



# CONVEGNO ANIMP Sezione Energia - ATI Lombardia **EoE ELECTRIFICATION of EVERYTHING**

 POLITECNICO DI MILANO



## Pompe di calore sì, ma con quale configurazioni?

**Ennio Macchi**

Professore emerito nel Politecnico di Milano

***5 ottobre 2017***

***Crowne Plaza Hotel, San Donato Mil.se***



### Contenuti della presentazione:

- Definizione
- Schema di principio
- Quando una pompa di calore si definisce «reversibile»
- I due cicli termodinamici di base e le relative sorgenti di energia
- I pozzi di calore
- Le prestazioni energetiche ideali e reali
- Un'opportunità: abbinare le due modalità «intelligenti» di produrre calore a bassa temperatura (cogenerazione e pompa di calore)
- Un problema aperto per il futuro: quali fluidi di lavoro?



# Definizione

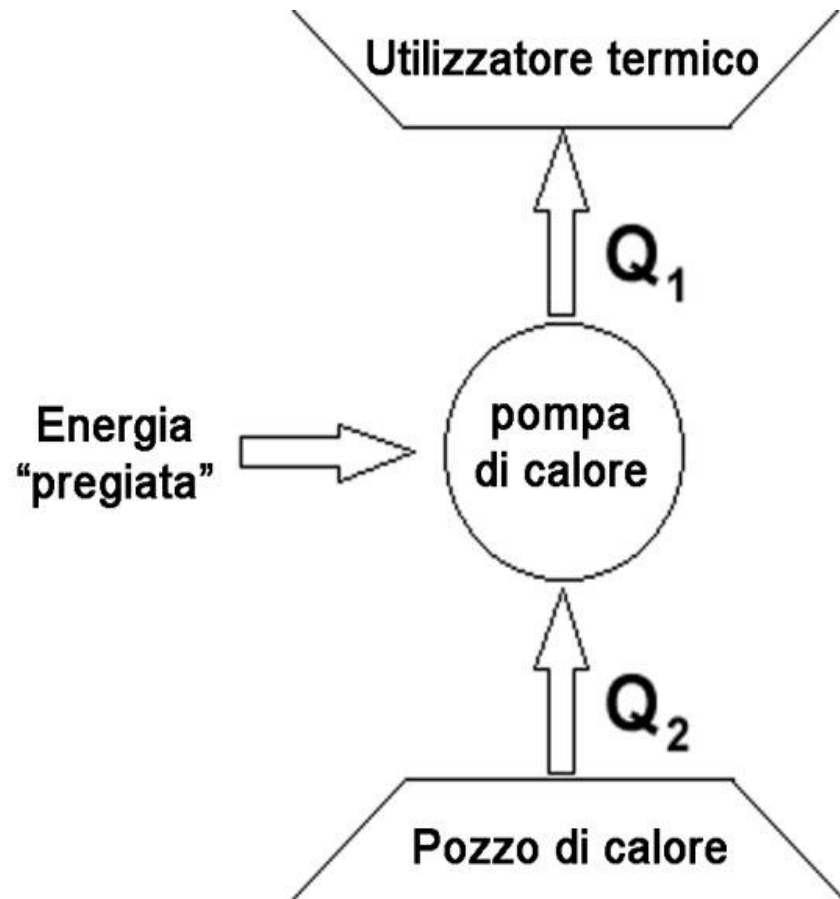
Si definisce genericamente **“pompa di calore”** un sistema che trasferisce energia termica da un **“pozzo di calore”** a bassa temperatura a un **utilizzatore** che richiede energia termica a temperatura superiore.

Detto trasferimento avviene grazie a un ciclo termodinamico **“inverso”**, che richiede un'introduzione di energia **“pregiata”**.



## Schema di principio di una pompa di calore a compressione

Si definisce **inverso** un ciclo termodinamico che, diversamente da un ciclo di potenza, ha un **percorso antiorario** nel piano termodinamico: a bassa temperatura riceve calore, ad alta temperatura lo cede. Richiede, invece di produrre, lavoro meccanico.





Se serve sia caldo che freddo, la pompa di calore è reversibile,

Poiché è basata su un ciclo inverso, una pompa di calore destinata alla climatizzazione può operare, a seconda delle condizioni climatiche, anche come ciclo frigorifero: la fase di introduzione di calore nel ciclo diventa l'effetto utile e quella di cessione di calore avviene dissipando energia termica verso il pozzo di calore: in questo caso, **la pompa di calore si chiama «reversibile»**.



## **meglio se la richiesta è contemporanea!**

Meno comune è la possibilità che entrambi gli scambi di calore del ciclo inverso – o una frazione di essi – siano utilizzati (ad esempio, la contemporanea presenza di domanda di freddo e caldo nel sistema di climatizzazione di un edificio, la contemporanea richiesta di freddo e caldo in un supermercato, ..).



# Classificazione: 1. ciclo termodinamico e sorgente energetica

**Ciclo termodinamico:** due grandi famiglie

- **a compressione**

sorgente di energia: energia meccanica/elettrica:

- importata dalla rete elettrica
- autoprodotta (cogenerativa?)

- **ad assorbimento**

Sorgente di energia: energia termica ad alta temperatura

- da combustibile (*da fiamma diretta*)
- da recupero termico



## Classificazione: 2. pozzo di calore

### Aria:

- ambiente esterna

### Vantaggi:

- Disponibilità infinita

### Svantaggi: Bassi coefficienti di scambio

Temperatura variabile nel corso dell'anno

Formazione di brina se la temperatura di evaporazione è negativa

- di espulsione (edifici con grande ricambio d'aria)

### Acqua di falda:

**Vantaggi:** meglio dell'aria per tutti i punti sopra indicati

### Svantaggi:

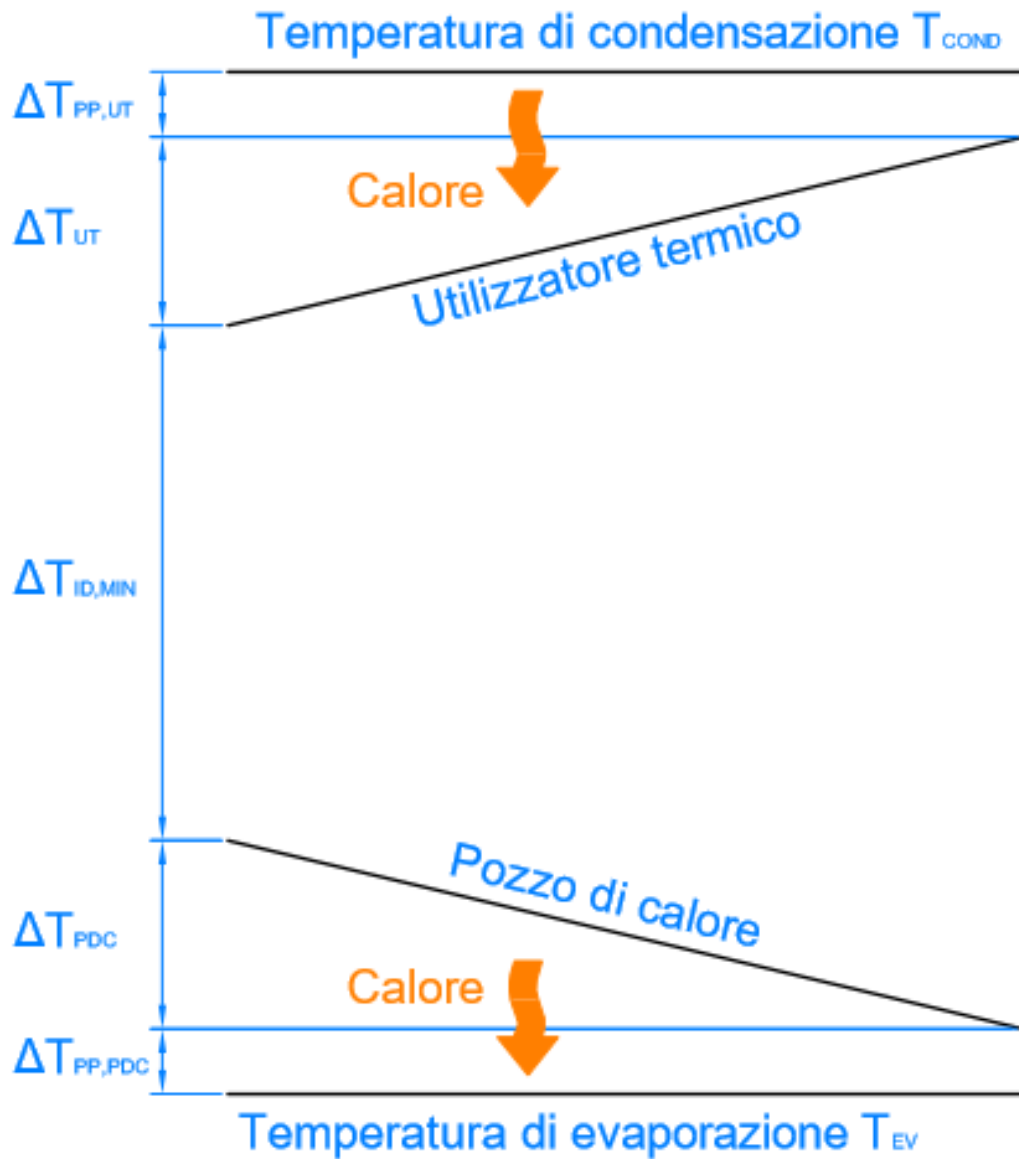
- Disponibilità limitata
- Alti costi
- Permessi (prelievo e reimmissione)

### Terreno: tanti svantaggi!





# Andamento delle temperature





# Condizioni ottimali (temperatura esterne mite, sistema distribuzione calore a bassa temperatura 30/25)

		pompa di calore aria/acqua, condizioni ambiente medie	pompa di calore acqua/acqua di grande taglia
T massima del pozzo di calore	°C	10	14
T minima utilizzatore	°C	25	25
$\Delta T_{id,min}$	°C	15	11
<b>COP<sub>id,max</sub></b>		<b>19,88</b>	<b>27,10</b>
$\Delta T_{PdC}$	°C	6	5
$\Delta T_{min,PdC}$	°C	4	2
$\Delta T_{iut}$	°C	5	5
$\Delta T_{min,ut}$	°C	2	2
T media utilizzatore	°C	28	27,5
T media pozzo di calore	°C	7	11,5
$\Delta T_{id}$	°C	21	16
<b>COP<sub>id,glide</sub></b>	-	<b>14,34</b>	<b>18,79</b>
T <sub>ev</sub>	°C	0	7
T <sub>cond</sub>	°C	32	32
<b>COP<sub>carnot</sub></b>	-	<b>9,54</b>	<b>12,21</b>
$\chi = COP_{rea}/COP_{carnot}$	-	0,45	0,75
<b>COP<sub>rea</sub></b>	-	<b>4,29</b>	<b>9,15</b>



## Condizioni medie (5°C e 40/25)

		pompa di calore aria/acqua, condizioni ambiente fredde	pompa di calore acqua/acqua di grande taglia
T massima del pozzo di calore	°C	5	14
T minima utilizzatore	°C	35	35
$\Delta T_{id,min}$	°C	30	21
<b>COP<sub>id,max</sub></b>		<b>10,27</b>	<b>14,67</b>
$\Delta T_{PdC}$	°C	6	5
$\Delta T_{min,PdC}$	°C	4	2
$\Delta T_{i,ut}$	°C	5	5
$\Delta T_{min,ut}$	°C	2	2
T media utilizzatore	°C	38	37,5
T media pozzo di calore	°C	2	11,5
$\Delta T_{id}$	°C	36	26
<b>COP<sub>id,glide</sub></b>	-	<b>8,64</b>	<b>11,95</b>
T <sub>ev</sub>	°C	-5	7
T <sub>cond</sub>	°C	42	42
<b>COP<sub>carnot</sub></b>	-	<b>6,71</b>	<b>9,00</b>
$x = COP_{rea} / COP_{carnot}$	-	0,45	0,75
<b>COP<sub>rea</sub></b>	-	<b>3,02</b>	<b>6,75</b>



# Fondamentale il sistema di utilizzazione del calore a bassa temperatura!

		pompa di calore aria/acqua, condizioni ambiente fredde	pompa di calore acqua/acqua di grande taglia
T massima del pozzo di calore	°C	5	14
T minima utilizzatore	°C	60	60
$\Delta T_{id,min}$	°C	55	46
<b>COP<sub>id,max</sub></b>		<b>6,06</b>	<b>7,24</b>
$\Delta T_{PdC}$	°C	6	5
$\Delta T_{min,PdC}$	°C	4	2
$\Delta T_{i,ut}$	°C	20	20
$\Delta T_{min,ut}$	°C	2	2
T media utilizzatore	°C	63	62,5
T media pozzo di calore	°C	2	11,5
$\Delta T_{id}$	°C	61	51
<b>COP<sub>id,glide</sub></b>	-	<b>5,51</b>	<b>6,58</b>
T <sub>ev</sub>	°C	-5	7
T <sub>cond</sub>	°C	82	82
<b>COP<sub>carnot</sub></b>	-	<b>4,08</b>	<b>4,74</b>
$\chi = COP_{rea}/COP_{carnot}$	-	0,45	0,75
<b>COP<sub>rea</sub></b>	-	<b>1,84</b>	<b>3,55</b>



### **Criteri di dimensionamento convenzionali di un impianto di cogenerazione per residenziale/terziario**

1. Si dimensiona il sistema di cogenerazione per la domanda media di richiesta termica
2. Si conduce l'impianto con la logica «termico-guida»
3. Si dimensiona la pompa di calore su una condizione media, affidando la rimanente quota alle caldaie

### **Conseguenze**

- Per molte ore all'anno, si devono utilizzare le caldaie per soddisfare la domanda termica
- Per molte ore all'anno (sempre, d'estate), la potenza elettrica generata è insufficiente, a volte è eccessiva e a volte va ceduta alla rete



# Un'opportunità: abbinare le due modalità «intelligenti» di produrre calore a bassa temperatura (cogenerazione e pompa di calore)

## Opportunità normative/tariffarie

1. gli oneri di sistema (molto elevati) non si pagano per l'elettricità auto-consumata (l'elettricità autoprodotta costa poco)
2. L'accisa sul gas naturale destinato alle caldaie è elevata (la valorizzazione del calore cogenerato o generato dalle PdC è elevata)

## Criteri di dimensionamento/conduzione innovativi

1. Si dimensiona il sistema di cogenerazione per la punta della richiesta elettrica (in estate)
2. Si dimensiona la pompa di calore per la domanda termica di punta
3. Si conduce l'impianto con la logica «**elettrico totale-guida**», dove la domanda elettrica è la somma della domanda elettrica e dell'input elettrico richiesto dalla pompa di calore per soddisfare la domanda termica eccedente il calore cogenerato
4. Quando la richiesta elettrica totale è maggiore della potenza del cogeneratore, si acquista l'energia elettrica mancante dalla rete
5. Le caldaie operano solamente in caso di indisponibilità del cogeneratore e/o della pompa di calore
6. Va valutato se in estate convenga dissipare il calore cogenerato o installare anche un frigorifero ad assorbimento



## Un problema aperto per il futuro: quali fluidi di lavoro?

Prima degli anni '90, tutti usavano i CFC (freon), fluidi ottenuti da idrocarburi alogenati, per le ottime caratteristiche termodinamiche, fino a quando si è scoperto che **distruggono l'ozono** presente nella stratosfera

Successivamente, si è passati agli idroclorofluorocarburi (HCFC), ottenuti mediante sintesi a partire da idrocarburi con sostituzione di atomi di idrogeno con fluoro e cloro

Poi agli idrofluorocarburi (HFC), senza cloro

Poi idro-fluoro-olefine (HFO)

In futuro: solo  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$ ?

,



**GRAZIE PER L'ATTENZIONE!**