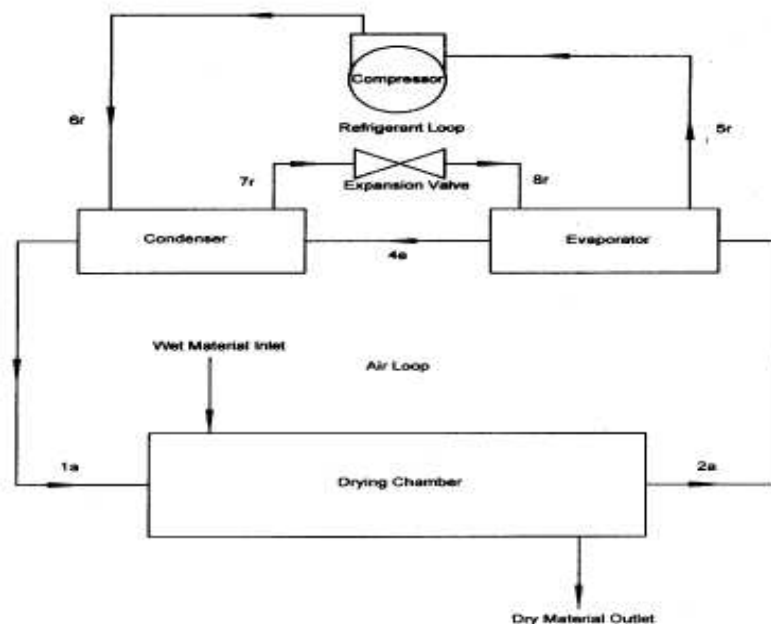


Figura 3.10: Schema standard di un essiccatore a pompa di calore [63]

Lo scopo di una pompa di calore in un essiccatore è quello di fornire aria calda per la camera di essiccazione e deumidificare l'aria di scarico proveniente da questa.

Dalla figura 3.10 vediamo che il sistema è derivato dalla combinazione di due sottosistemi: una pompa di calore in cui scorre, come refrigerante, del tetrafluoroetano 134A (un HFC) e

l'essiccatore. Per realizzare le condizioni di asciugatura desiderate è importante che la pompa di calore sia abbinata correttamente con l'essiccatore.

Attraverso la sperimentazione di un prototipo del sistema descritto in questo studio, formato però da un essiccatore ad armadio e due umidificatori per uso domestico che come condensatore/evaporatore presentavano delle bobine, si è dimostrato che il sistema pompa di calore fornisce un recupero di calore sensibile e latente (circa il 50% in più rispetto altri sistemi) e riesce a controllare il range di temperatura in cui si svolge il processo in modo da contribuire a mantenere la qualità del prodotto essiccato. Inoltre si è sperimentato che l'essiccazione continua è molto più efficace rispetto quella a lotti.

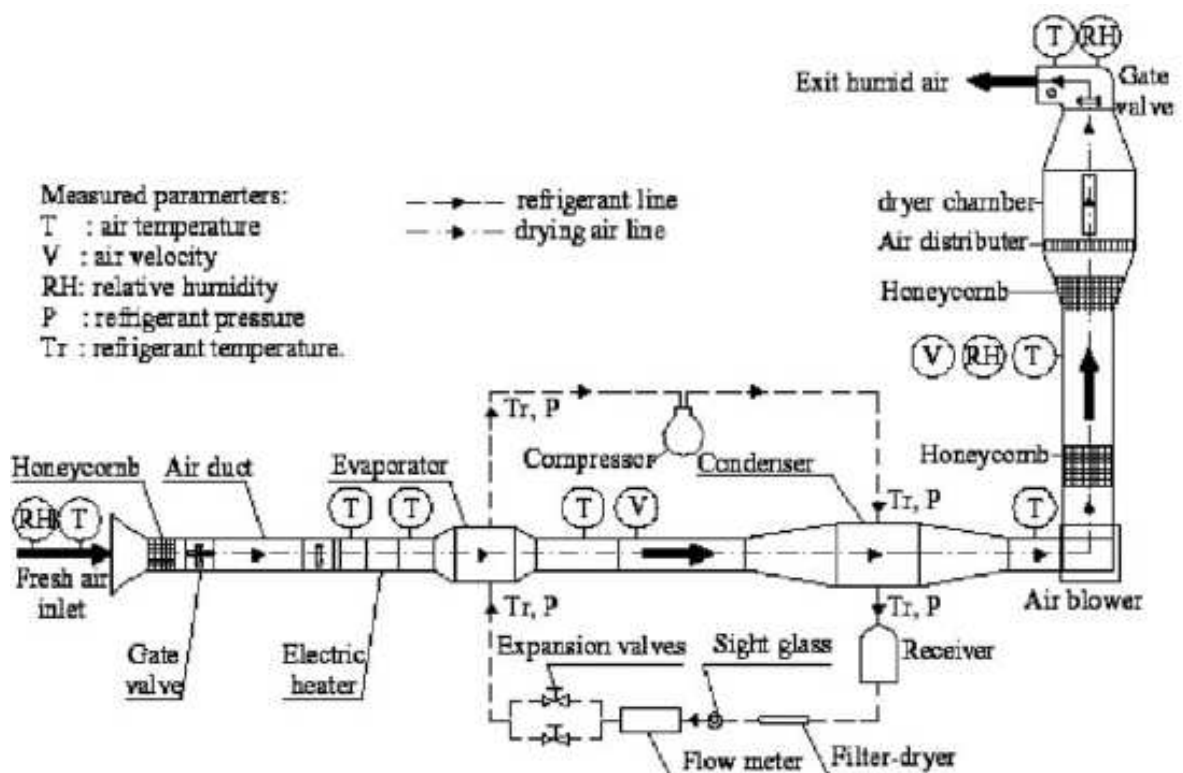


Figura 3.11: Essiccatore assistito da pompa di calore

Per quanto riguarda il trattamento di essiccazione rivolto ad erbe aromatiche meno pregiate quali la malva, il coriandolo, il timo ecc [62], in cui il sistema più utilizzato coinvolge essiccatori solari che rischiano di rovinarne la qualità oltre a richiedere un tempo di qualche settimana per la completa essiccazione, l'introduzione della pompa di calore ha permesso di migliorare le condizioni operative, nonché ridurre i tempi di produzione. Gli ottimi risultati ottenuti tramite l'utilizzo di un essiccatore assistito da pompa di calore aria-aria a compressione di vapore che utilizza come refrigerante R-134, vedi figura 3.11, sottolineano la possibilità di usare questa tecnologia a livello industriale.

Nella letteratura, oltre all'utilizzo di pompe di calore a compressione di vapore, si possono ritrovare casi di essiccazione di erbe aromatiche, come foglie di menta, anche attraverso

macchine geotermiche (GSHP, Ground Source Heat Pump) associate sempre ad un essiccatore. Questo prototipo è stato costruito dal Solar Energy Institute, Ege University, Izmir, Turchia per lo studio [64]; di seguito in figura 3.12 proponiamo lo schema costruttivo.

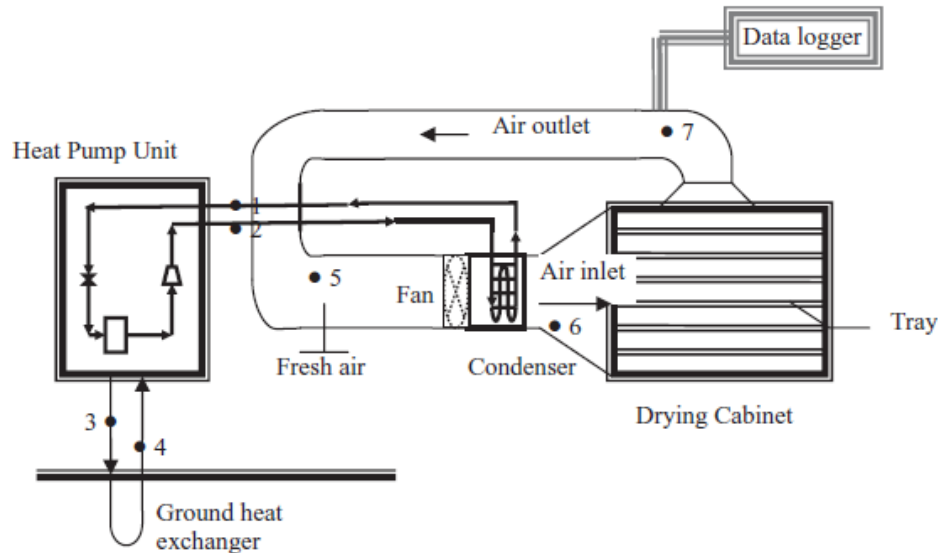


Figura 3.12: Pompa di calore geotermica accoppiata ad un essiccatore

Il sistema è composto da tre circuiti separati:

- Il circuito collegato al suolo che può essere un circuito percorso da salamoia o una soluzione di acqua mista ad antigelo
- Il circuito frigorifero oppure un circuito a pompa di calore reversibile percorso da R-22
- la cabina di essiccazione che è un circuito alimentato ad aria

L'R-22 come si vede in figura è vaporizzato a bassa pressione nell'evaporatore grazie al calore proveniente dal suolo ottenuto tramite uno scambiatore di calore, il resto del ciclo si svolge come in una normale pompa di calore.

Il basso consumo energetico, nonché l'elevata efficienza energetica (circa 97% per una temperatura di essiccazione di 50°C) rendono il sistema molto adatto al processo di essiccazione considerato.

Infine, un'ipotesi da non sottovalutare proposta nell'ambito di uno studio sull'essiccazione di mele [65], consiste nel far collaborare un sistema di essiccazione a pompa di calore e un sistema di essiccazione solare in modo da riuscire ad aumentare l'efficienza del processo riducendo i tempi di lavorazione.

3.2.4. Trattamento di acque reflue in un frantoio

Dopo la produzione dell'olio d'oliva, le acque reflue che sono inquinate da agenti contaminanti devono subire un processo di distillazione prima di essere scaricate o riutilizzate per l'irrigazione. In questo contesto, l'applicazione della pompa di calore per il processo di distillazione può essere molto utile; tuttavia, visto che i frantoi in genere sono maggiormente diffusi in regioni in cui il clima è abbastanza caldo, può risultare molto interessante poter dotare in questi impianti un dispositivo di refrigerazione. L'effetto di raffreddamento è principalmente necessario per prevenire il deterioramento termico dell'olio di oliva durante il processo di separazione che deve avvenire ad una temperatura compresa tra i 16 e 28°C.

All'interno dello studio [66], riguardante un'azienda di produzione dell'olio d'oliva, viene per questi motivi considerata l'ipotesi di utilizzare una pompa di calore ad adsorbimento con rivestimento interno di zeolite per trattare le acque reflue del frantoio, le quali rappresentano una minaccia per l'ambiente a causa della loro elevata capacità inquinante ed inoltre consentire di fornire un effetto di raffreddamento, utile per evitare il deterioramento termico dell'olio d'oliva.

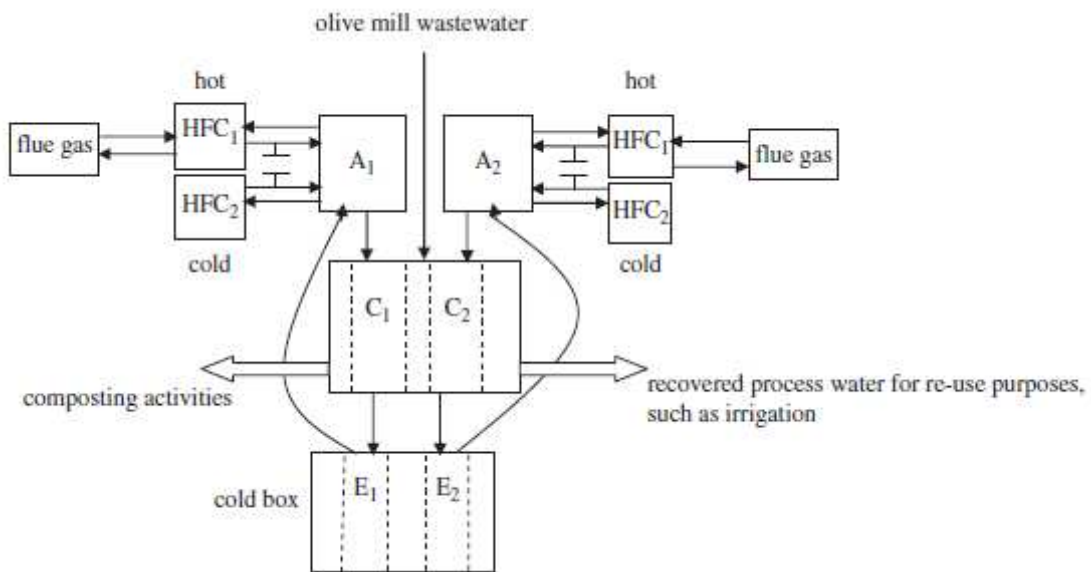


Figura 3.13: Diagramma del trattamento di depurazione (A assorbitore, HFC contenitore del fluido di scambio termico, E evaporatore, C condensatore, D unità di distillazione)

La pompa di calore ad adsorbimento mostrata in figura 3.13 è formata da due assorbitori che ricevono il calore di scarto, in modo da fornire l'effetto di raffreddamento e riscaldamento negli evaporatori e condensatori ad essi collegati.

La presenza di due assorbitori è utile principalmente per ottenere un funzionamento continuo del sistema: entrambi sono riscaldati con l'aiuto del calore residuo a disposizione nel frantoio, come i gas di scarico, in modo d'aumentare la temperatura del fluido contenuto nel serbatoio intorno ai 150°C; il raffreddamento in seguito dell'adsorbitore si ottiene

utilizzando l'acqua a 30°C contenuta nel secondo serbatoio. La temperatura dell'evaporatore si trova tra i 5- 30°C e il condensatore tra 30-80°C. Le acque di scarto poi devono essere trattate per un certo periodo nell'unità di distillazione D in cui sono stati posizionati i due condensatori. La temperatura di questa unità dipende da quella scelta per il condensatore, tuttavia corrisponde a 60 o 80°C poiché sono le temperature più adeguate per ridurre la quantità di acqua negli scarti del processo.

I valori del COP di questa pompa variano a seconda della variazione di temperatura tra evaporatore e condensatore e dello spessore di zeolite. Più precisamente, un aumento dello spessore dello strato di zeolite porta ad un aumento del COP, nonché ad una riduzione della differenza di temperatura evaporatore/condensatore.

Le temperature dei due organi dovrebbero essere selezionate con cura; infatti, se il sistema necessita di riscaldamento/raffreddamento, le temperature di processo nei due organi devono essere molto vicine in modo tale da aumentare il COP del sistema.

Il rivestimento in zeolite di questa pompa migliora il rendimento termodinamico e per un rivestimento di uno spessore 100 µm si riesce a trovare sperimentalmente dei valori di COP tra 0,09 e 0,11; anche se il coefficiente è così basso a causa dell'elevata quantità di metallo utilizzata nel sistema, questo tipo di sistema risulta essere molto efficace all'interno di impianti di produzione dell'olio d'oliva.

3.3. Impianti di produzione di legno e cellulosa

I processi di produzione di questi due materiali coinvolgono sistemi di essiccazione che coinvolgono anche sistemi a pompa di calore ad assorbimento.

3.3.1. Essiccazione del legno

Attualmente l'essiccazione dei trucioli di legno è un processo lungo che richiede aree di stoccaggio di grandi dimensioni; di solito è realizzato secondo metodi tradizionali. Il più semplice consiste nel lasciare che la legna si secchi naturalmente nella foresta per un paio di mesi dopo che è stata tagliata. Un secondo metodo, che è più largamente adottato, consiste nel trasporto e la conservazione dei trucioli di legno umido in un capannone, o all'esterno, per un periodo che va dai 3-6 mesi. Entrambi questi metodi richiedono una notevole quantità di tempo e comportano costi di trasporto e di stoccaggio che possono essere tutt'altro che sottovalutabili.

L'introduzione in questo settore produttivo di sistemi di essiccazione che permettano di velocizzare il processo e migliorare la qualità del prodotto è stata proposta in vari studi che qui presenteremo, considerando sempre essiccatori che siano accoppiati a pompe di calore ad assorbimento.

Nel caso dell'essiccazione di trucioli di legno come descritto nello studio [67] vengono confrontati i risultati di due tipi di pompa di calore ad assorbimento associati ad un essiccatore che si basa su un processo di convezione forzata.

Il primo caso presentato in figura 3.14 è composto da una pompa di calore a singolo stadio che utilizza come fluidi di lavoro:

- Acqua e bromuro di litio con l'aggiunta di sodio organico e sali di potassio (formiato, acetato, lattato) per ridurre i problemi di corrosione e le limitazioni sulla temperatura connesse a questa coppia, mentre glicole e soluzioni a base di metanolo sono consigliate come aggiunta se ci si trova a lavorare con temperature inferiori a 0°C;
- Ammoniaca e acqua con l'aggiunta di idrossido di sodio al fluido assorbente per aumentare l'intervallo di temperatura.

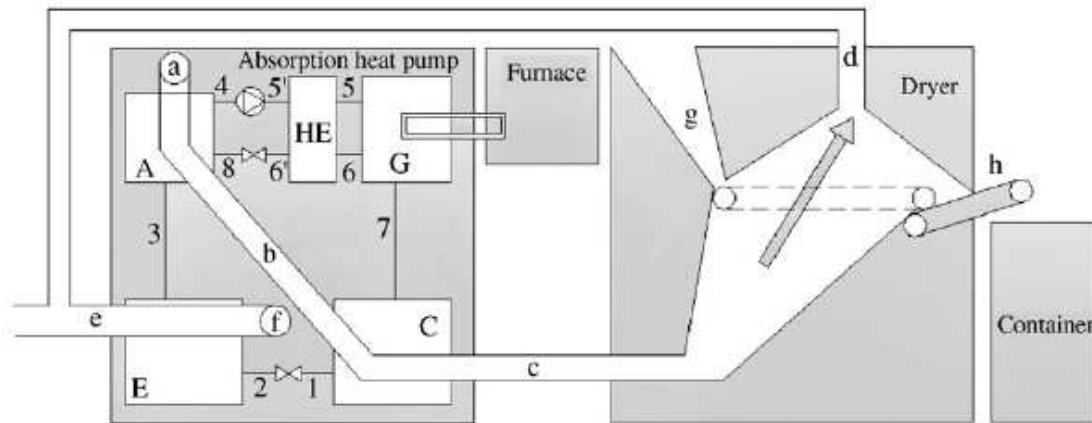


Figura 3.14: Schema di un essiccatore accoppiato ad una pompa di calore ad assorbimento a singolo stadio

La funzione di questa pompa inserita nell'impianto è fornire l'energia termica necessaria all'aria utilizzata per l'essiccazione in modo da aumentare la sua temperatura da quella ambiente a quella d'ingresso per l'essiccatore. La presenza di uno scambiatore di calore (HE) nel sistema, installato tra il generatore e l'assorbitore, permette di ridurre la quantità di energia richiesta dal generatore. Il vapore ad alta pressione proveniente dal generatore (G) circola nel condensatore, libera il calore necessario per preparare l'aria che verrà immessa nell'essiccatore, inoltre l'energia necessaria per il processo di evaporazione può essere fornita dall'aria in uscita dall'essiccatore, la quale verrà raffreddata e deumidificata.

I trucioli sono posti su un nastro trasportatore all'interno dell'essiccatore che viene attraversato dall'aria riscaldata proveniente dal condensatore C.

I risultati della sperimentazione mostrano che questo tipo di sistema è adatto se la temperatura dell'aria, che svolge l'opera di essiccazione, è inferiore ai 60°C.

Il COP di questo sistema è intorno a 1,70.

Per temperature superiori a questa è necessario utilizzare una pompa di calore ad assorbimento a doppio stadio (figura 3.15) in cui è presente un solo evaporatore a bassa pressione, un condensatore a pressione intermedia, mentre vi sono due assorbitori e due generatori che ricevono calore entrambi dalla fornace alimentata con gli scarti delle lavorazioni, come nel primo caso evidenziato. La temperatura che può raggiungere l'aria di essiccazione con questo impianto si avvicina ai 100°C; questo perché la temperatura di condensazione del refrigerante che circola in questo impianto è piuttosto alta, il che favorisce il riscaldamento dell'aria prima pre-riscaldata grazie al calore proveniente dai due assorbitori e poi dal condensatore ad alta pressione.

Il COP di questo sistema si aggira intorno al valore 1,34, anche se, per effetto delle condizioni reali in cui si trova ad operare, sarà inferiore; nonostante ciò, è necessario che rimanga superiore a 1, affinché l'accoppiamento di una pompa di calore ad una fornace sia

più efficiente rispetto l'utilizzo singolo di una fornace. In un caso di questo tipo, per avere l'aria ad una temperatura di 100°C all'entrata dell'essiccatore la fornace a legna deve raggiungere una capacità di riscaldamento dei due generatori ad una temperatura di circa 153°C.

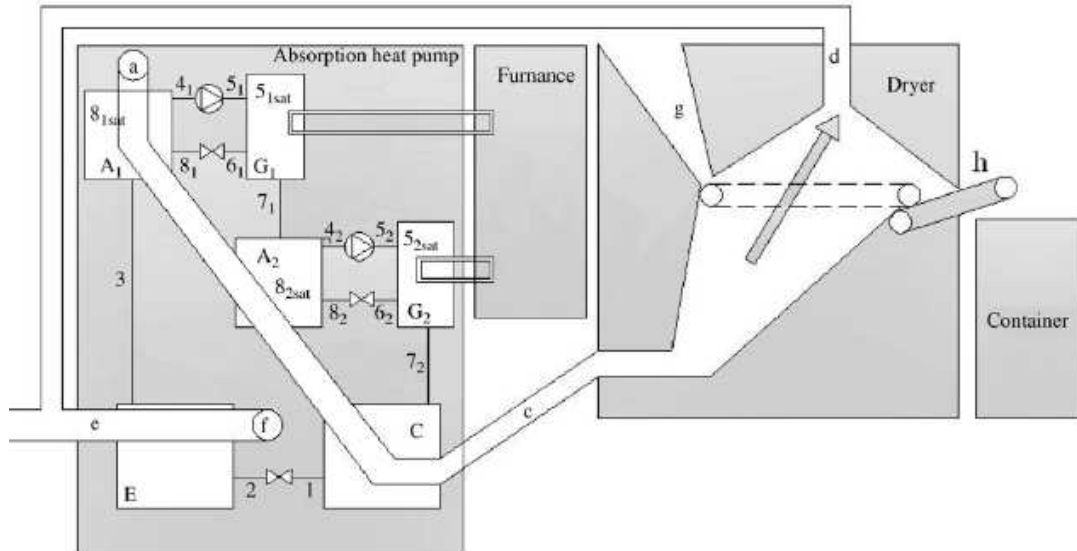


Figura 3.15: Schema di un essiccatore accoppiato ad una pompa di calore a doppio stadio di assorbimento

3.3.2. Produzione di carta e cellulosa

A partire da un impianto di produzione di carta e cellulosa mostrato in figura 3.16 vi sono stati diversi studi [68-71] che hanno proposto nuove configurazioni, principalmente tramite l'inserimento di pompe di calore ad assorbimento e trasformatori di calore in differenti parti dell'impianto al fine di recuperare il calore di scarto.

Queste proposte di integrazione sono state formulate e implementate sulla base dei dati ottenuti tramite la Pinch Analysis.

Le proposte analizzate qui di seguito quindi sono strettamente correlate con l'impianto analizzato visto l'utilizzo dei dati di processo; tuttavia forniscono un buon mezzo per capire le zone critiche del processo su cui si potrà intervenire; di solito il pinch point si aggira su una temperatura tra i 50 e gli 80°C.

Nel processo studiato, c'è una grande quantità di energia a bassa temperatura, che ha il potenziale per essere recuperata. In base alla configurazione attuale, gran parte di questa energia è sprecata: l'impianto di sbiancaggio è la zona che ha il maggior potenziale da poter sfruttare.

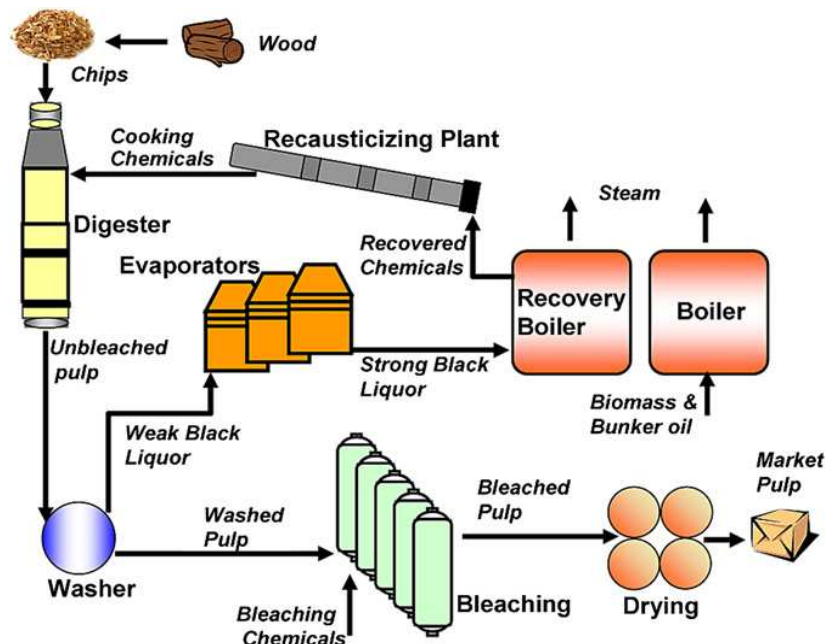


Figura 3.16: Processo produttivo della cellulosa [68]

La prima configurazione proposta (figura 3.17) inserisce una pompa di calore ad assorbimento a singolo stadio con doppio livello di temperatura che utilizza come coppia di fluidi di lavoro acqua e bromuro di litio [68]. Questa pompa viene utilizzata nella zona di candeggio per la refrigerazione di acqua che verrà impiegata nella produzione di biossido di cloro, sfruttando il calore al di sotto del pinch point che può essere elevato al di sopra di tale punto. L'acqua refrigerata viene prodotta nel secondo evaporatore grazie al vapore proveniente dal generatore. Il condensatore e l'assorbitore forniscono energia al di sopra del pinch point, energia che verrà utilizzata per innalzare la temperatura dell'acqua calda della zona di candeggio e dell'evaporatore ed inoltre per l'acqua pulita della macchina di lavorazione della polpa. La riduzione del consumo di vapore è di 3,6 MW inoltre vi è un risparmio rispetto allo stato corrente di 0,26 MW di elettricità.

Altre opzioni sono state proposte per il raffreddamento dell'acqua per l'impianto di candeggio [69]: quella attualmente presente nell'impianto coinvolge una pompa di calore commerciale a compressione collegata ad un eiettore di vapore alimentato dal vapore di ciclo; una proposta successiva inseriva al posto dell'eiettore una pompa di calore a doppio effetto che utilizzava acqua- bromuro di litio con un COP di refrigerazione pari a 1,25.

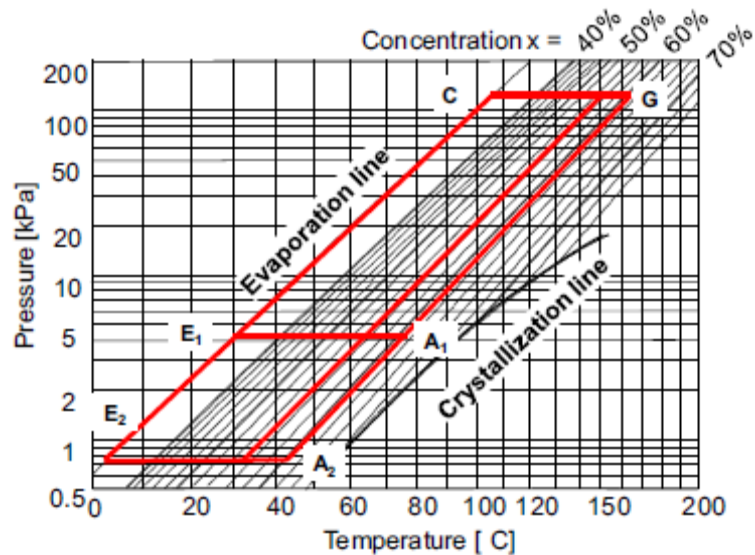


Figura 3.17: Ciclo pompa di calore a doppio stadio di assorbimento [68]

Una successiva proposta applicabile in questa industria [70] consiste nell'inserire una unità di rigenerazione nella sezione di concentrazione del fluido di delignificazione esausto; questo viene bruciato per utilizzare il suo potenziale termico e poter recuperare da questo i reagenti che si sono rigenerati. Il sistema è composto come in figura 3.18 da una turbina azionata dal vapore ad alta pressione, un generatore di calore e una pompa di calore ad assorbimento che è alimentata da parte del vapore in uscita dalla turbina.

Il calore utile è rilasciato dalla pompa di calore in corrispondenza del suo condensatore ed assorbitore, questa quantità è superiore a quella che può essere prodotta dal vapore in uscita direttamente dalla turbina.

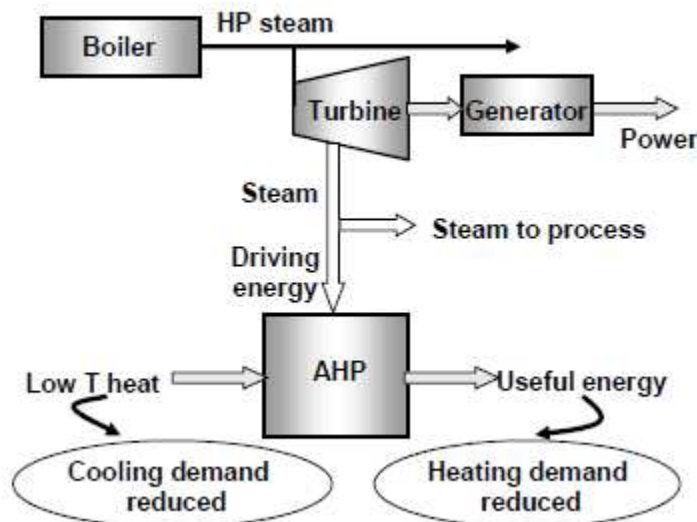


Figura 3.18: Schema di una turbina collegata ad una pompa di calore ad assorbimento

La pompa di calore ad assorbimento a singolo effetto alimentata a acqua-bromuro di litio, all'interno della sezione di concentrazione in figura 3.19, si posizionerà in modo da recuperare calore del vapore che passa dall'evaporatore 1 verso il condensatore 1; questo sarà la fonte di calore a bassa temperatura. Il flusso di liquido esausto che dal pre-evaporatore passa nell'evaporatore 2 corrisponderà invece alla zona di dissipazione del calore. Il COP ottenibile per questa pompa è 1,55; l'unità di rigenerazione così posizionata riduce la necessità di vapore e di raffreddamento di 11 MW, nonché produce 2,2 MW di elettricità.

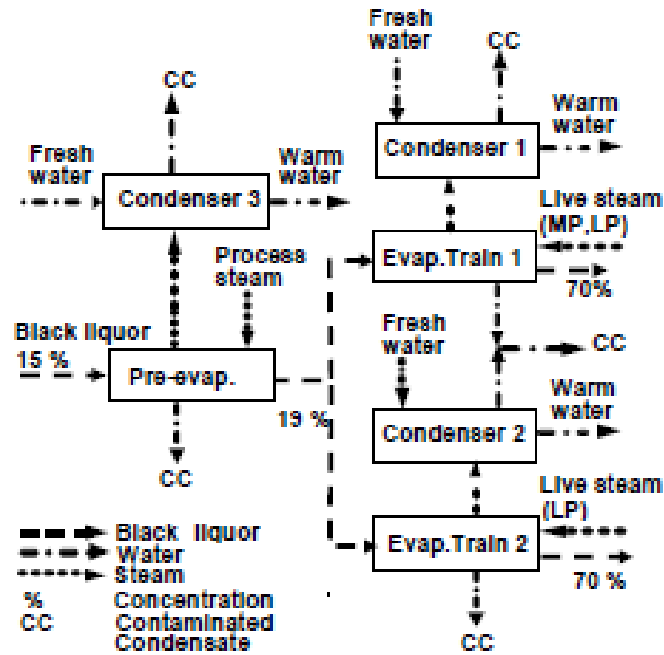


Figura 3.19: Diagramma della sezione di concentrazione

Le applicazioni della pompa di calore ad assorbimento in questo settore sono tante come è stato affermato nello studio [71], a questo riguardo le operazioni che queste svolgono possono essere:

- Innalzamento del calore al di sopra del pinch point;
- Utilizzo di un trasformatore di calore per innalzare la temperatura a quella di processo;
- Produzione di energia, calore ed effetto frigorifero negli impianti di trigenerazione;
- Utilizzo di AHP per il riscaldamento-condizionamento di distretti, attraverso la cessione di vapore surriscaldato da parte dell'azienda che può consentire maggiori entrate economiche (figura 3.20).

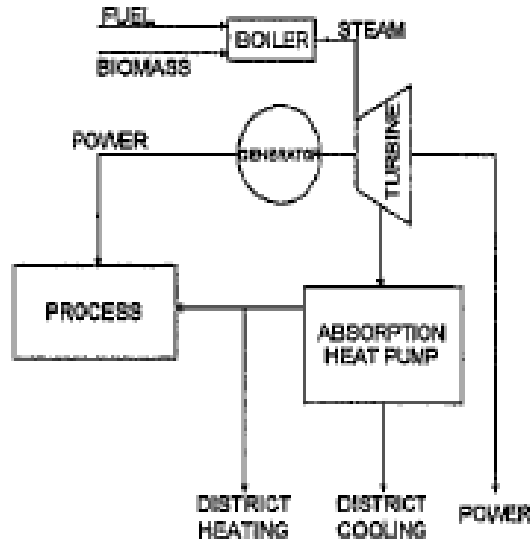


Figura 3.20: Schema dell'utilizzo pompa ad assorbimento per riscaldamento di distretti

3.4.Processi chimici

Le pompe di calore stanno diventando sempre più interessanti nell'ambito dei processi chimici poiché questi, richiedendo un'elevata quantità di energia, sono costretti ad affrontare spese sostenute per riuscire a ricoprire la domanda energetica, questione che nello studio di fattibilità di un impianto ricopre un peso elevato.

Esempi di utilizzo della pompa di calore in ambito chimico riguardano processi come la distillazione, la desalinizzazione dell'acqua, mentre per processi come la cristallizzazione l'impiego delle pompe di calore è ancora in una fase iniziale.

3.4.1.Processo di cristallizzazione in controcorrente

La cristallizzazione in controcorrente viene utilizzata in un processo di separazione dei composti organici dalla loro miscela. Questa tecnica necessita di due zone differenti, una di raffreddamento e una di riscaldamento; nella prima zona l'estrazione del calore permette di innescare la nucleazione e la crescita del cristallo, nella zona di fusione va fornito calore per permettere che il cristallo formato raggiunga la temperatura finale richiesta.

All'interno dello studio [72] viene proposta l'applicazione di una pompa di calore a compressione che utilizza come refrigerante l'ammoniaca viste le temperature in cui si trova a lavorare (-25°C a +25°C). In figura 3.21 si vede che l'evaporatore è posto nella zona di raffreddamento ad una temperatura di -30°C, permettendo il raffreddamento della

miscela fino a -18°C ; il condensatore invece è posto nella zona di fusione ad una temperatura di $+30^{\circ}\text{C}$ permettendo così il riscaldamento della miscela fino a $+25^{\circ}\text{C}$.

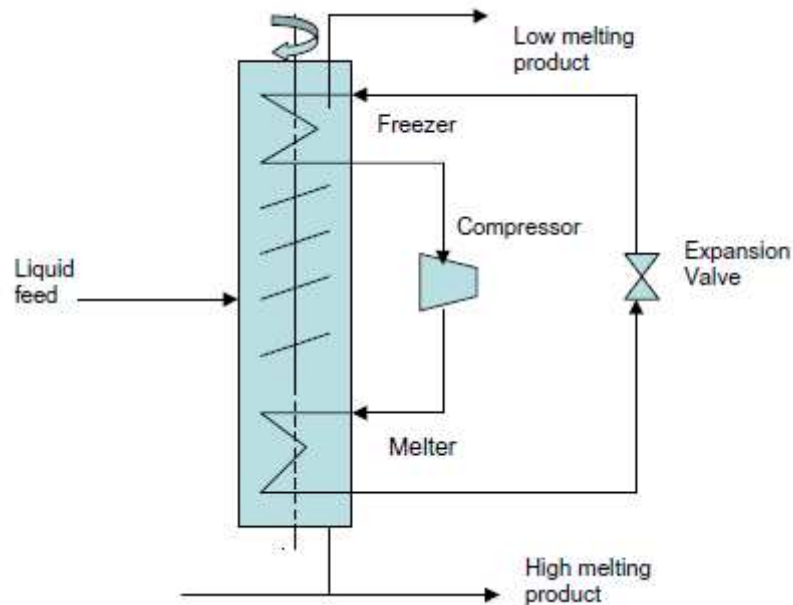


Figura 3.21: Colonna di cristallizzazione a spirale collegata con una pompa di calore

Un'analisi economica ha mostrato esservi una riduzione del consumo energetico di circa 35%-45% rispetto ad un sistema convenzionale di cristallizzazione.

3.4.2. Processo di cristallizzazione evaporativa per contatto diretto

Questo secondo tipo di cristallizzazione è utilizzato principalmente per separare i minerali dalla loro soluzione in acqua, ciò avviene quando la soluzione raggiunge lo stato di saturazione attraverso il raffreddamento e la parziale evaporazione del solvente.

Lo studio [73] ha considerato la possibilità di utilizzare una pompa di calore per estrarre sali minerali da una soluzione di acqua salina al fine di produrre acqua desalinizzata. La pompa di calore scelta è una pompa di calore meccanica a ciclo chiuso che si inserirà nell'impianto come mostrato in figura 3.22.

Nella colonna di cristallizzazione l'aria che entra in contatto con la soluzione è riscaldata precedentemente, passando attraverso il condensatore ad una temperatura di 65°C , la quale permette un innalzamento della temperatura fino a 55°C . Grazie a questo riscaldamento si forma nella colonna una fase cristallina all'interno della soluzione che verrà poi separata in un organo successivo. L'aria all'uscita della colonna ha una temperatura di 25°C , viene raffreddata e deumidificata nell'evaporatore che è ad una temperatura di 0°C ; a questo punto a seconda del processo quest'aria può essere espulsa

o riciclata nuovamente nel processo, cosa che accade principalmente se al posto di aria viene utilizzato del gas abbastanza costoso.

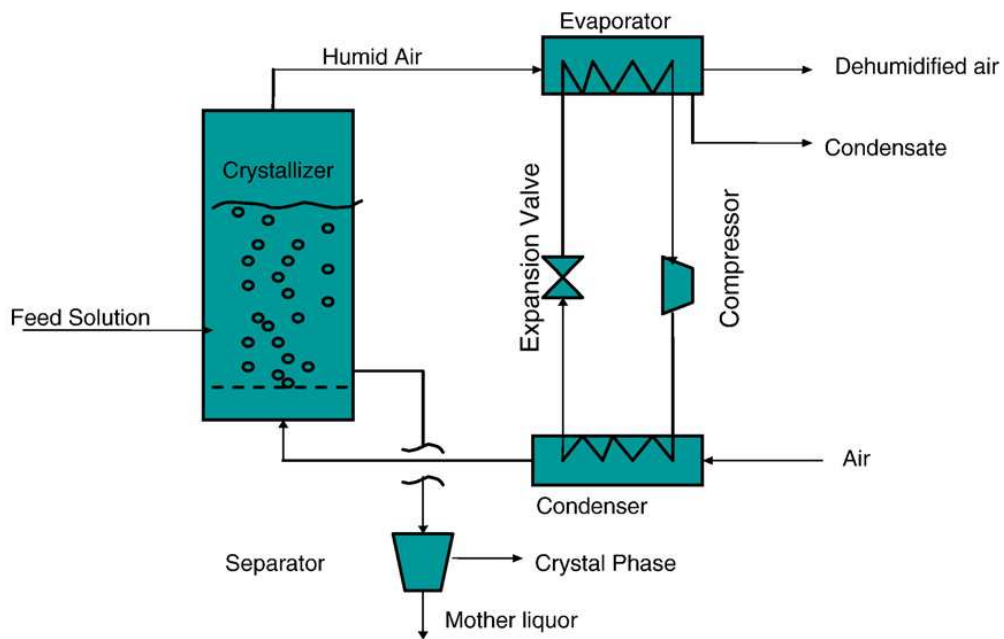


Figura 3.22: Colonna di cristallizzazione evaporativa accoppiata ad una pompa di calore

3.4.3. Processi di distillazione

L'utilizzo della pompa di calore come tecnologia di recupero energetico all'interno di processi di distillazione è un aspetto provato dalla letteratura [74] e coinvolge molti settori industriali come quello alimentare, chimico, petrolchimico. In generale questa scelta impiantistica dovrebbe essere effettuata nelle prime fasi di progettazione, anche se è possibile integrarla in un impianto già funzionante per il recupero del calore.

Analizziamo l'impiego di una pompa di calore in una distilleria cinese che presenta una sezione con cinque colonne di distillazione per l'alcool; lo studio [75] ha presentato un'analisi tramite pinch technology per capire quali fossero le zone critiche in cui poter intervenire. Si è osservata la presenza di un flusso di vapore secondario nell'impianto ad una temperatura di 80°C, solo parzialmente utilizzato, nonché la presenza di acqua refrigerata anch'essa limitatamente sfruttata. Dalla figura 3.23 si vede che il sistema di refrigerazione è alimentato dal vapore surriscaldato della colonna principale e da quello della sezione di rettifica, vi è la presenza di due pompe di calore a compressione di vapore. La prima è posizionata vicino alla torre di separazione dell'aldeide, il cui compressore innalza la temperatura del vapore a 74°C per sopperire alla produzione della torre di lavaggio; tale pompa ha un COP di circa 12.

La seconda pompa di calore è installata in corrispondenza della torre di lavaggio dove il vapore raggiunge una temperatura di 94°C per riscaldare la torre principale di rettificazione; questa presenta un COP di 6,6.

Tramite l'integrazione di queste due pompe di calore si è ottenuto un risparmio di circa 6 t/h di vapore, con però un consumo di 445 kW di elettricità necessaria per il funzionamento delle pompe di calore.

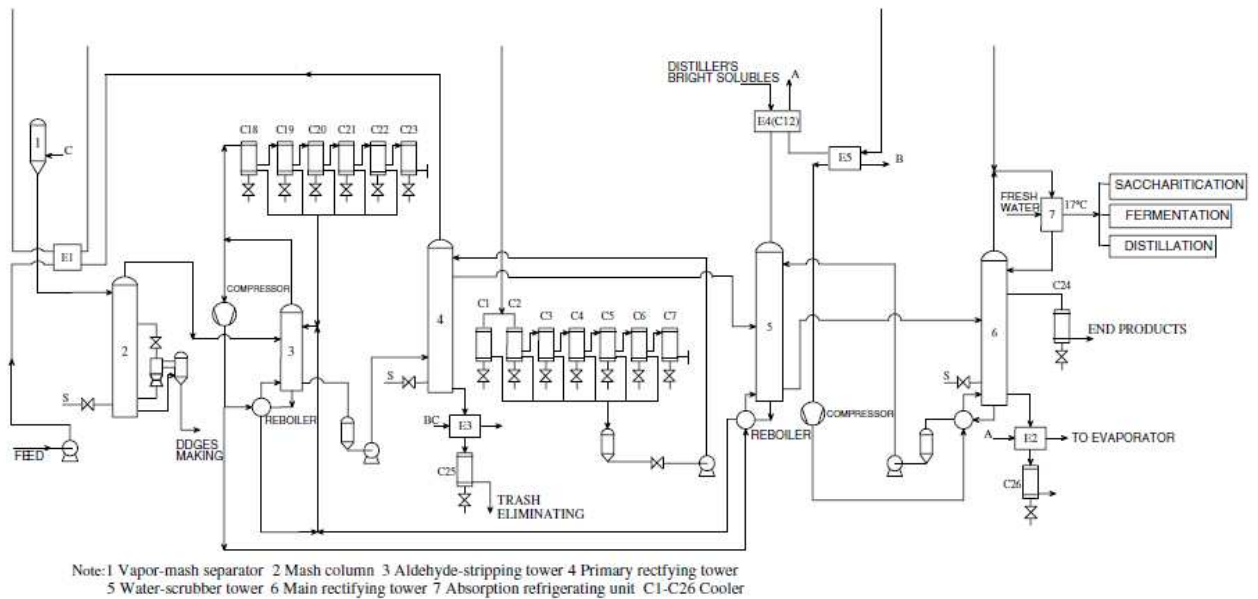


Figura 3.23: Processo di distillazione dell'alcool

3.4.4. Trasformatore di calore in un'industria della gomma

Lo studio [76] presenta la prima applicazione di un trasformatore di calore su scala industriale installato in Cina, utilizzato per recuperare il calore di scarto da un flusso di vapore ad una temperatura di 98 °C in una sezione dell'impianto di lavorazione della gomma sintetica (figura 3.24).

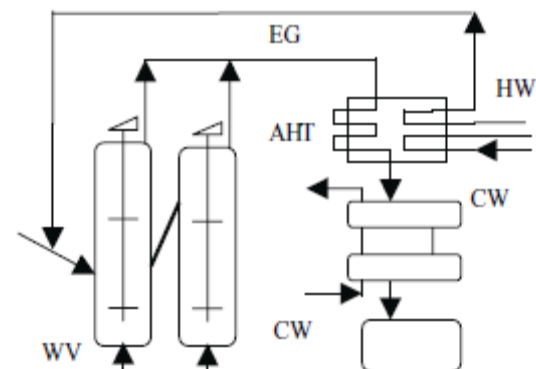


Figura 3.24: Trasformatore di calore integrato nel processo industriale (CW- acqua di raffreddamento, EG- vapore esausto, HW- acqua calda, WV- vapore)



Figura 3.25: Trasformatore di calore con una potenza di 5000 kW

Il trasformatore di calore utilizza come coppia di fluido di lavoro acqua– bromuro di litio ed è composto da cinque organi: assorbitore, evaporatore, generatore, condensatore e uno scambiatore di calore.

Nell'assorbitore il vapore ad alta temperatura e pressione viene assorbito dal fluido lavoro e il calore rilasciato da questa reazione viene assorbito dall'acqua calda di processo (HW), che passa da una temperatura di 95°C a max 110°C. Nel condensatore il vapore cede calore per raffreddare l'acqua (CW), che in ingresso ha una temperatura di 28- 30°C; il sistema presenta anche uno scambiatore di calore liquido- liquido che trasferisce calore tra la soluzione diluita e quella concentrata, aumentando l'efficienza termica. Questo tipo di pompa di calore ad assorbimento integrata nel processo permette di riscaldare l'acqua da 95°C a 105°C e di ridurre il consumo di vapore, producendo un flusso termico complessivo di 5000 kW con un COP di 0,47.

3.4.5. Applicazione di AHP ad un impianto di distillazione multi effetto

Nell'ambito di un processo di ricerca sulla dissalazione solare dell'acqua di mare [77] è stato proposto l'utilizzo di una pompa di calore ad assorbimento a doppio effetto accoppiata con un'unità di distillazione multi effetto. Le pompe di calore finora accoppiate con un sistema di distillazione multi effetto sono state pompe a compressione di vapore ad azionamento sia termico che meccanico che però mostrano, secondo gli studi effettuati e riproposti nell'articolo citato, prestazioni inferiori a quelle ottenute tramite una pompa di calore ad assorbimento. Il prototipo creato è mostrato in figura 3.26 e consiste in una

pompa ad assorbimento a cui è stato aggiunto un secondo generatore e condensatore, cioè una pompa di calore ad assorbimento a doppio effetto alimentata da acqua- bromuro di litio.

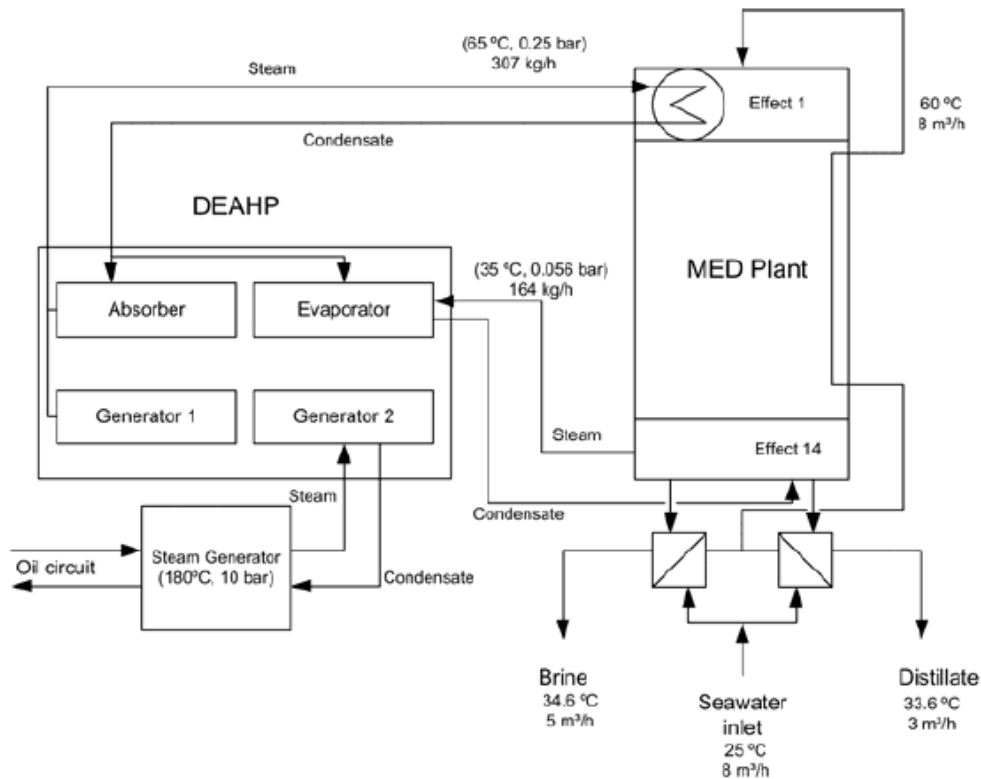


Figura 3.26: Impianto di desalinizzazione accoppiato ad una pompa ad assorbimento

Il vapore prodotto dal secondo generatore è utilizzato per il riscaldamento primo generatore che si trova ad una temperatura più bassa, in questo modo la soluzione di bromuro di litio è concentrata due volte nell'impianto ad assorbimento. Questo sistema ad assorbimento accoppiato ad un sistema di distillazione multistadio fa sì che il vapore prodotto nell'ultimo stadio di distillazione viene inviato all'evaporatore della pompa di calore viene condensato cedendo calore al fluido refrigerante in aggiunta a quello fornito dal generatore ad alta temperatura. Il primo stadio del sistema di distillazione invece è utilizzato come condensatore a bassa temperatura per la pompa di calore, il fluido da distillare oltre al calore ceduto dal refrigerante riceve calore anche dall'assorbitore.

Questo sistema di accoppiamento consuma circa 108 kJ di energia termica a 180°C per kg di acqua distillata, valore che è meno della metà dell'energia richiesta a 70°C da un semplice impianto di distillazione multi effetto.

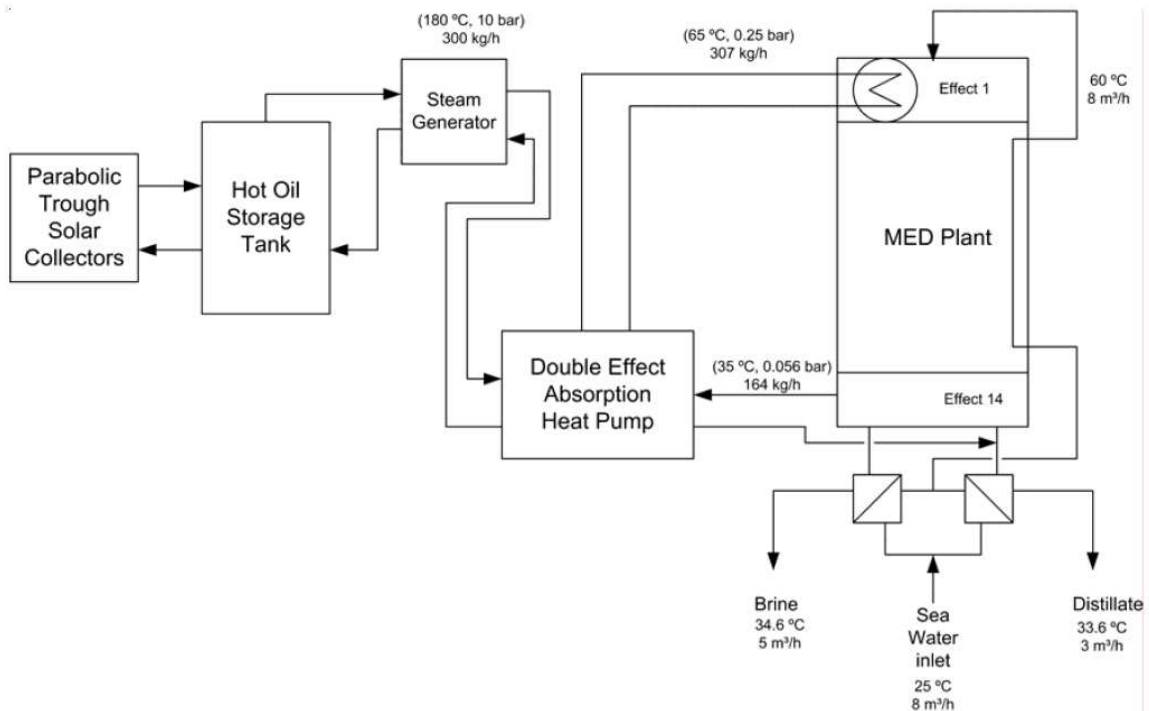


Figura 3.27: Impianto di desalinizzazione con pompa di calore ad assorbimento e collettori solari

Una limitazione tuttavia riguardo questa applicazione è la natura della fonte di energia termica da utilizzare, in quanto l'utilizzo di un ciclo ad assorbimento è possibile se l'energia è di tipo solare o derivante da combustibili fossili e non nel caso provenga solamente da flussi di calore in eccesso. L'unione di questo sistema con dei collettori solari di tipo parabolico (figura 3.27) ha mostrato una riduzione del consumo energetico rispetto agli altri sistemi usati in genere, in cui non vi è la presenza di una pompa di calore ma un collegamento diretto tra collettori e sistema di distillazione.

3.5. Industria tessile

Nello studio [78] qui riportato viene preso in considerazione l'utilizzo di un trasformatore di calore percorso da una soluzione di bromuro di litio e acqua (come refrigerante) per produrre acqua calda di processo, utilizzando quella generata da un impianto di cogenerazione in un'azienda tessile. Come illustrato in figura 3.28, l'impianto presenta 4 unità che producono acqua a circa 90°C, e tramite l'applicazione di un trasformatore di calore l'obiettivo è quello di recuperare questo calore inutilizzato per riuscire a riscaldare l'acqua di processo fino ad una temperatura di 120°C in vista del suo utilizzo in macchine che lavorano ad alta pressione. Oltre all'ipotesi di inserimento di un trasformatore di calore classico, sono state proposte alcune modifiche al sistema per riuscire ad incrementare il

flusso di calore scambiato, nonché il COP. La configurazione classica di un trasformatore di calore AHT in questo impianto presenta un COP di 0,48 e i tre livelli di temperatura: condensatore 25°C, generatore 80°C e assorbitore 13 0°C.

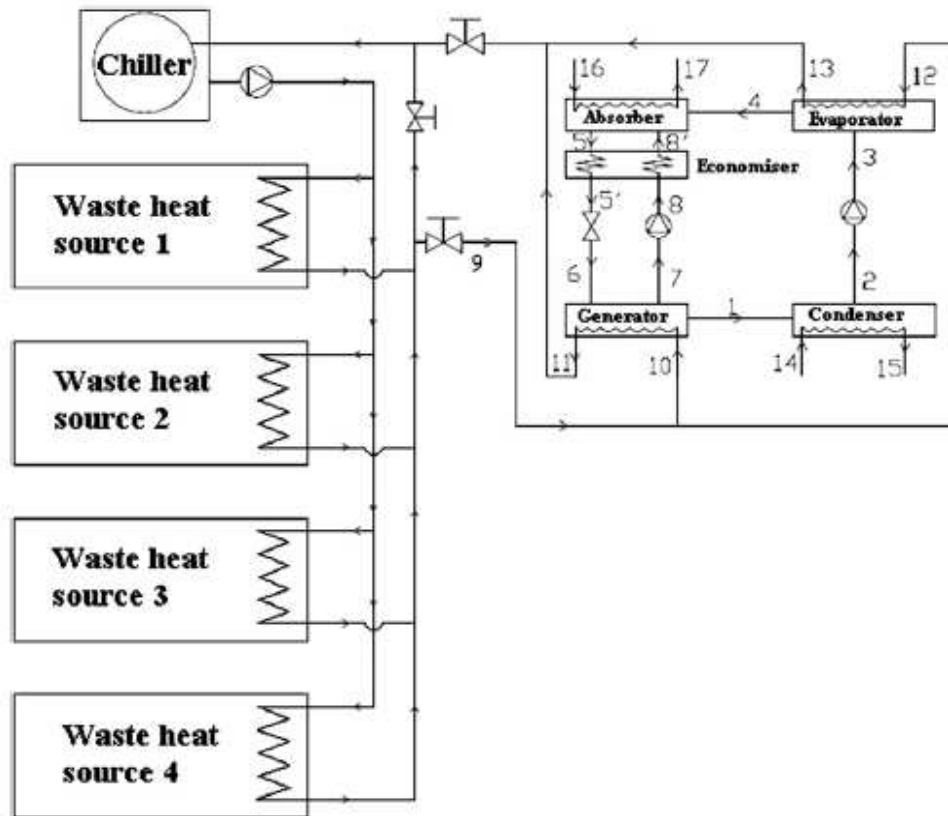


Figura 3.28: Trasformatore di calore con economizzatore

Tra le modifiche considerate la più interessante, per quanto riguarda i tre aspetti che guidano la nostra analisi (COP, trasferimento di calore, quantità di acqua calda prodotta) è sicuramente la configurazione di figura 3.29, in cui l'acqua calda in uscita dall'evaporatore viene inviata completamente al generatore prima di essere indirizzata all'impianto; inoltre sono stati posizionati: uno scambiatore di calore assorbente al posto dell'economizzatore vicino all'assorbitore e un secondo scambiatore refrigerante all'ingresso dell'evaporatore. Questa proposta presenta un COP pari a 0,55, cioè un aumento del 14,1 % rispetto al semplice AHT, si vede un aumento del 158,5% nel trasferimento del calore all'assorbitore per un ammontare totale di 695 kW e un aumento del 3,6% in kg/h di acqua prodotta rispetto alla configurazione di riferimento.

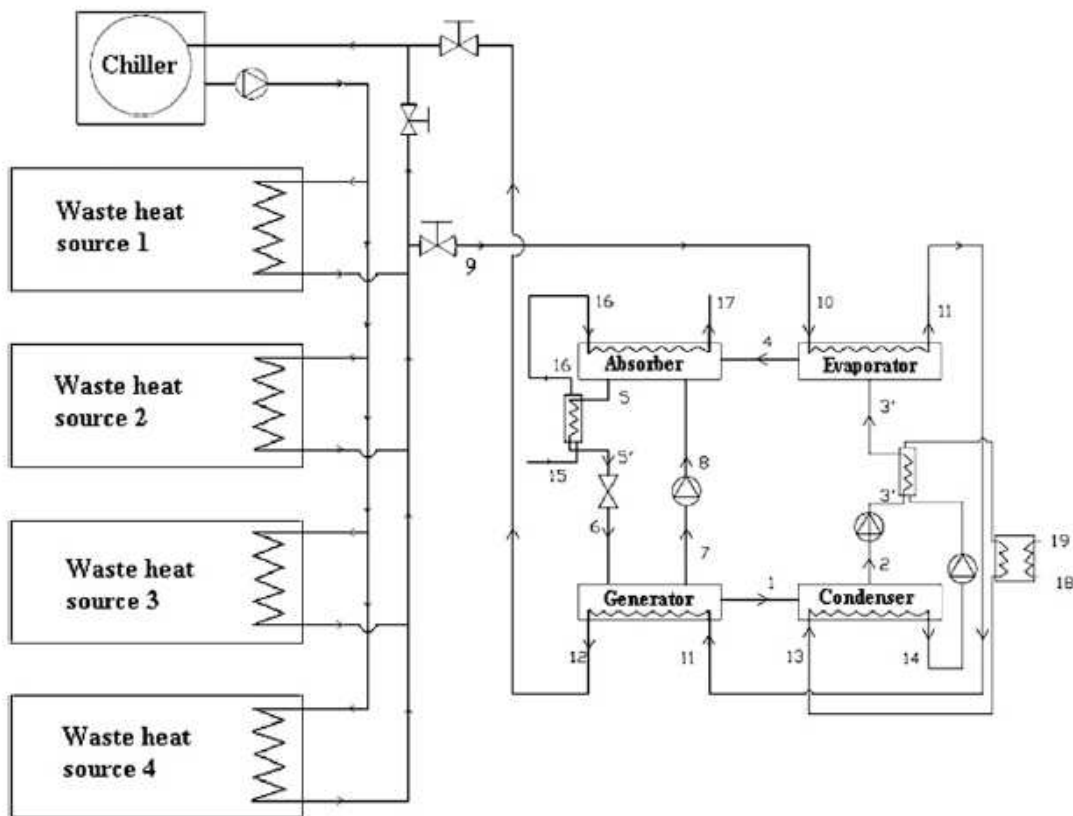


Figura 3.29: Scambiatori di calore integrati nel ciclo del trasformatore di calore

3.6.Valutazione economica

In tutti i casi considerati oltre ad un'attenta analisi per effettuare un buon posizionamento della pompa di calore nell'impianto esistente, va posta molta attenzione sui costi di installazione, nonché quelli annuali che l'impresa si troverà a sostenere scegliendo un'alternativa piuttosto che l'altra.

Ci sono molti possibili metodi per valutare le opzioni di investimento ed effettuare paragoni economici sulle prestazioni; il più utilizzato nel settore industriale, è il calcolo del periodo di recupero, spesso utilizzato perché permette un rapido confronto fra le alternative. I periodi di recupero accettabili variano tra i diversi paesi e settori industriali, soprattutto dipendono dal tipo di installazione; normalmente un periodo accettabile varia tra i due e tre anni. Naturalmente un'analisi più accurata va effettuata confrontando le alternative sulla base del valore attuale netto, che permette di attualizzare i flussi di cassa dell'investimento in fase progettuale.

3.6.1. Esempio di analisi tra alternative

Riprendendo un caso presentato in questo capitolo [68] in cui si proponeva, all'interno di uno stabilimento di produzione di carta e cellulosa, l'installazione di una pompa di calore ad assorbimento a singolo stadio o a doppio livello di temperatura nell'area di sbiancamento dell'impianto per la produzione di acqua refrigerata. In questo studio è stata effettuata una valutazione economica per determinare la fattibilità economica di entrambe le proposte. Il funzionamento annuo dell'impianto è di 8000 h (3400 h richiedono produzione di acqua per il raffreddamento) i costi di installazione per le due macchine sono stati calcolati sulla base del costo del calore ceduto espressi in \$/kW: sono stati 356 \$/kW e 297 \$/kW per la pompa a singolo stadio e quella a doppio livello di temperatura. I costi di manutenzione e altri costi operativi in questa analisi sono stati trascurati; prendendo 85 \$/MWh come costo per l'energia elettrica e 63 \$/MWh per il vapore, mentre il costo per l'acqua di raffreddamento è stato assunto 0,165 \$/t (include anche il costo per il trattamento degli effluenti).

Di conseguenza, i costi di installazione dell' AHP e il corrispondente risparmio annuale per vapore, energia elettrica e acqua di raffreddamento può essere stimato grazie alla tabella 3.2 qui inserita. Il fattore SBF (Simple Payback Time) indica il periodo di recupero ed è stato calcolato con rapporto tra i costi di installazione e il risparmio annuale; come si vede la seconda alternativa presenta un periodo di recupero inferiore, nonché costi di installazione minori rispetto la prima.

Tabella 3.2: Analisi dei costi per ciascuna alternativa

Case	Annual savings				Installed cost (M\$)	SPB (a)
	Electricity (MW)	Steam (MW)	Cooling water (t/s)	Total (M\$/a)		
Opp. I (Double lift)	0.26	3.57	138.9	0.92	2.46	2.7
Opp. II (Single stage)	0	1.92	0	0.97	1.61	1.7

Un approfondimento dell'analisi è stato effettuato valutando il ciclo di vita e i costi di funzionamento per le due macchine attraverso il metodo del valore attuale netto (VAN); considerando un orizzonte temporale di 15 anni e tasso d'interesse del 7%.

Nel grafico 3.1 si vede in ascissa il tempo trascorso dalla data di investimento, l'intersezione con la linea corrispondente ad un VAN pari a zero indica il tempo necessario affinché i progetti diventino redditizi. Per questi casi è di circa 3 e 1,9 anni per, rispettivamente, AHP con doppio livello di temperatura e AHP singola fase. Tra le due

alternative, quindi, la più conveniente è quella che propone l'installazione di una pompa di calore a singolo stadio, sia nel breve che nel lungo periodo.

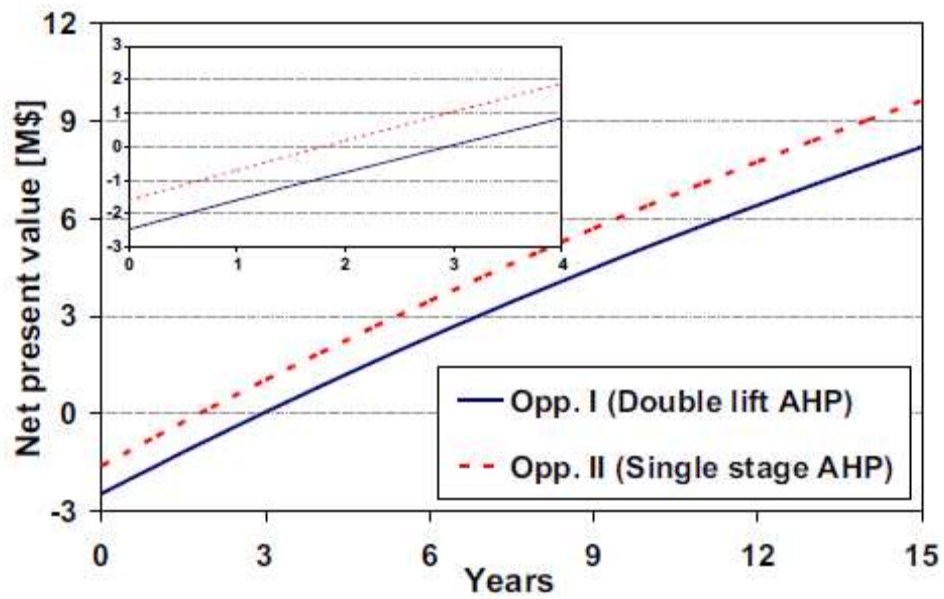


Grafico 3.1: Valore attuale netto per le due alternative

Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi è stato principalmente quello di presentare le varie nuove applicazioni e tecnologie che si sono sviluppate negli ultimi anni all'interno della grande famiglia delle pompe di calore utilizzate in ambito industriale.

Il potenziale di utilizzo di una pompa di calore all'interno di un processo industriale è molto alto perché grazie al recupero del calore, e al conseguente riutilizzo in funzioni interne al processo oppure nel riscaldamento aziendale, l'intera industria produttiva si trova a godere dei benefici energetici ed economici che questa installazione apporta. Inoltre basti pensare che l'applicazione di questa tecnologia rispetto alle dirette concorrenti, come caldaie alimentate da combustibili fossili, permette una produzione di CO₂ molto inferiore, quindi un maggior rispetto per l'ambiente.

I cicli presentati non si discostano molto da quelli già esistenti, tuttavia sono stati apportati numerosi miglioramenti agli organi di cui essi si compongono o ai fluidi che essi utilizzano, il tutto in vista di un aumento dell'efficienza globale del sistema.

Particolare attenzione però è stata posta negli ultimi anni anche sul posizionamento di queste macchine nel processo produttivo, perché per poter aumentare il risparmio energetico nell'impianto, non basta utilizzare macchine efficienti, ma occorre che queste siano ben integrate nel processo per renderlo efficiente nel suo complesso.

Dalle descrizioni tecniche delle varie tipologie di pompa, nonché dai casi illustrati, si può dedurre che ogni impianto è un caso a sé: prima di poter inserire una pompa di calore in un qualsiasi impianto industriale deve essere sempre effettuato un attento monitoraggio delle varie zone in cui si dispone di calore in eccesso, che per essere considerate accettabili devono poter fornire continuamente calore. L'analisi successiva per queste alternative sfrutta metodi matematici per capire quali siano, all'interno dell'impianto, i flussi di calore che permettano di poter effettuare una buona integrazione della tecnologia scelta nel processo per ottimizzare termodinamicamente l'intero sito industriale. La scelta del tipo di macchina da adottare poi verrà effettuata in base alle condizioni operative in cui essa si troverà ad operare, compatibilmente con i risultati ottenuti da un'attenta analisi economica effettuata su tutte le alternative.

Nonostante i grandi vantaggi che questa tecnologia può apportare, il numero di applicazioni nell'industria non è ancora paragonabile a quello residenziale; tuttavia l'attenzione per questa forma di recupero energetica continua ad essere molto alta.

A questo proposito il centro di ricerca IEA ha commissionato un progetto con l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas ad effetto serra e aumentare il risparmio energetico, promuovendo l'applicazione delle pompe di calore nell'industria. Il progetto è stato iniziato nel maggio 2010, avrà come termine aprile 2013, il compito principale sarà quindi presentare la pompa di calore come una tecnologia efficiente ed ecologica, proponendo nuove applicazioni o miglioramenti.

Bibliografia

- [1] IEA Heat Pump Centre, Heat pumps can cut global CO2 emissions by nearly 8%, Renewable energy for a cleaner future, www.heatpumpcentre.org
- [2] IEA Heat Pump Centre, www.heatpumpcentre.org/en/aboutheatpumps
- [3] <http://www.rri.it/>
- [4] R. Lazzarin, "Il condizionamento dell'aria e il gas naturale", PEG Milano, 1993
- [5] B. Stuij, Heat pumping technologies, applications and markets, Energy for Sustainable Development, Volume II, n°3, September 1995
- [6] T. Berntsson, Heat sources — technology, economy and environment, International Journal of Refrigeration n°25, pp 428–438, 2002
- [7] A. C. Gillet, Heat pumps and renewable energies, WREC 1996, pp 641-644
- [8] <http://www.multiutility.biz>
- [9] K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang, Advances in heat pump systems: A review, Applied Energy n°87, pp 3611–3624, 2010
- [10] Chen W., A comparative study on the performance and environmental characteristics of R410A and R22 residential air conditioners, Appl Therm Eng, n° 28(1), pp 1–7, 2008
- [11] Liu Z, Li X, Wang H, Peng W., Performance comparison of air source heat pump with R407C and R22 under frosting and defrostin, Energy Convers Manage, n° 49 (2), pp 232-9, 2008
- [12] Park KJ, Shim YB, Jung D., Performance of R433A for replacing HCFC22 used in residential air-conditioners and heat pumps, Appl Energy, n°85(9):896–900, 2008
- [13] Bhodan Soroka, Laborelec, "Industrial Heat Pumps", Power Quality & Utilisation Guide Section 7: Energy Efficiency February 2007, www.leonardo-energy.org
- [14] A.K. Wemmers, "Heat pumps in future industrial processes", IEA Heat Pump Centre Newsletter Volume 27, n°4, pp 25-29, 2009

- [15] U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, "Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings" Industrial Technologies Program, June 2003
- [16] IEA Heat Pump Centre, Industrial Heat Pumps: Experiences, Potential and Global Environmental Benefits, Annex 21, Report n°1, HPP- AN21, 1995
- [17] Chua KJ, Chou SK. A modular approach to study the performance of a two-stage heat pump system for drying. *Appl Therm Eng*, n°25(8–9), pp 1363–79, 2005
- [18] A. Hepbasli, Z. Erbay, F. Icier, N. Colak, E. Hancioglu, A review of gas engine driven heat pumps (GEHPs) for residential and industrial applications, *Applied Energy* n°88, pp 882–891, 2011
- [19] Hepbasli A, Icier F, Kuzgunkaya EH, Colak N., Design, test and performance evaluation of a gas engine driven solar assisted band conveyor heat pump drying system. Project no: 106M482, supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), 2007, unpublished project
- [20] Winandy EL, Lebrun J. Scroll compressors using gas and liquid injection: experimental analysis and modelling. *Int J Refrig*, n°25(8), pp 1143–56, 2002
- [21] Wang, B., Li, X., Shi, W., and Q. Yan, "Effects of refrigerant injection on the scroll compressor." *Proceedings of the International Compressor Engineering Conf. at Purdue*. (West Lafayette), 2006
- [22] Emerson Climate Technologies, "Digital Scroll.", 2003, www.digitalscroll.com
- [23] Goodnight T., Monk, D., and J. Loprete, "Two-step capacity modulation of a single cylinder compressor." *Proceedings of the International Compressor Engineering Conf. at Purdue*. (West Lafayette), 2000
- [24] The YL, Ooi KT, Experimental study of the revolving vane (RV) compressor, *Appl. Therm Eng*, n°29(14-15), pp 3235-45, 2009
- [25] The YL, Ooi KT, Theoretical study of a novel refrigeration compressor- Part I: Design of the revolving vane (RV) compressor and its frictional losses, *Int J Refrig*, n°32 (5), pp 1092-1102, 2009
- [26] G. Haiging, M.Yitai and L. Minxia, Some design features of CO₂ swing piston expander, *Applied Thermal Engineering*, vol 26, pp 37-243, 2006

- [27] L. Cremaschi, "Development trends for heat pump components", IEA Heat Pump Centre Newsletter, vol 25, n°3, pp 18-21, 2007
- [28] M. Yari, M. Sirousazar, Performance analysis of the ejector vapour compression refrigeration cycle, Proc Inst Mech Eng, Part A, J Power Energy, n° 221(8), pp 1089-98, 2007
- [29] IEA Heat Pump Centre, Compact Heat Exchangers in Heat Pumping Equipment, Report n°1, HPP-AN33,2010
- [30] Srihirin P., Aphornratana S., Chungpaibulpatana S., A review of absorption refrigeration technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews n° 5, pp 343–372, 2001
- [31] I. Horuz, B. Kurt, Absorption heat transformers and an industrial application, Renewable Energy, n°35 , pp 2175-2181, 2010
- [32] F. Ziegler, Recent developments and future prospects of sorption heat pump systems, Int. J. Therm. Sci., n°38, pp 91-208, 1999
- [33] J.I. Yoon, O.K. Kwon, Cycle analysis of air-cooled absorption chiller using a new working solution, Energy n°24, pp 795-809, 1999
- [34] R.J. Romero, W. Rivera, I. Pilatowsky, R. Best, Comparison of the modeling of a solar absorption system for simultaneous cooling and heating operating with an aqueous ternary hydroxide and with water/lithium bromide, Solar Energy Materials & Solar Cells n°70, pp 301-308, 2001
- [35] S. Jian, F. Lin, Z. Shigang, Performance calculation of single effect absorption heat pump using LiBr + LiNO₃ + H₂O as working fluid Applied Thermal Engineering, n° 30, pp 2680-2684, 2010
- [36] Z. Hea, Z. Zhaoa,*, X. Zhanga, H. Fengb, Thermodynamic properties of new heat pump working pairs:1,3-Dimethylimidazolium dimethylphosphate and water, ethanol and methanol Fluid Phase Equilibria n°298, pp 83–91, 2010
- [37] G. Restuccia, Thermally driven heat pumps in future energy systems, IEA Heat Pump Centre Newsletter Volume 27, N°4, pp 13-15, 2007

- [38] H. Demira, M. Mobedib, S. Iku, A review on adsorption heat pump: Problems and solutions *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n°12, pp 2381–2403, 2008
- [39] Moiz Elnekave, Adsorption heat pumps for providing coupled heating and cooling effects in olive oil mills, *Int. J. Energy Res.*, n° 32, pp 559–568, 2008
- [40] Hawlader MNA, Rahman SMA, Jahangeer KA., Performance of evaporator collector and air collector in solar assisted heat pump dryer, *Energy Convers Manage*, n°49(6), pp 1612–9, 2008
- [41] Imre L. Solar drying. In: Mujumdar AS, editor. *Handbook of industrial drying*. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Inc., pp. 317–9, 2006
- [42] Hawlader MNA, Jahangeer KA. Solar heat pump drying and water heating in the tropics. *Solar Energy*, n°80, pp 492–9, 2006
- [43] Hawlader MNA, Dey PK, Diab S, Chung CY, Solar assisted heat pump desalination system. *Desalination*, n° 168(15), pp 49–54, 2004
- [44] Ronak Daghigh, Mohd Hafidz Ruslan, Mohamad Yusof Sulaiman, Kamaruzzaman Sopian, Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products *Renewable and Sustainable Energy Reviews* n° 14, pp 2564–2579, 2010
- [45] Tan, M.; Chua, K.J.; Mujumdar, A.S.; Chou, S.K., Osmotic Dehydration of Potato and Pineapple-Effect of Intermittent Infrared Radiation and Continuous Convection in a Heat Pump Dryer, *Drying Technology—An International Journal* 2002
- [46] Thomas, W.J. RF, Drying Provides Process Savings: New Systems Optimize Radio Frequency Drying for the Ceramic and Glass Fiber Industries, in April 1996 issue of *Ceramic Industry Magazine*, pp 30–34
- [47] Colak N, Kuzgunkaya E, Hepbasli A., Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer, *Journal of Food Processing and Engineering*, n° 31, pp 281–98, 2008
- [48] Hancioglu KE, Hepbasli A., Exergetic evaluation of drying of laurel leaves in a vertical ground-source heat pump drying cabinet, *International Journal of Energy Research*, n°31, pp 245–58, 2007

- [49] Colak N, Hepbasli, A., Exergy analysis of drying of apple in a heat pump dryer, In: Second international conference of the food industries & nutrition division on future trends in food science and nutrition, pp 145–58, 2005
- [50] F. Karaca, O. Kincay, E. Bolat, Economic analysis and comparison of chemical heat pump systems, Applied Thermal Engineering n°2 2, pp 1789–1799, 2002
- [51] Ogura H, Yamamoto T, Kage H, Matsuno Y, Mujumdar AS, Effects of heat exchange condition on hot air production by a chemical heat pump dryer using CaO/H₂O/Ca(OH)₂ reaction, Chemical Engineering Journal, n°86, pp 3–10, 2002
- [52] Ogura H, Mujumdar AS., Proposal for a novel chemical heat pump dryer, Dry Technol, n°18(4&5), pp 1033–53, 2000
- [53] Rolf R, Corp R., Chemical heat pump for drying of bark, Annual meeting:technical section, Canadian pulp and paper association, pp 307–11, 1990
- [54] ECN Energy Research Centre of the Netherlands, "Saving energy in distillation with thermoacoustic heat pumps", Energy Efficiency in Industry, www.ecn.nl
- [55] R. Nordman, T. Berntsson, Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit I: Theory and concepts, Applied Thermal Engineering n° 29, pp 275–281, 2009
- [56] O. Ozyurt, O. Comakli, M. Yilmaz and S. Karasl, Heat pump use in milk pasteurization: an energy analysis, Int. J. Energy Res, n°28, pp 833–846, 2004
- [57] Andersen JM., Heat integration of absorption heat pump in a milk powder dairy. Proceedings of IMECE International Mechanical Engineering Congress & Exposition November Walt Disney World, Orlando, pp 5–10, 2000
- [58] The Europe Commission Energy Programme (ECEP), Indication of annular energy savings and costs: Heat pump in Dairy industries, 2003, www.europe.eu.int/energy
- [59] M.S. Soylemez, Optimum heat pump in milk pasteurizing for dairy, Journal of Food Engineering n°74, pp 546–551, 2006
- [60] P.O. Kapustenko, L.M. Ulyevb, S.A. Boldryevb, A.O. Garevb, Integration of a heat pump into the heat supply system of a cheese production plant, Energy n°33, pp 882–889, 2008
- [61] Hesselgreaves JE., Compact heat exchangers. Selection, design and operation. Amsterdam: Elsevier; 2001

- [62] M. Fatouh, M.N. Metwally, A.B. Helali, M.H. Shedid, Herbs drying using a heat pump dryer, *Energy Conversion and Management*, n°47 , pp 2629–2643, 2006
- [63] P.K. Adapa, G.J. Schoenau and S. Sokhansanj, Performance study of a heat pump dryer system for specialty crops-Part 1: Development of a simulation model, *Int. J. Energy Res.*,n°26, pp 1001–1019, 2002
- [64] N. Colak, E. Kuzgunkaya, A. Hepbasli, Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer , *Journal of Food Process Engineering* n°31, pp 281–298, 2008
- [65] M. Aktaş, İ. Ceylan, S. Yilmaz, Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer, *Desalination* n°239 , pp 266–275, 2009
- [66] M. Elnekave, Adsorption heat pumps for providing coupled heating and cooling effects in olive oil mills, *Int. J. Energy Res.*n°32, pp 559–568, 2008
- [67] B. Le Losteca, N. Galanisa, J. Baribeault, J. Millette, Wood chip drying with an absorption heat pump , *Energy* n°33, pp 500–512, 2008
- [68] B. Bakhtiari, L. Fradette, R. Legros, J. Paris, Opportunities for the integration of absorption heat pumps in the pulp and paper process, *Energy* n°35, pp 4600-4606, 2010
- [69] A. Costa, B. Bakhtiari, S. Schuster, J. Paris, Integration of absorption heat pumps in a Kraft pulp process for enhanced energy efficiency, *Energy* n° 34, pp 254–260, 2009
- [70] M. Marinova, E.M. Espejel, B. Bakhtiari, & J. Paris, A new methodology for the implementation of trigeneration in industry: application to the Kraft process, *Chemical Engineering Department, École Polytechnique, Montréal, Québec, Canada, Tarragona (Spain), 16-17 October 2007*, pp 333-351
- [71] A. Costa, V. Neuhann, J. Vaillancourt, J. Paris, Applications of absorption heat pumps in the pulp and paper industry for increase efficiency and reduction of green house gas emissions, *PAPTAC 90th Annual Meeting 2004*, pp 191-195
- [72] Adnan M. Al-Harashseh, A heat pump in a countercurrent crystallization process, *Applied Thermal Engineering* n°25, pp 545–555, 2005

- [73] Adnan M. Al-Harabsheh, Theoretical analyses of energy saving in a direct contact evaporative crystallization through the installation of heat pump, *Desalination* n° 251, pp 47–52, 2010
- [74] Z. Fonyo, N. Benko, Comparison of various heat pump assisted distillation configurations, *Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE*, Vol 76, Part A, March 1998
- [75] Z. Gu, Z. Tao, N. Xu, Y. Li, Retrofitting of a distillery based on process synthesis, *Energy Conversion and Management* n°48, pp 335–343, 2007
- [76] X. Ma, J. Chen, S. Li , Q. Sha , A. Liang ,W. Li, J. Zhang, G. Zheng, Z. Feng, Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant, *Applied Thermal Engineering* n°23, pp 797–806, 2003
- [77] D.C. Alarcón-Padilla, L. García-Rodríguez, Application of absorption heat pumps to multi-effect distillation: a case study of solar desalination, *Desalination* n°212, pp 294–302, 2007
- [78] I. Horuz, B. Kurt, Absorption heat transformers and an industrial application, *Renewable Energy* n°35, pp 2175-2181, 2010

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va al professor Marco Noro per l'aiuto che mi ha dato, per la sua comprensione e disponibilità.

Un grazie a tutta la mia famiglia che mi ha spronato fino qui, ma in particolare il mio più profondo grazie spetta a Giovanni che ha saputo darmi forza e consigliarmi nei momenti di difficoltà, e soprattutto sopportarmi, cosa che in alcuni momenti poteva risultare veramente un'impresa impossibile!

Non posso assolutamente dimenticare il sostegno che mi hanno dato le mie "donne" e i miei amici: in particolare devo ringraziare Daria che, oltre a sopportarmi, mi ha offerto un posto in cui studiare, caffè per rimanere attiva e dolcetti fatti in casa, perché anche le più grandi menti alla fine necessitano di zuccheri.

Ringrazio le persone che ho conosciuto o ritrovato, perché tutte hanno saputo ascoltarmi e darmi all'occorrenza il giusto numero di "pacchette" sulla spalla.

Infine tutti i miei compagni d'avventura, con cui tre anni fa ho iniziato questo percorso, e senza cui a volte mi sarei sentita persa; siete tutti veramente importanti!

Grazie a tutti.