

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Dell' Energia

***Relazione per la prova finale  
«Soluzioni per lo sbrinamento  
di pompe di calore»***

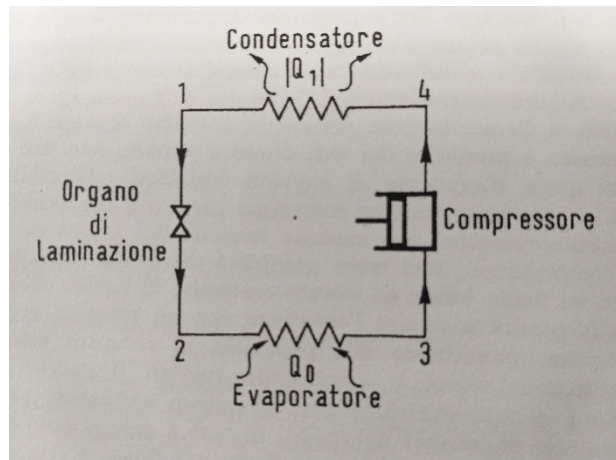
Tutor universitario: Prof. Lorenzo Moro

Laureando: *Valentino Nardi*

Padova, 01/03/2022

Le pompe di calore (PdC) negli ultimi anni stanno sempre più entrando nel settore residenziale/civile, al posto delle caldaie tradizionali, come metodo di generazione del calore per usi sanitari e riscaldamento abitativo. Esse si basano sui cicli inversi, tipicamente usati nelle macchine frigorifere, con la sola differenza che le PdC operano con un effetto utile opposto. Esse prelevano energia termica dall'ambiente esterno cedendola all'ambiente interno (utilizzatore) ad una temperatura utile.

Sono composte principalmente da due scambiatori (evaporatore e condensatore), un compressore ed un organo di laminazione, che tipicamente può essere una valvola di espansione elettronica (EEV) o termostatica (TEV).



Esistono però delle problematiche tecniche dovute alla fonte da cui si preleva questa energia termica.

Infatti le caratteristiche dell'aria esterna possono creare inizialmente della condensa sulla batteria esterna della PdC, che congelandosi forma della brina.

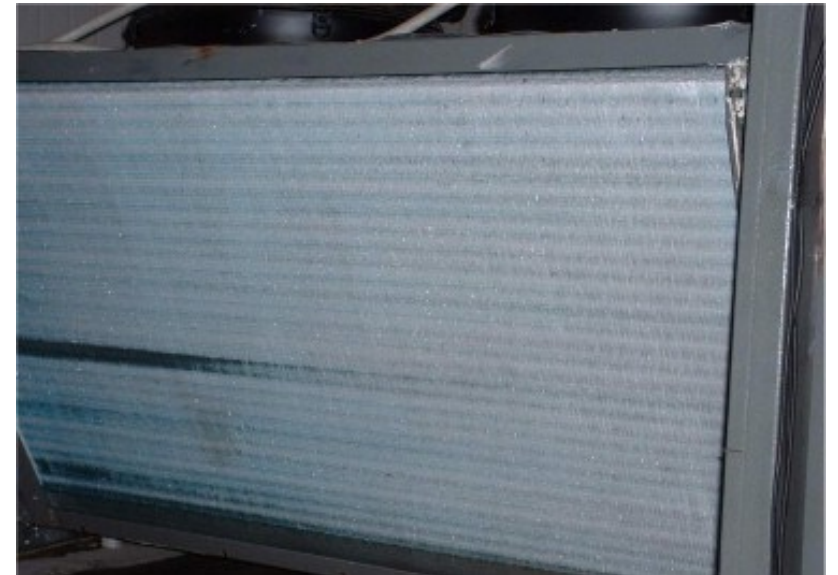
In questa relazione parleremo dell'effetto della brina, e soprattutto dei metodi applicabili per risolvere questo problema.

Metteremo a paragone procedure di defrosting (by-pass gas caldo, inversione di ciclo) e metodi per migliorare l'utilizzo della macchina, analizzando componenti e metodi di controllo/regolazione diversi.

In questa presentazione parleremo delle soluzioni che si possono adottare per risolvere il problema di brinamento (frosting) che interessa PdC **aria-aria** e **aria-acqua** (principalmente di piccola media taglia usate in ambito civile) ed esporremo alcuni possibili miglioramenti che si possono applicare per risolverlo.

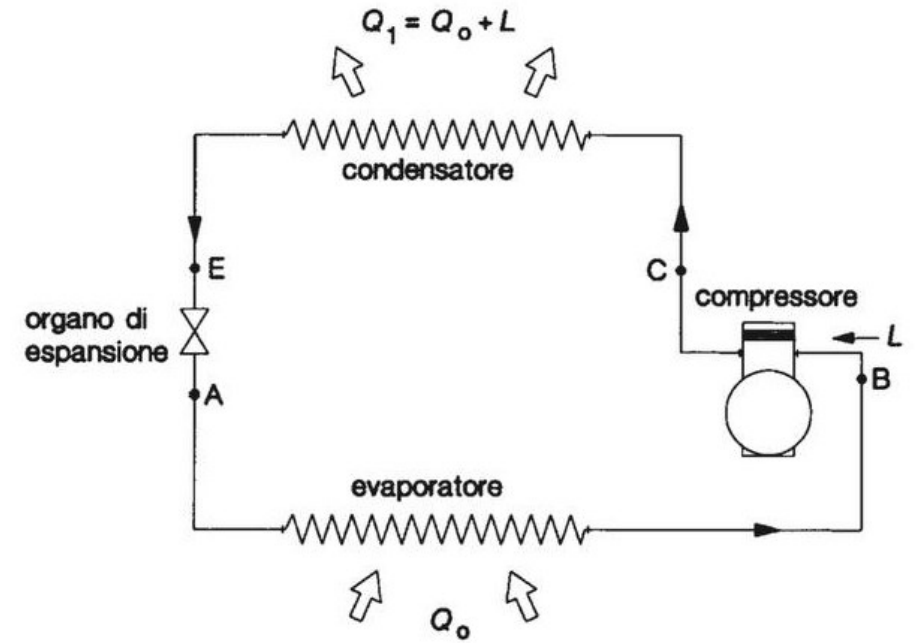
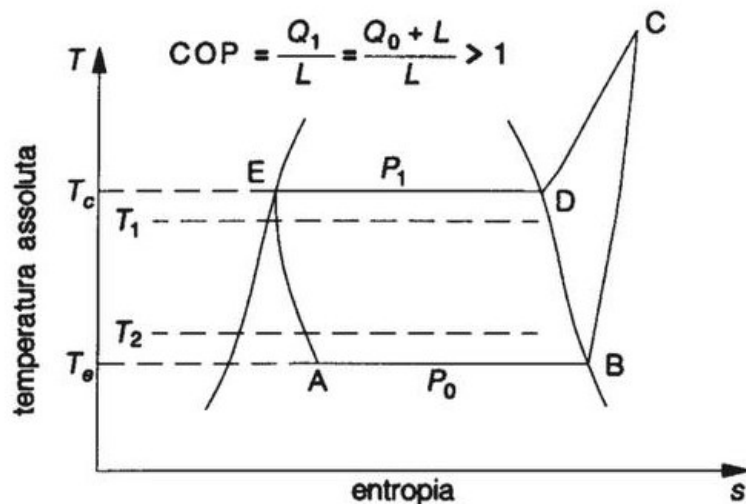
Andremo a toccare i seguenti argomenti:

- Formazione della brina in una PdC
- Analisi differenze tra utilizzo inversione di ciclo e bypass gas caldo
- Regolazione della frequenza di sbrinamento
- Regolazione in base al grado di surriscaldamento
- Possibile alternativa agli scambiatori esterni classici



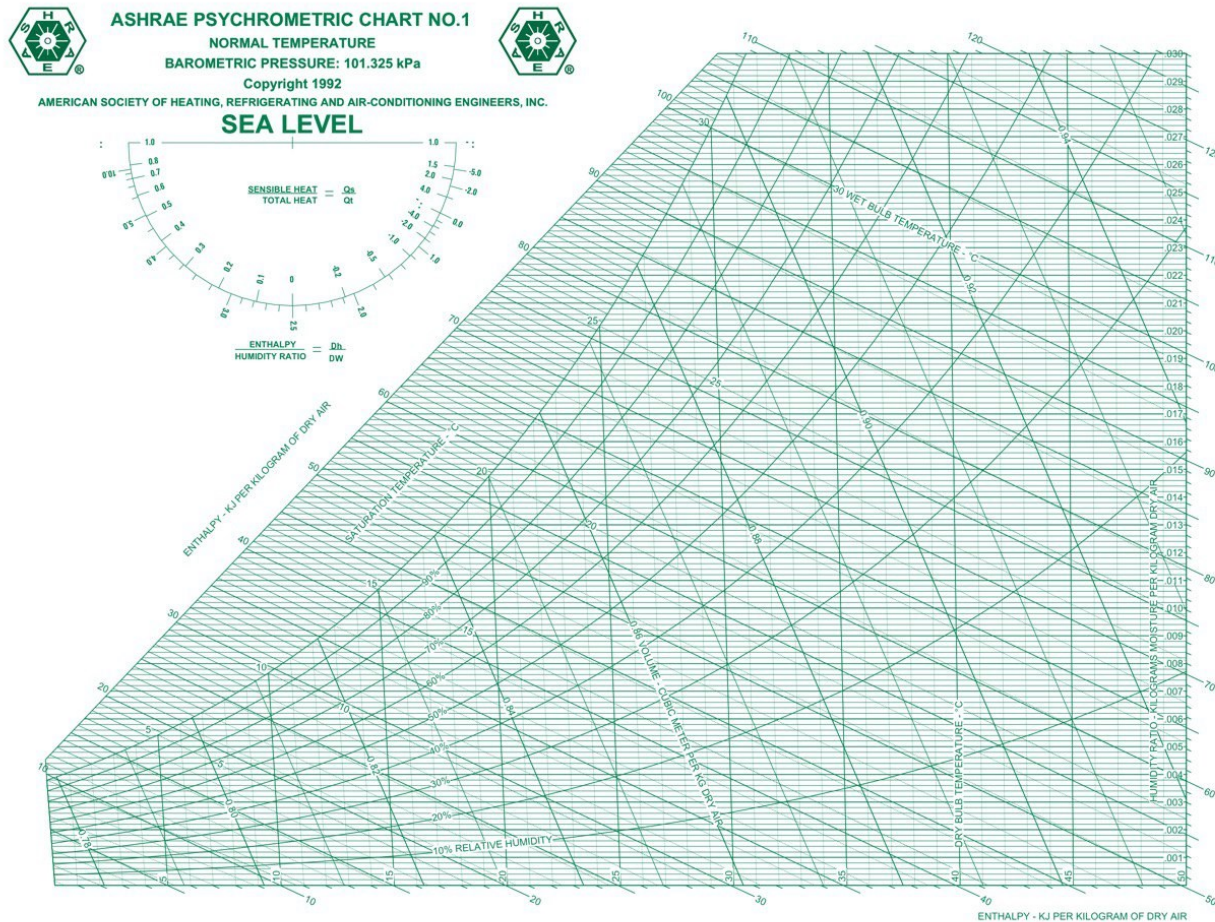
La PdC è una macchina grazie alla quale possiamo appunto «pompare» calore da una fonte con temperatura più bassa ad una a temperatura più alta. Essa si basa su un ciclo frigo, dove un fluido refrigerante viene espanso e condensato.

Questi procedimenti richiedono che la batteria esterna dell'evaporatore sia a una temperatura minore della fonte da cui preleviamo calore.



Questa fonte nel nostro caso di studio è **aria esterna**, le cui caratteristiche sono variabili sia a seconda del meteo sia a seconda della stagione, oltre che alla posizione geografica.





Utilizzando un comune diagramma psicometrico sappiamo che l'aria esterna è una miscela composta da aria e vapore acqueo.

Quando in inverno si raggiungono basse temperature la batteria esterna può riscontrare fenomeni di brinamento. Questo è un fenomeno di sublimazione inversa dovuta alle basse temperature sulla superficie dell'evaporatore, più basse della temperatura a bulbo umido dell'aria.

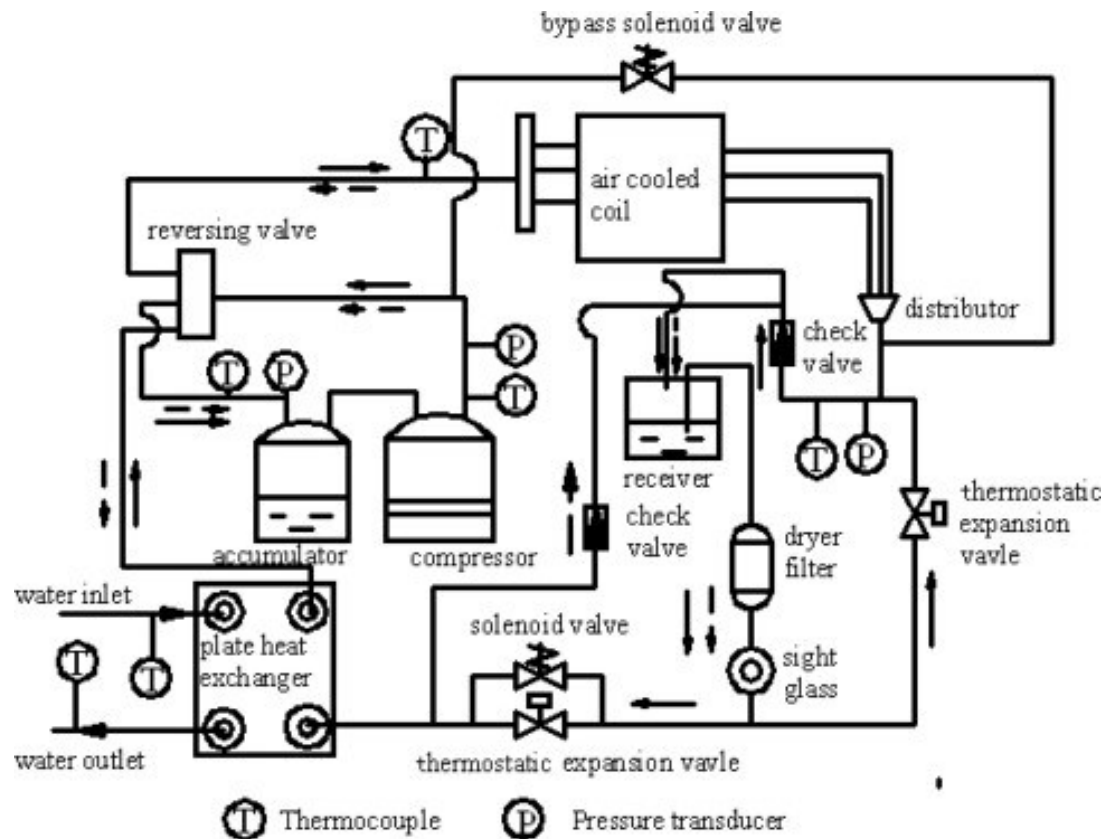
Problemi dovuti alla presenza di brina:

- Blocco o riduzione flusso d'aria sullo scambiatore
- Maggiori potenze di compressore e ventilatore
- Diminuzione calore trasferito e potenza termica fornita
- Diminuzione temperatura e pressione aspirazione compressore

In generale possiamo assistere a una diminuzione del COP del 35-60 % e ad una riduzione della potenza termica fornita dalla PdC del 35-57 %, il che comporta un enorme spreco nei consumi e una situazione di discomfort per l'utenza.

Per ovviare a questo problema si possono utilizzare alcuni metodi di defrosting per eliminare la brina presente sulla batteria esterna quali:

- Defrosting con resistenze elettriche
- Defrosting con inversione di ciclo
- Defrosting con bypass di gas caldo



Nello specifico andiamo ad analizzare la differenza tra l'utilizzo di un'inversione di ciclo e l'uso di un bypass del fluido refrigerante caldo.

Il metodo con **inversione di ciclo** consiste nell'invertire il flusso del fluido refrigerante con una valvola a 4 vie per scambiare i ruoli di condensatore ed evaporatore. Per un periodo limitato viene esportato calore dall'ambiente interno per rilasciarlo dall'evaporatore esterno a ventilatori spenti, così da sbrinarne le superfici.

Per migliorare il procedimento posso apportare delle modifiche quali:

- Aumentare diametro tubo evaporatore in entrata per diminuire il tempo di defrosting
- Spaziare le alette dell'evaporatore e utilizzare rivestimenti idrofobi (minore brina)
- Bypass della valvola di espansione termostatica (TEV) con una valvola a solenoide (inibisce l'arresto delle protezioni di bassa pressione)
- Utilizzo di un compensatore di carica al posto dell'accumulo per avere una portata disponibile di fluido refrigerante maggiore quando ne ho bisogno.

L'inversione di ciclo ha degli svantaggi:

La variazione di pressione e temperatura nell'impianto può creare degli shock meccanici e instabilità nel flusso di fluido refrigerante, nonché rumori dovuti al riequilibrio delle pressioni.

Inoltre ho un discomfort interno dovuto al calore sottratto, anche a fine ciclo.

In un impianto con **bypass di gas caldi** invece bypasso il condensatore interno senza invertire il ciclo: il fluido dal compressore torna caldo all'evaporatore miscelandosi e sbrinando la superficie, essendo più caldo. Per farlo necessito di un accumulo per evitare al compressore l'aspirazione di fluido refrigerante allo stato liquido e per ricavare eventuale calore di supporto presente nel fluido stesso. Esso richiede tempi di defrosting 3 volte maggiori.

Possiamo ora vedere vari dati a confronto, considerando:

- HGBD** = Defrosting con bypass gas caldo
- RCD** = Defrosting a inversione di ciclo

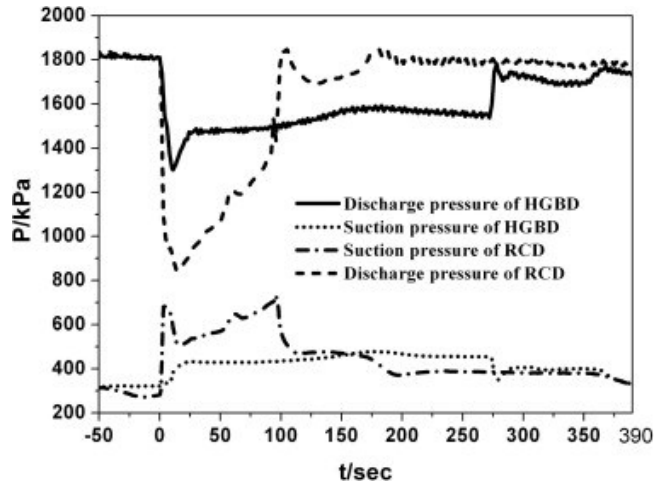


Fig. Andamento delle pressioni di aspirazione e mandata compressore.

In questo grafico possiamo vedere per il ciclo RCD una variazione di pressione maggiore e più repentina rispetto al ciclo HGBD. Possiamo anche notare come le pressioni abbiano bisogno di tempo per stabilizzarsi a fine sbrinamento.

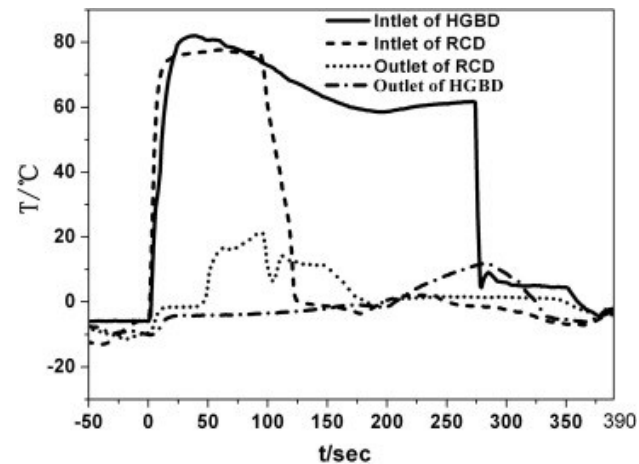


Fig. Andamento temperatura input ed output fluido refrigerante (alla batteria esterna)

In input possiamo vedere che nel caso RCD la temperatura si mantiene stabile mentre nel caso HGBD cala man mano.

Guardando l'output possiamo notare che in entrambi i cicli, dopo aver passato gli zero gradi, il fluido refrigerante aumenta di temperatura più o meno velocemente, per via della mancanza di brina da sciogliere.



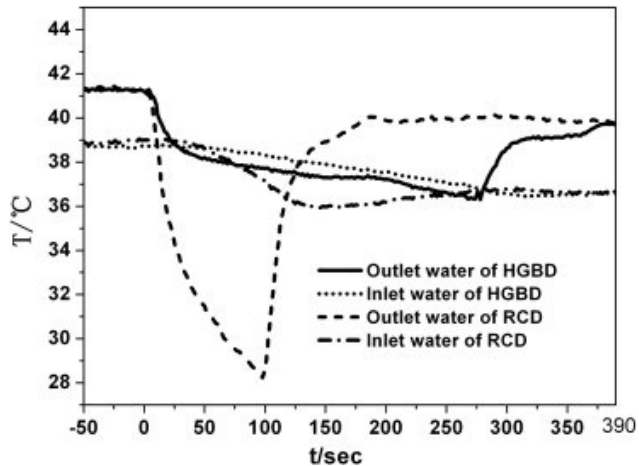


Fig. Temperatura di input e output dell'acqua nel condensatore (lato interno, utenza)  
Possiamo qui confrontare la temperatura dell'acqua per quanto riguarda il condensatore, solitamente utilizzata per impianti di riscaldamento a bassa temperatura (es. Impianti a pavimento). Per il ciclo RCD ho una variazione di temperatura maggiore e questa può creare problemi. Questi problemi si possono parzialmente risolvere con impianti ibridi (PdC accoppiata con caldaia istantanea).

Se si sceglie di utilizzare comunque un ciclo RCD (più comune nelle applicazioni civili) si possono utilizzare per il defrosting diversi metodi di controllo basati su:

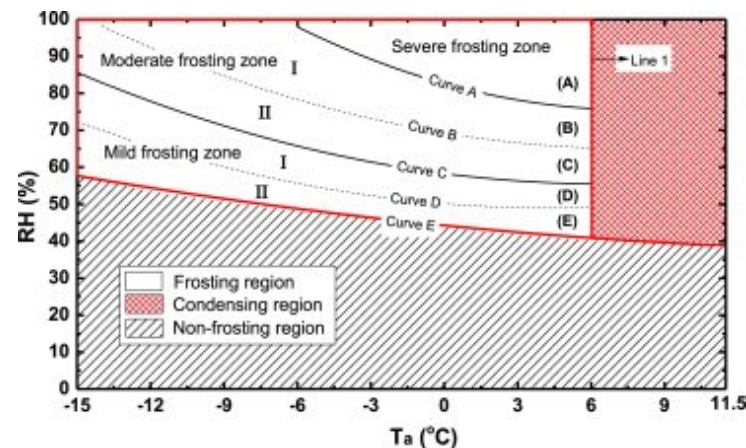
- Temperatura e Tempo (TT)
- Variazione di pressione
- Grado di surriscaldamento del refrigerante
- Potenza richiesta dal ventilatore
- Spessore della brina

Il **metodo TT** è tradizionalmente il più usato. Si basa sulla temperatura superficiale della batteria esterna e comanda la frequenza dei vari cicli di defrosting nel caso si utilizzi l'inversione di ciclo.

Sebbene sia il più semplice si è riscontrato che questo metodo non è ottimale. Infatti il 27% dei cicli si sono azionati senza la presenza visiva di brina sulle batterie e il 68% degli sbrinamenti sono risultati tecnicamente non necessari.

Questi azionamenti non necessari portano a uno spreco di energia, con un relativo coefficiente di prestazione (COP) mediamente più basso.

Si è voluto testare poi il **metodo THT**, aggiungendo come parametro da elaborare anche l'umidità relativa dell'aria esterna.



Dividendo in zone una mappa di formazione di brina possiamo calcolare un tempo di intervallo tra cicli di sbrinamento più efficace, tenendo conto della diversa velocità di sublimazione inversa.

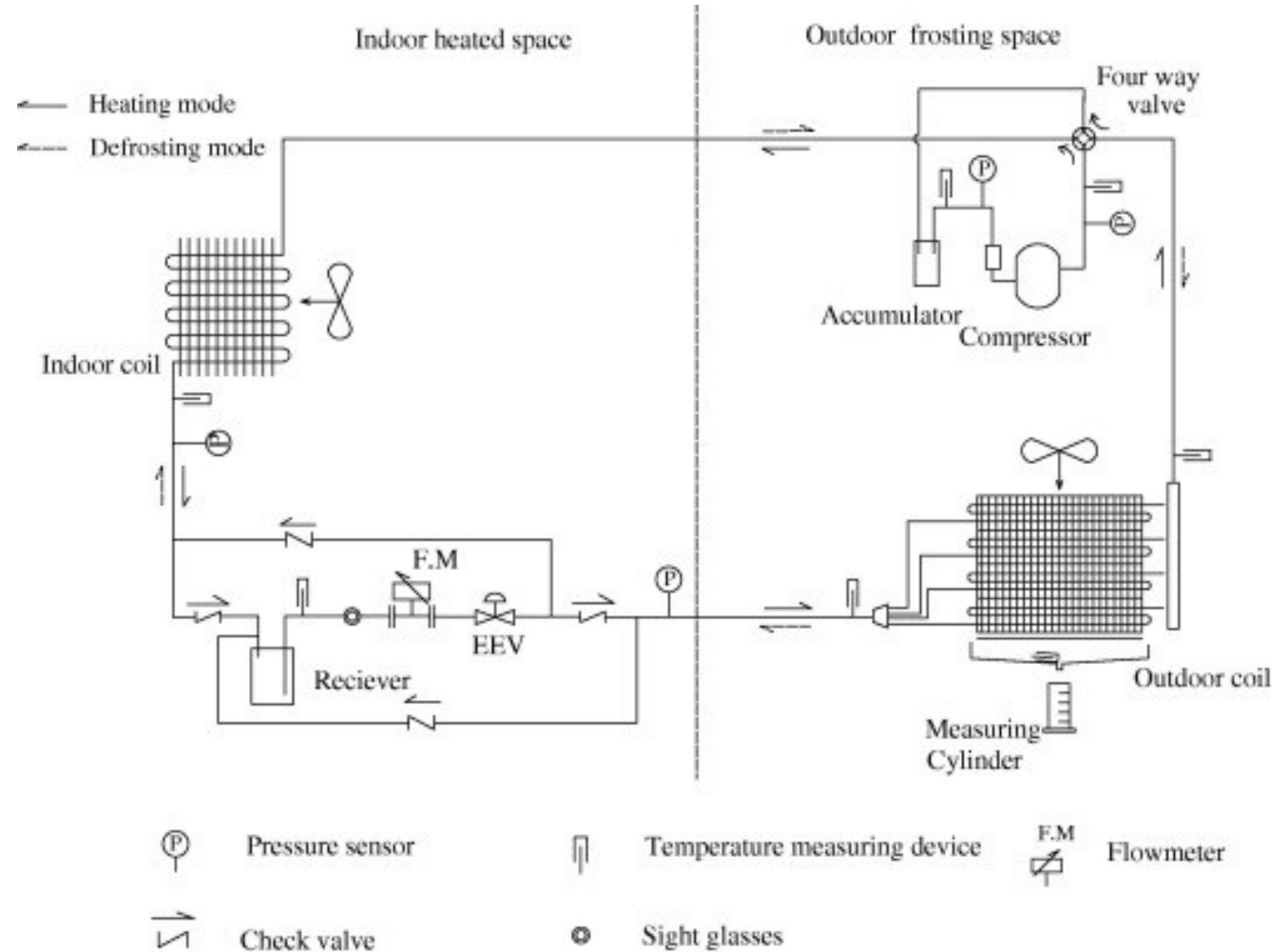
Con questo metodo si è ridotto l'energia totale spesa per il defrosting del 35% con un incremento di COP dal 4,6 al 5,3%

**Table 1 – Reference defrosting intervals for the ASHP unit working in different frosting zones.**

Frosting zones	Reference defrosting intervals (min)
Severe frosting zone (A)	$t_{def} \leq 30$
Moderate frosting zone I (B)	$30 \leq t_{def} \leq 45$
Moderate frosting zone II (C)	$45 \leq t_{def} \leq 90$
Mild frosting zone I (D)	$90 \leq t_{def} \leq 150$
Mild frosting zone II (E)	$150 \leq t_{def} \leq 240$

Un altro modo per migliorare le prestazioni della PdC è l'utilizzo di una elettrovalvola di espansione (EEV) con apertura regolabile. Per regolare la sua apertura si misura la temperatura di evaporazione e il grado di surriscaldamento del liquido refrigerante.

In questo modo posso assicurare che il compressore non abbia all'aspirazione fluido allo stato liquido (ho uno stato di vapore surriscaldato) anche in caso di variazioni di carico, e posso permettermi di controllare la portata di fluido refrigerante.



**Table 2**

Measured defrosting performance of the experimental ASHP unit under the two EEV control strategies.

Performance parameter	Strategy A	Strategy B	Unit
Defrost duration period, $T$	590	575	s
Total output heat during defrosting, $Q_d$	2628.0	1769.4	kJ
Electricity consumption during defrosting, $W_d$	604.6	592	kJ
Calculated mass of accumulated frost, $M_f$	1.34	1.34	kg
Collected melted frost	1.22	1.22	kg
Water vaporized, $M_v$	0.12	0.12	kg
$COP_d$	4.35	2.98	–
Defrost efficiency, $\eta_d$	28.2	42.9	%

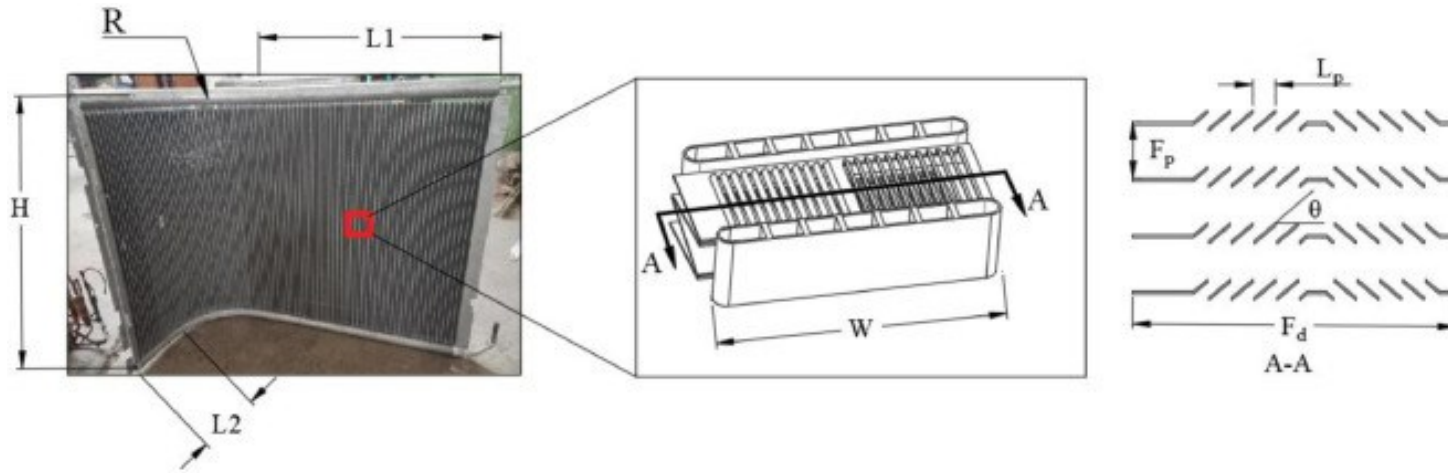
Strategy A: EEV fully open; Strategy B: EEV regulated by DS controller.

Strategia A: EEV 100% aperta

Strategia B: EEV regolata da 30% a 100%

Considero **COP<sub>d</sub>** come coefficiente di prestazione del ciclo di defrosting, uguale al rapporto tra calore ceduto per lo sbrinamento fratto il consumo elettrico, il tutto relativo al solo periodo di defrosting.

Considero poi l'efficienza di defrosting  **$\eta_d$**  come il rapporto tra il calore necessario a sciogliere la brina e ad evaporare la massa di acqua persa (calcolate e raccolte alla batteria durante i test) fratto il calore effettivamente ceduto dalla PdC alla batteria durante il defrosting.

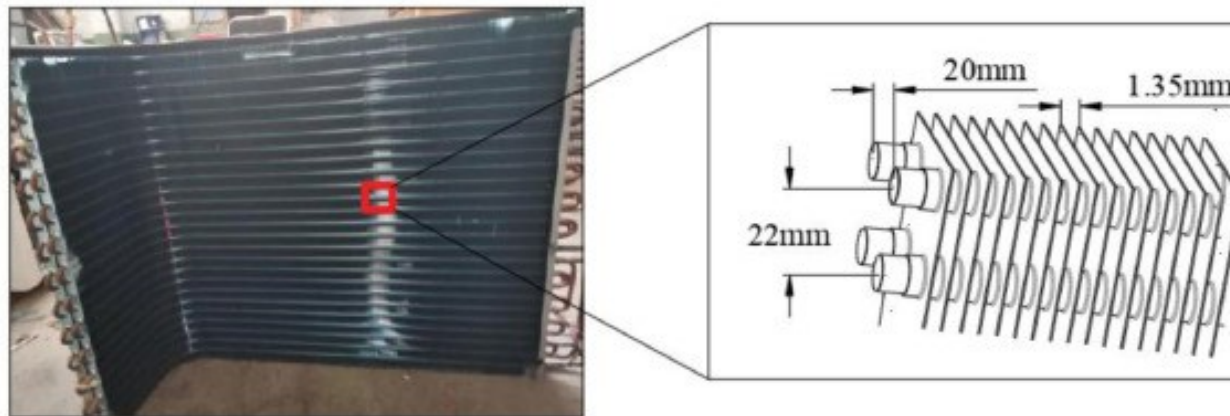


(a) MCHX structure

Con l'intento di migliorare l'utilizzo della PdC si deve tener conto anche della scelta dello scambiatore esterno che funge da evaporatore.

I modelli di scambiatore più utilizzati sono:

- **FTHX** = Scambiatore a tubi alettati (batterie)
- **MCHX** = Scambiatore a microcanali (piattine cave)

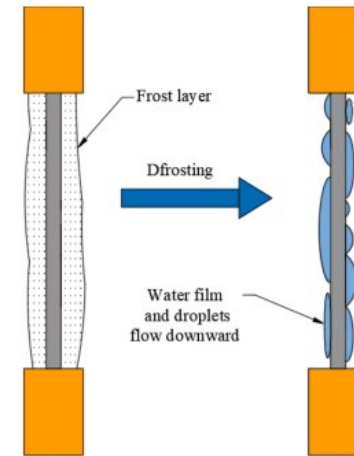


(b) FTHX structure

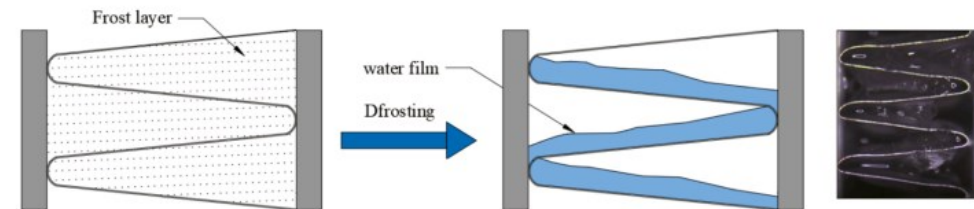


Studi rivelano che, malgrado la tipologia MCHX accumuli meno brina e abbia uno scambio termico maggiore (dovuto alla maggior superficie), essa non è così performante quando si lavora in un ciclo di sbrinamento. Essa infatti ha un minor drenaggio della brina sciolta che comporta un aumento del tempo di defrosting, un'efficacia minore e una temperatura sulla superficie dell'unità esterna più bassa, dovuta alla presenza di acqua non ancora evacuata.

In generale per questi scambiatori possiamo vedere un'efficienza di defrosting del 22,9% minore e tempi di sbrinamento e messa a regime maggiori rispetto agli FTHX. Sono necessari ulteriori studi per ovviare al problema del drenaggio.



(a) FTHX drainage characteristics



(b) MCHX drainage characteristics

- Questo documento ci fa capire che possiamo migliorare l'utilizzo delle pompe di calore, utilizzando un metodo di bypass con gas caldo invece del sistema tradizionale a inversione di ciclo. Nel caso si utilizzasse comunque un'inversione di ciclo per ovviare al problema della brina si può in alternativa decidere di applicare metodi di controllo diversi e cambiare i componenti dell'impianto.
- Come metodi di controllo abbiamo analizzato delle regolazioni basate sia su parametri di temperatura ed umidità relativa di aria esterna ed evaporatore (per decidere il tempo di intervallo tra cicli di defrosting) sia sul grado di surriscaldamento in aspirazione al compressore (grazie al quale regolare una valvola di espansione elettronica).
- Importante è anche la scelta delle batterie/scambiatori utilizzabili lato esterno, di come questi si prestino bene in funzionamento a regime ma hanno dei problemi di efficienza durante il ciclo di defrosting. Ciò infatti richiede ulteriori studi.

Le pompe di calore su cui si basano gli studi erano tutte di piccola e media taglia, come quelle utilizzate in ambito civile e residenziale. Si è deciso di analizzare questi studi perché esse in quel contesto portano importanti vantaggi dal punto di vista energetico, e quindi è essenziale soffermarsi sui vari dettagli che permettano alla macchina di lavorare nel migliore dei modi.

- a) Comparison between hot-gas bypass defrosting and reverse-cycle defrosting methods on an air-to-water heat pump, Dong Huang, Quanxu Li, Xiuling Yuan (Fig. pagina 3,6,8,9)
- b) A novel Temperature Humidity Time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps, Jiahe Zhu, Yuying Sun, Wei Wang, Yijing Ge, Lintao Li, Jingdong Liu (Fig. pagina 10, Table 1)
- c) An experimental investigation on reverse-cycle defrosting performance for an air source heat pump using an electronic expansion valve, Minglu Qu, Liang Xia, Shiming Deng, Yiqiang Jiang (Fig. pagina 11, Table 2)
- d) Comparison of energy supplies and consumptions in heat pump systems using finned tube and microchannel heat exchangers during defrosting, Tong Xiong, Yuzheng Ying, Binglong Han, Gang Yan, Jianlin Yu (Fig. pagina 13,14)
- e) Manuale del termotecnico, Nicola Rossi, Editore Ulrico Hoepli Milano (Fig. pagina 4 )
- f) Termodinamica applicata Alberto Cavallini, Lino Mattarolo (Fig. pagina 2)
- g) Diagramma psicometrico ASHRAE (Fig. pagina 5)