

# Pompe di Calore

LIUC – 7 Ottobre 2009  
Paolo Torri

# Cos'è

## POMPA DI CALORE

**La pompa di calore è una macchina in grado di trasferire calore da un corpo a temperatura più bassa ad un altro a temperatura più alta.**

# Storia

## POMPE DI CALORE

**1755 -William Cullen (Scozia):** forma il ghiaccio facendo evaporare acqua sotto vuoto

**1805 -Oliver Evans (USA):** invenzione del ciclo a compressione

**1834 -Jacob Perkins (USA):** primo brevetto su macchine a compressione

**1842-John Gorrie (USA):** prima macchina a compressione per condizionare un ospedale

**1850 -Edmond Carrè (Francia):** macchina discontinua per fare il ghiaccio ad H<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

**1859 -Ferdinand Carrè (Francia):** macchina continua ad H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>

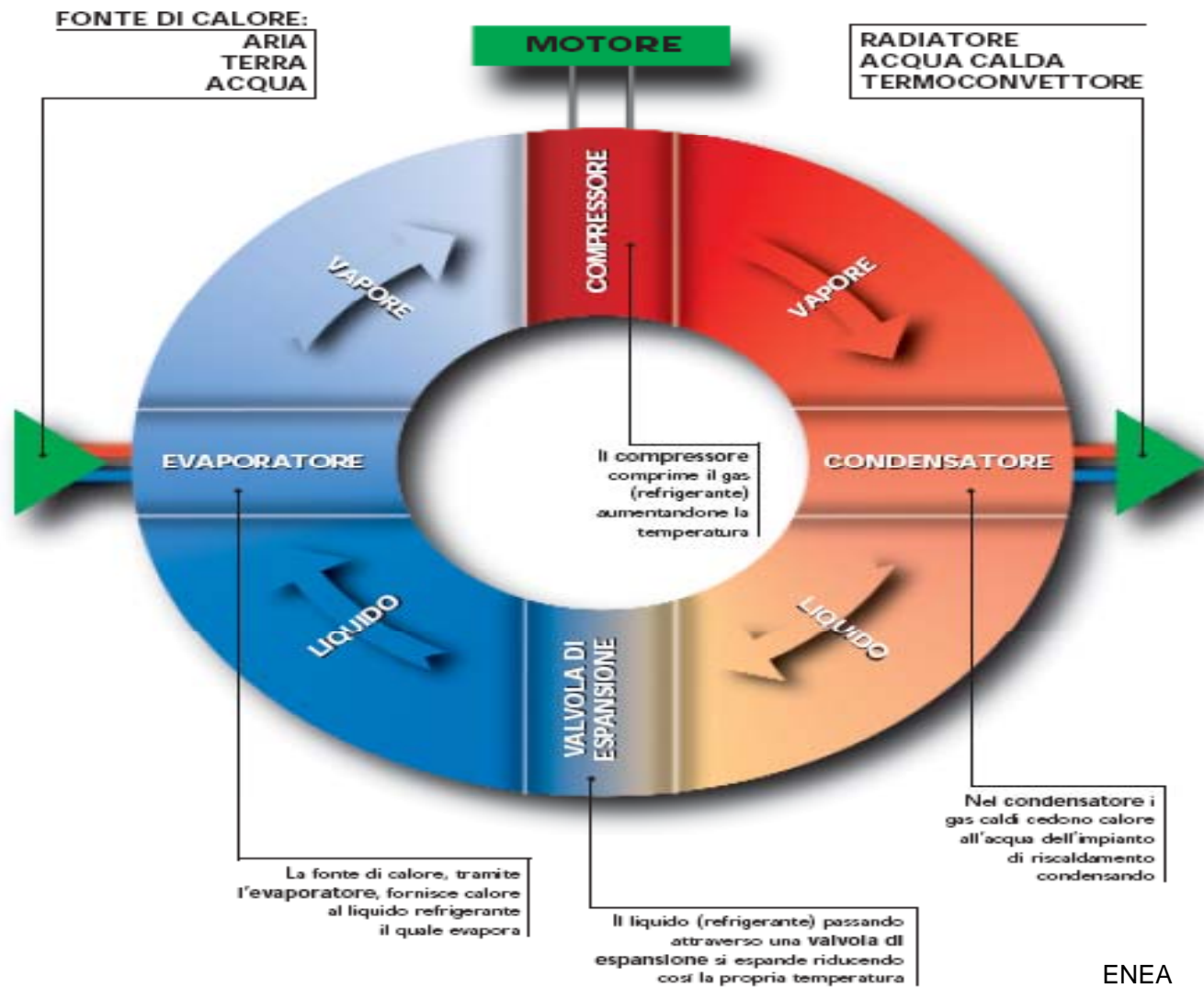
**1920 -Vengono adottati i CFC nelle macchine a compressione**

**~1940 –Compaiono i primi chillers ad Assorbimento negli USA**

**1970 – prime macchine ad assorbimento (ARKLA )**

**1997 -Protocollo di Kyoto: problema dei gas serra**

# Come Funziona



# Come Funziona

**Compressione**, che avviene somministrando energia dall'esterno, durante la quale il fluido refrigerante allo stato gassoso aumenta di pressione e temperatura

**Condensazione**: il fluido refrigerante attraversa uno scambiatore di calore o condensatore e cede il calore alla sorgente calda passando dallo stato di vapore a quello di liquido.

**Espansione**: il fluido refrigerante, liquido e in pressione, attraversa una valvola che lo introduce in una camera di espansione (processo di laminazione) in cui subisce una riduzione di pressione e di temperatura.

**Evaporazione**: il fluido passa dallo stato liquido a quello di vapore, prelevando energia dalla sorgente termica fredda

# Come Funziona

*Fluidi Frigorigeni*

*Acqua: temperatura di congelamento a 0°C*

*Ammoniaca: esplosiva, corrosiva e “tossica”*

*Idrocarburi alogenati: non tossici, non esplosivi es. HFC  
Idrofluorocarburi*

*Clorofluorocarburi CFC: dannosi per l'Ozono*

*Anidride carbonica: alte pressioni di esercizio*

# “Rendimento”

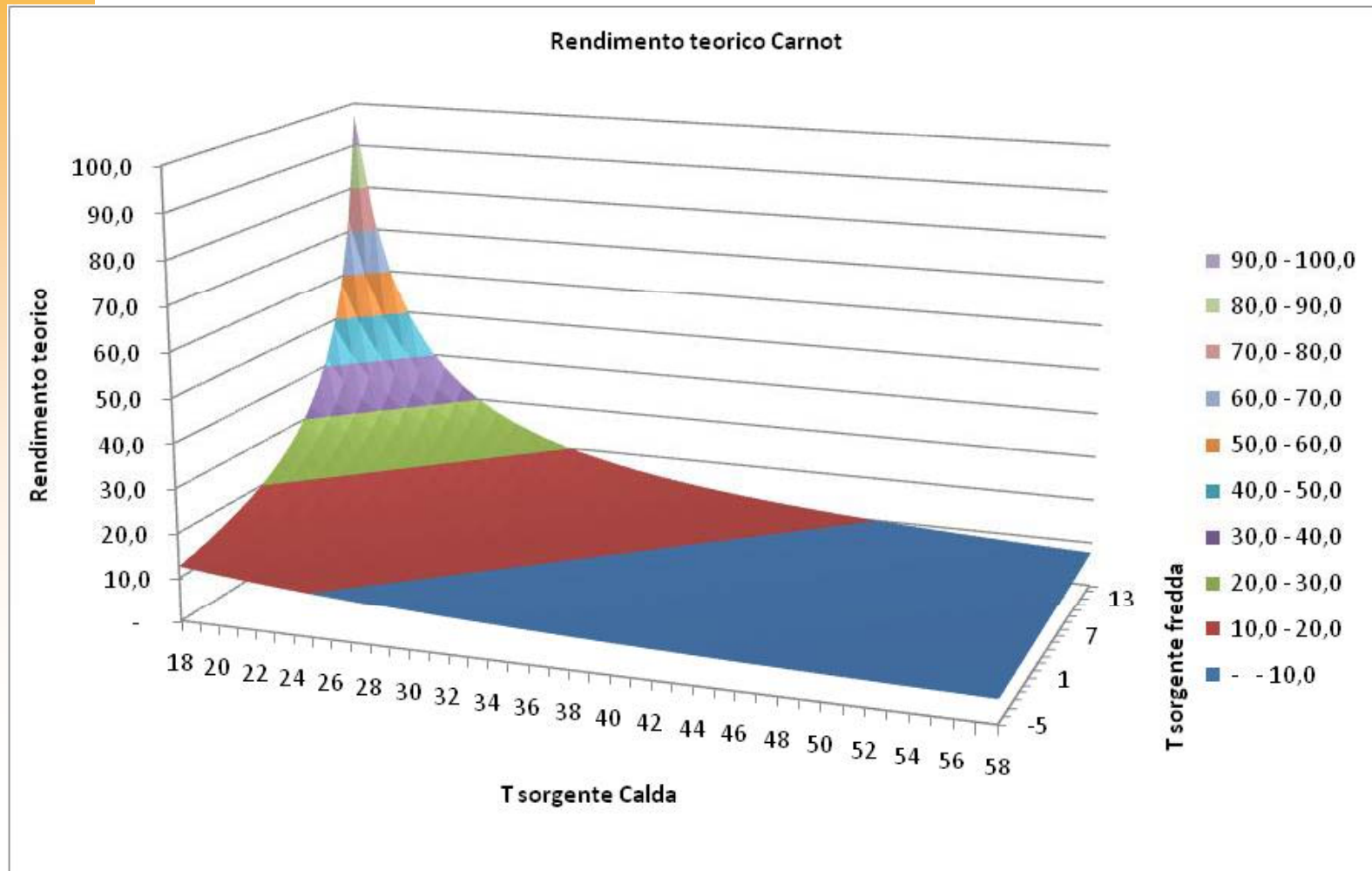
*Coefficiente di Prestazione (COP) - rapporto tra energia fornita ed energia consumata*

- inversamente proporzionale alla differenza tra la temperatura della sorgente e la temperatura dell'utilizzatore

- *Rendimento*  $\leq$  *rendimento Carnot*

$$COP_{reale} \leq \frac{T_{calda}}{T_{calda} - T_{fredda}}$$

# “Rendimento”





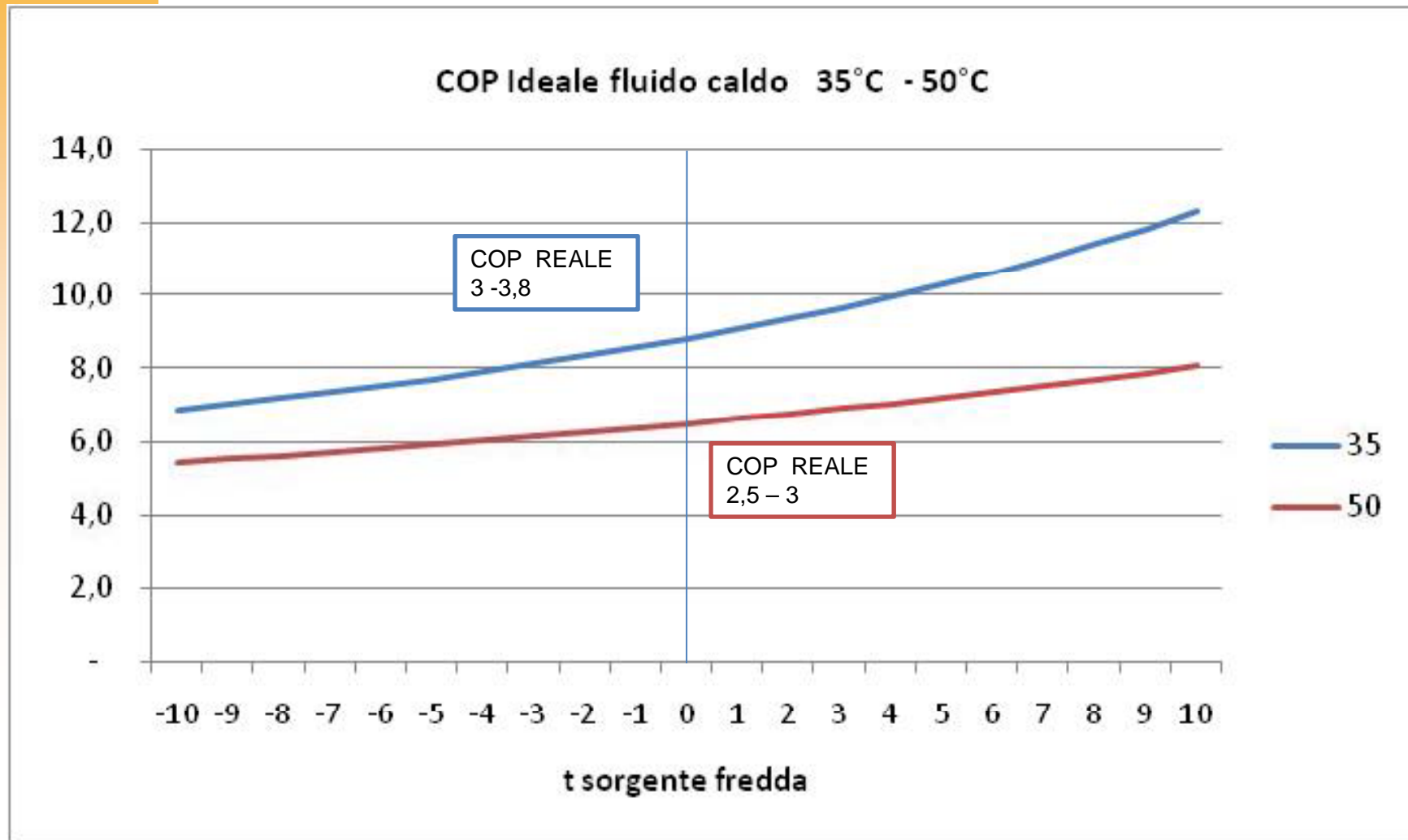
# “Rendimento”

Un ciclo ideale è completamente reversibile:

- nessuna caduta di pressione per attrito;
- COP massimo
- il refrigerante fluisce a pressione costante attraverso il condensatore e l'evaporatore;
- la compressione è isoentropica;
- l'espansione è adiabatica.

La differenza principale tra ciclo ideale e ciclo reale sta nel processo di compressione: nel ciclo reale la compressione è solo adiabatica e l'entropia aumenta.

# “Rendimento”



# “Rendimento”

COP = 3

1 unità di energia utilizzata → 3 unità di energia ricavate

L'energia non viene “creata” ma “spostata” dalla sorgente fredda alla sorgente calda

- **aria-acqua** (aria a 2°C e acqua a 35°C ) COP = 3
- **terra-acqua** / sonda geotermica (sonda a 0°C e acqua a 35°C)  
COP = 4
- **acqua-acqua** (con acqua di prelievo del calore a 10°C e fornitura d'acqua a 35°C) COP = 4.5

# Tipologie

## Modalità di alimentazione

Pompe di calore a compressione

Pompe di calore ad assorbimento

(Pompe di calore alimentate da motori a combustione interna)

## Sorgente Utilizzata

Aria

Acqua

Terreno

Altri fluidi (cascami termici)

# Tipologie

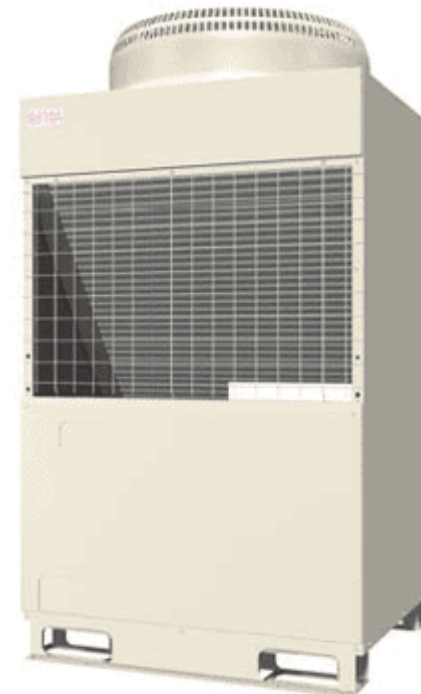
Modalità di compressione

Pompe di calore a compressione

# Tipologie

Sorgente Fredda : aria

Molto diffusi nei climatizzatori con pompa di calore, sistemi split per appartamenti / uffici,....



# Tipologie

Sorgente Fredda : aria

Vantaggi : Sorgente fredda (aria) disponibile

Limiti

- Rendimenti proporzionali alle differenze di temperatura: nel periodo invernale la diminuzione della temperatura esterna riduce il rendimento effettivo. (discordanza di fase)

In alcuni casi il rendimento effettivo, con temperature molto rigide, diminuisce al di sotto dell'unità → convenienza del riscaldamento a effetto Joule (stufette elettriche)

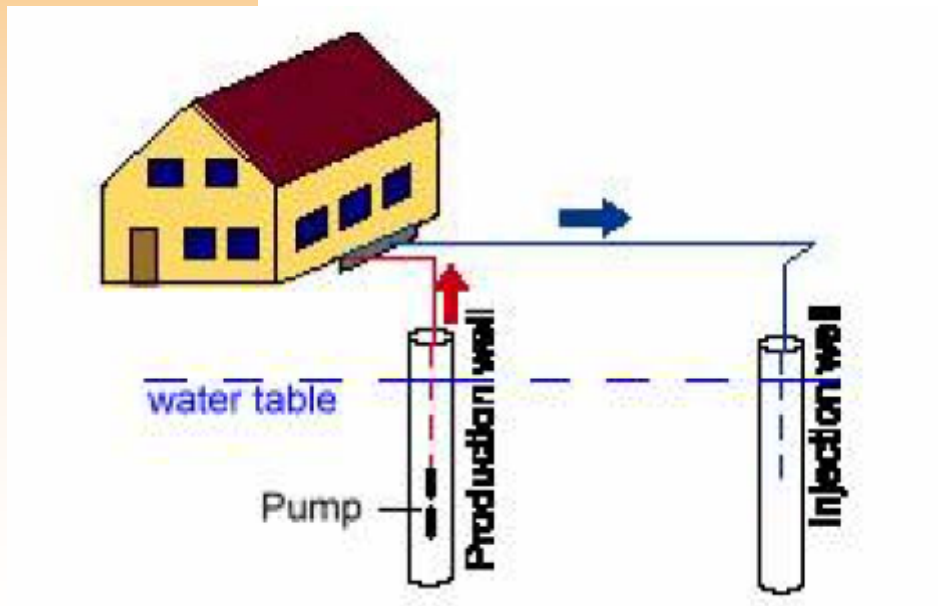
-Temperatura della sorgente fredda molto variabile

-Possibile interruzione del funzionamento in caso di formazione di ghiaccio sullo scambiatore anche a temperature superiori a 0°C.

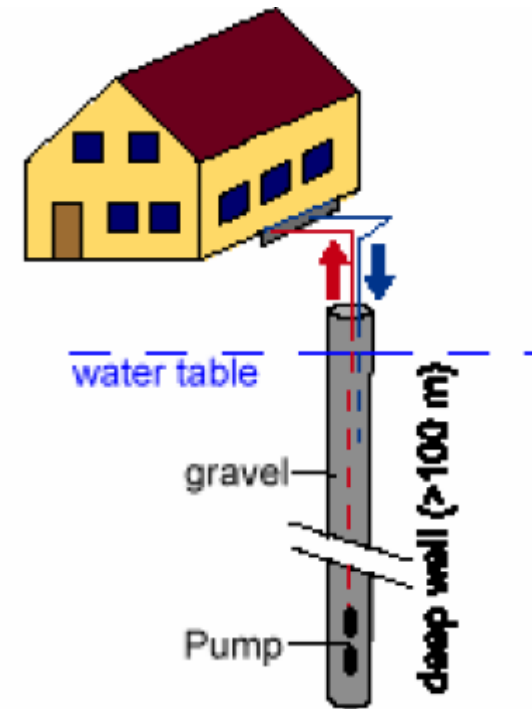
Sono necessari sistemi anti – ghiaccio che di norma prevedono l'inversione del ciclo con conseguente interruzione temporanea della “produzione” di calore e dispendio di energia

# Tipologie

Sorgente Fredda : acqua



Sistema a due pozzi



Sistema a pozzo singolo coassiale



# Tipologie

Sorgente Fredda : acqua

Parametri di valutazione

-Livello della falda / acquifero

a) Parametri idrogeologici:

- conducibilità idraulica  $K$  (m/s)
- porosità totale  $n$  ed efficace  $n_e$  (adimensionale o %)

b) Parametri termici:

- temperatura  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$  o  $^{\circ}\text{K}$ )
- diffusività termica  $a$  (in  $\text{m}^2/\text{s}$ , a sua volta funzione di conducibilità termica  $\lambda$ , espressa in  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , e heat capacity  $c_p$ , in  $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ )

c) Parametri fisico-chimici:

- conducibilità elettrica specifica
- pH
- Eh

# Tipologie

Sorgente Fredda : acqua

Parametri di valutazione

-Emungimento potenziale

- limiti caratteristiche chimico fisiche dell'acqua reimpressa

**SCARICHI NEL SOTTOSUOLO** (D.Lgs. 152/06

Art. 104 -SCARICHI NEL SOTTOSUOLO E NELLE ACQUE SOTTERRANEE

1. È vietato lo scarico diretto nelle acque sotterranee e nel sottosuolo.

2. In deroga a quanto previsto al comma 1, l'autorità competente, dopo indagine preventiva, può autorizzare gli scarichi nella stessa falda delle acque utilizzate per scopi geotermici, delle acque di infiltrazione di miniere o cave o delle acque pompate nel corso di determinati lavori di ingegneria civile, ivi comprese quelle degli impianti di scambio termico.

**SCARICO IN ACQUE SUPERFICIALI** (Tab. 3 , All. 5 alla parte Terza del D.Lgs.

152/06: variazione di temperatura al massimo di 3 C tra monte e valle dello scarico nel corpo idrico-Valori da definire nel Piano di Tutela regionale)

**SCARICO IN FOGNATURA BIANCA O MISTA**

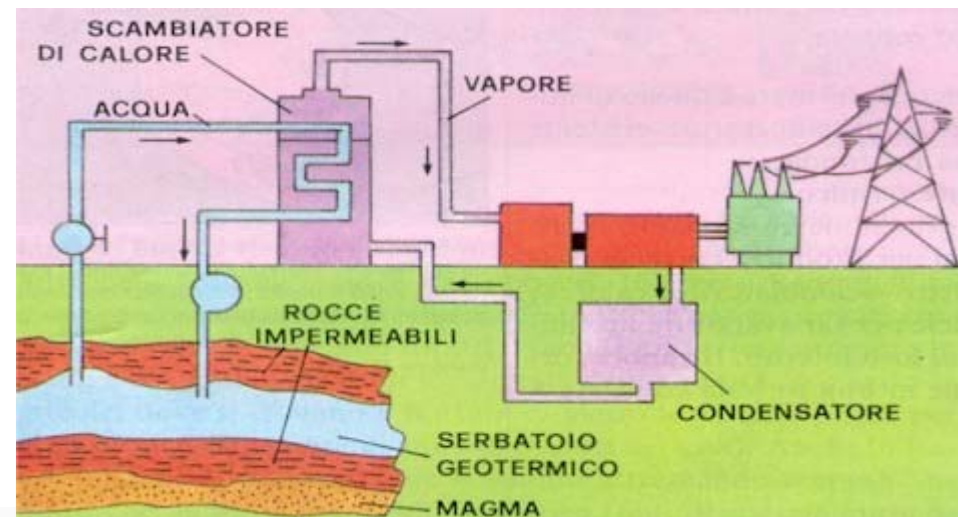
# Tipologie

Sorgente Fredda : terreno

GEOTERMIA

Sfruttamento delle sorgenti termiche presenti nel terreno

-Tradizionale ( es Larderello): sfruttamento del calore endogeno della terra per la produzione di calore ed energia elettrica



# Tipologie

Sorgente Fredda : terreno

GEOTERMIA

-A bassa entalpia

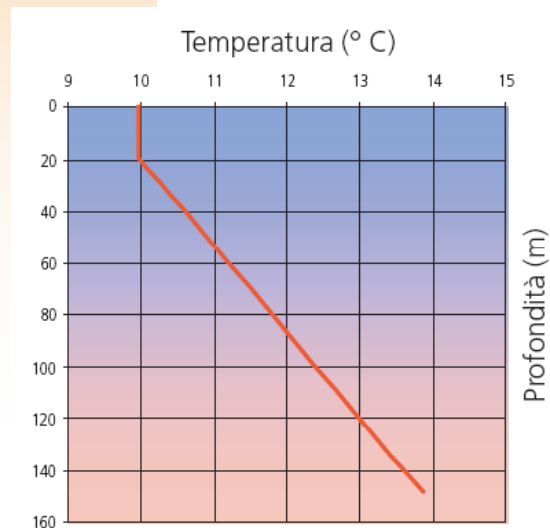
Utilizzo del sottosuolo come “serbatoio termico” dal quale estrarre calore durante la stagione invernale ed al quale cederne durante la stagione estiva.

# Tipologie

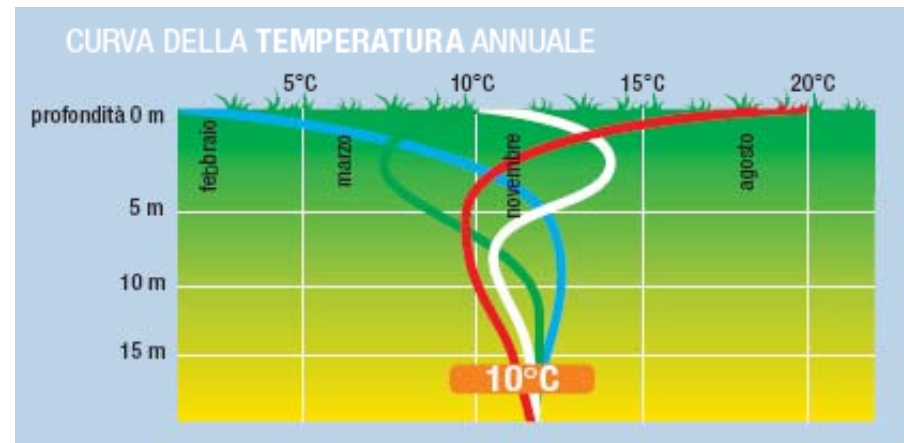
Sorgente Fredda : terreno

Parametri di valutazione

- Caratteristiche chimico fisiche del terreno:
  - curva di temperatura estiva / invernale



Temperatura media  
del sottosuolo



# Tipologie

Sorgente Fredda : terreno

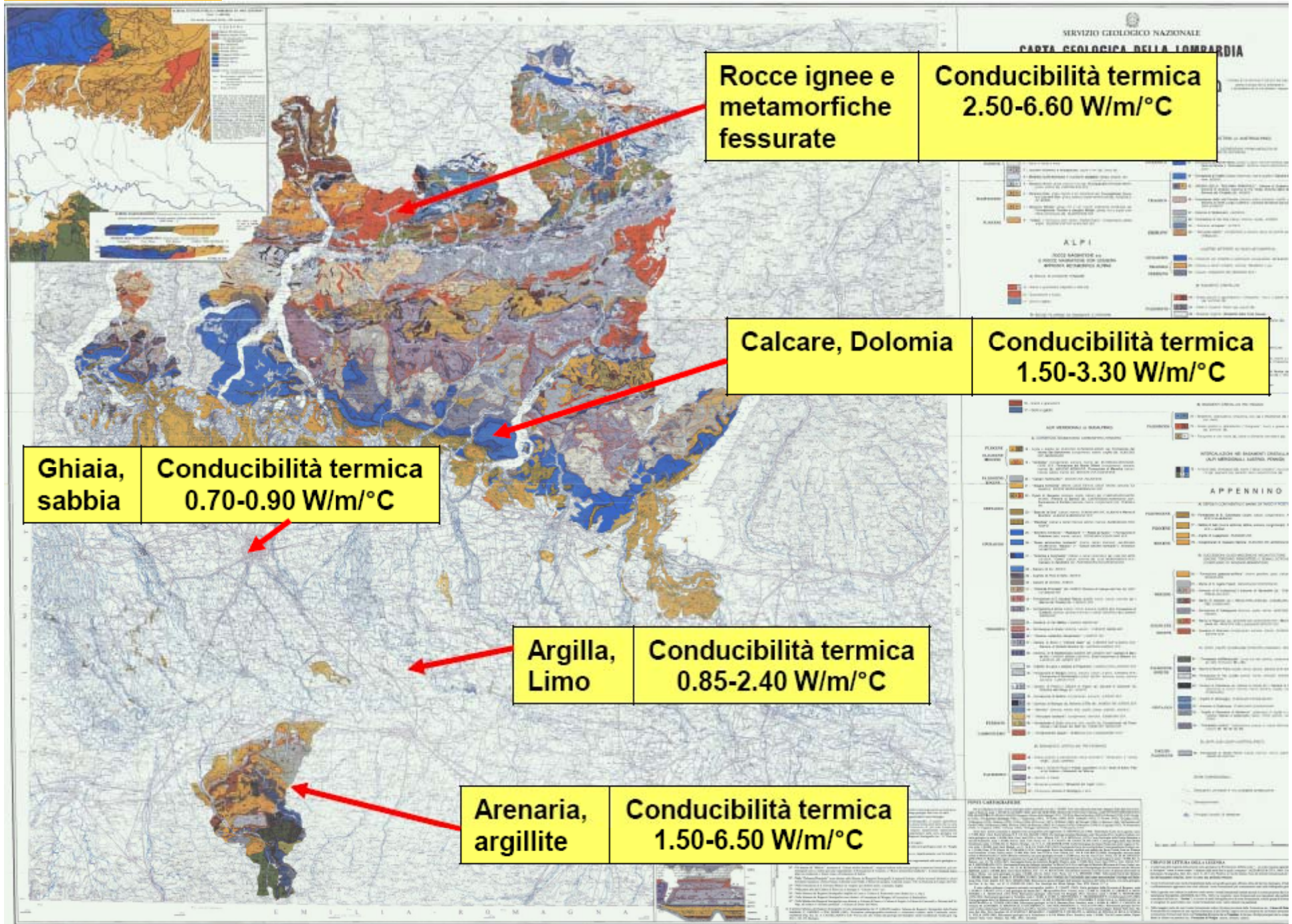
Parametri di valutazione

- Caratteristiche chimico fisiche del terreno:
  - curva di temperatura estiva / invernale
  - caratteristiche termiche del terreno

Tipo di materiale	Conduktività termica [W/(m K)]	Potenza specifica assorbita (W/m) ( $F_{sonda} = 13 \text{ cm}$ )
Rocce incoerenti secche	<1,5	20
Ghiaia o sabbia (secche)	0,4	<20
Argilla, limo (umidi)	1,7	30-40
Rocce sature di acqua	1,5-3,0	50-65
Arenarie e conglomerati	2,3	55-65
Calcere massiccio	2,8	45-60
Gneiss	2,9	60-70
Basalto	1,7	35-55
Granito	3,4	55-65

Chiesa – ARPA  
Lombardia





**Rocce ignee e metamorfiche fessurate**

**Conducibilità termica 2.50-6.60 W/m°C**

**Calcarea, Dolomia**

**Conducibilità termica 1.50-3.30 W/m°C**

**Ghiaia, sabbia**

**Conducibilità termica 0.70-0.90 W/m°C**

**Argilla, Limo**

**Conducibilità termica 0.85-2.40 W/m°C**

**Arenaria, argillite**

**Conducibilità termica 1.50-6.50 W/m°C**

# Tipologie

Sorgente Fredda : terreno

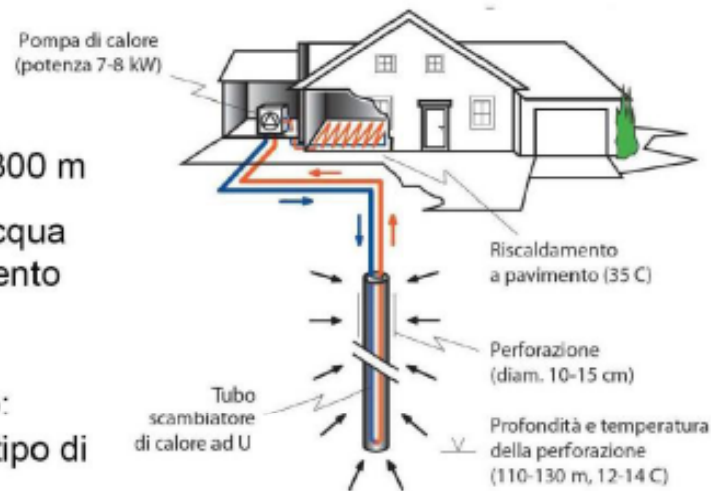
## Sonde geotermiche

Lunghezza: 20 – 300 m

Riscaldamento, acqua calda, raffreddamento

Dimensionamento:

- geologia locale, tipo di terreno
- acqua sotterranea
- uso, tipo di sistema
- ecc.





# Tipologie

Sorgente Fredda : terreno



Giroldi 2008

# Tipologie

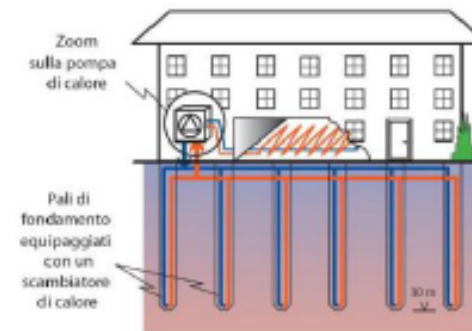
Sorgente Fredda : terreno

## Pali energetici

Pali di fondazione con  
scambiatori di calore

Riscaldamento, acqua  
calda, raffreddamento

Spesso simili allo  
stoccaggio stagionale di  
calore nel terreno



# Tipologie

Sorgente Fredda : terreno



# Tipologie

Sorgente Fredda : terreno

## Collettori orizzontali

Tubi interrati fino a 3 m di profondità

Riscaldamento, acqua calda, raffreddamento

Influenza della meteo, richiede grandi superfici

=> sempre meno impiegato



# Applicazioni

*Riscaldamento (bassa temperatura)*

*Produzione ACS*

*Climatizzazione Estiva*

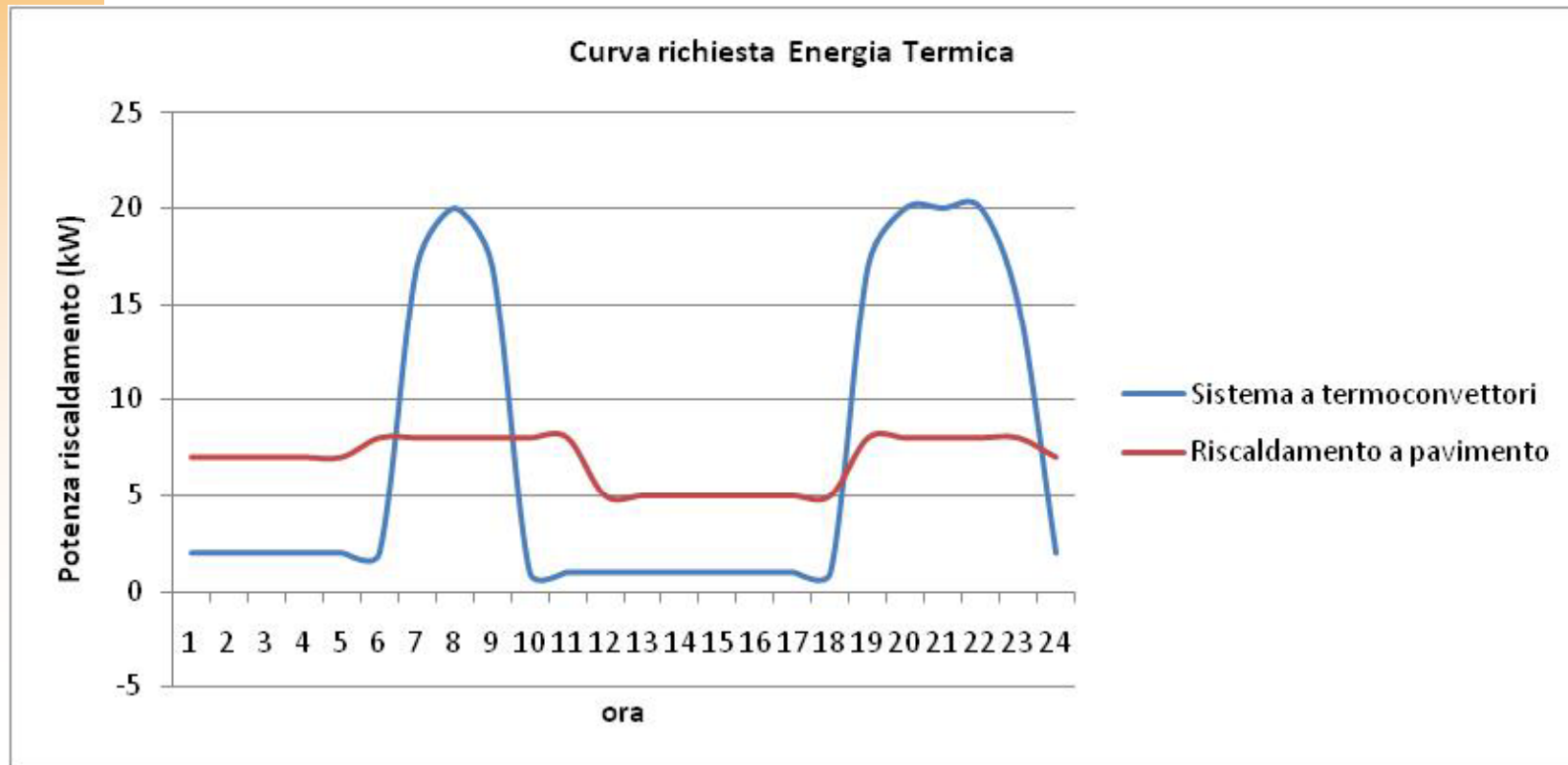
# Dimensionamento

1. *Definizione del fabbisogno termico*
2. *Calcolo delle producibilità dell'impianto*
3. *Dimensionamento dell'impianto*
4. *Valutazioni economiche*



# Dimensionamento

## 1. Definizione del fabbisogno termico



# Dimensionamento

## *2. Calcolo Producibilità Impianto e dimensionamento*

*COP = reale 3,1*

*Potenza elettrica Pompa di calore = 2,6 kW*

*Potenza in riscaldamento = 8 kW*

*Sonda Geotermica = tubo a doppia U PET*

*Pozzo = 120 m*



# Dimensionamento

## 4. Valutazioni Economiche

Investimento	
Pompa di calore con Sonda Geotermica	
Perforazione e posa in opera sonda	€ 7.000
Pompa di calore	€ 7.000
Installazione, sistema di regolazione e produzione ACS	€ 5.000
<b>Totale</b>	<b>€ 19.000</b>

Investimento	
Sistema di riscaldamento a bassa temperatura e raffrescamento estivo	
Caldaia a condensazione con produzione di ACS	€ 5.000
Impianto di raffrescamento estivo con pompa di calore aria/acqua	€ 7.000
<b>Totale</b>	<b>€ 12.000</b>

# Dimensionamento

## 4. Valutazioni Economiche

Pompa di calore			
Costi esercizio riscaldamento			
		Sonda Geotermica	Caldaia a gas
Superficie ambiente	m2		120
Energia termica di riscaldamento	kWht/(m2 x		110
Consumo medio annuo	kWht/anno		13.200
Consumo medio annuo	kcal/anno		11.352.000
Rendimento medio caldaia gas	%		97%
Consumo stimato gas	m3/anno		1.419
Costo Metano	€/m3		0,65
			<b>€ 922,1</b>
Rendimento Pompa di calore con Sonda	COP	4	
Consumo Energia Elettrica	kWh/anno	3.300	
Costo Medio Energia Elettrica	€/kWh	0,18	
		<b>€ 594,0</b>	

# Dimensionamento

## 4. Valutazioni Economiche

Pompa di calore			
Costi esercizio raffrescamento			
		Sonda Geotermica	PDC Aria - Acqua
Superficie ambiente	m2		120
Consumo medio annuo	kWhf/anno		5.000
Rendimento medio pompa di calore aria - acqua	COP		2,5
Consumo Energia Elettrica	kWh/anno		2.000
Costo Medio Energia Elettrica	€/kWh		0,18
			<b>€ 360,0</b>
Rendimento Pompa di calore con Sonda	COP	3,7	
Consumo Energia Elettrica	kWh/anno	1.351	
Costo Medio Energia Elettrica	€/kWh	0,18	
		<b>€ 243,2</b>	

# Dimensionamento

## 4. Valutazioni Economiche

Pompa di Calore				
		Sonda Geotermica	Caldaia + PDC	Differenza
Investimento	€	€ 19.000	€ 12.000	€ 7.000
Costi Energia per riscaldamento	€/anno	€ 594,0	€ 922,1	
Costi Energia per raffrescamento	€/anno	€ 243,2	€ 360,0	
Totale Costi Energia	€/anno	€ 837,2	€ 1.282,1	-€ 445

# Dimensionamento

## 4. Valutazioni Economiche

Pompa di calore - Svizzera				
		Sonda Geotermica	Caldaia + PDC	Differenza
Investimento	€	€ 19.000	€ 12.000	€ 7.000
Costi Energia per riscaldamento	€/anno	€ 247,5	€ 993,0	
Costi Energia per raffrescamento	€/anno	€ 101,4	€ 150,0	
Totale Costi Energia	€/anno	€ 348,9	€ 1.143,0	-€ 794

# Tipologie

## Modalità di compressione

Pompe di calore a compressione

Pompe di calore ad assorbimento

(Pompe di calore alimentate da motori a combustione interna)

## Sorgente Utilizzata

Aria

Acqua

Terreno

Altri fluidi

# Tipologie

## Modalità di compressione

Pompe di calore a compressione

## Pompe di calore ad assorbimento

(Pompe di calore alimentate da motori a combustione interna)

## Sorgente Utilizzata

Aria

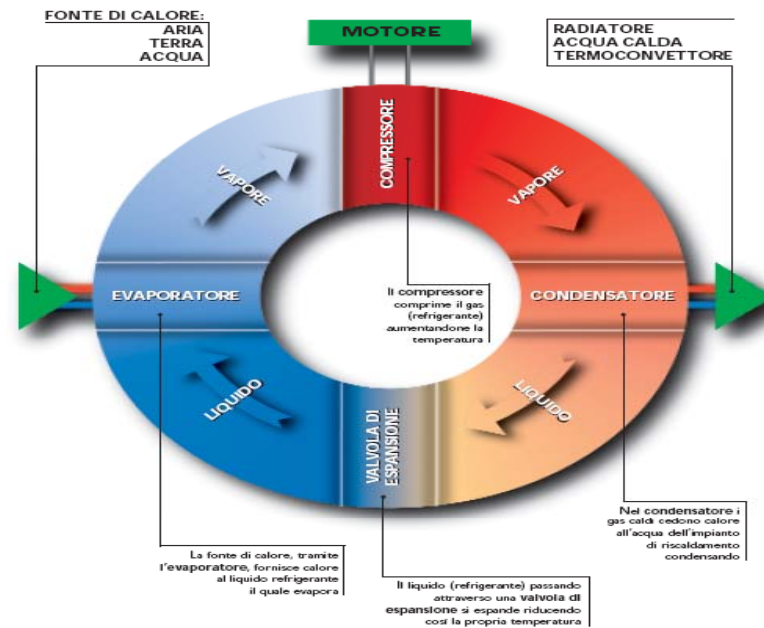
Acqua

Terreno

Altri fluidi

# Tipologie

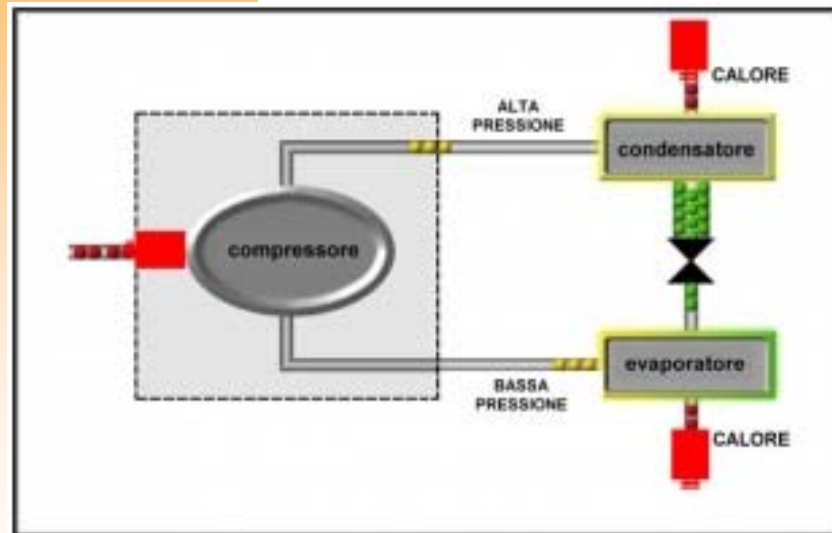
## Pompa di calore ad assorbimento





# Tipologie

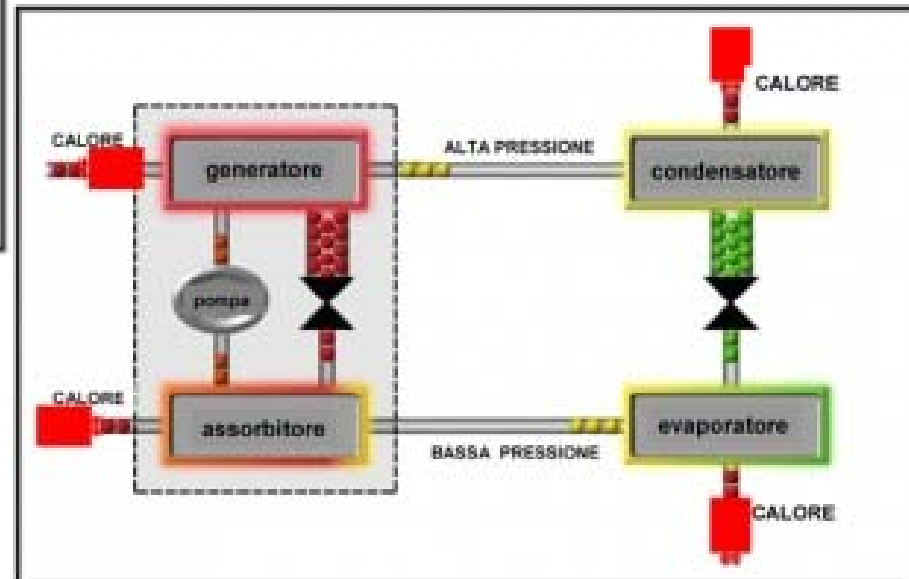
## Pompa di calore ad assorbimento



**Assorbitore:** il fluido frigorifero viene assorbito dal fluido assorbente, rendendolo nuovamente liquido.

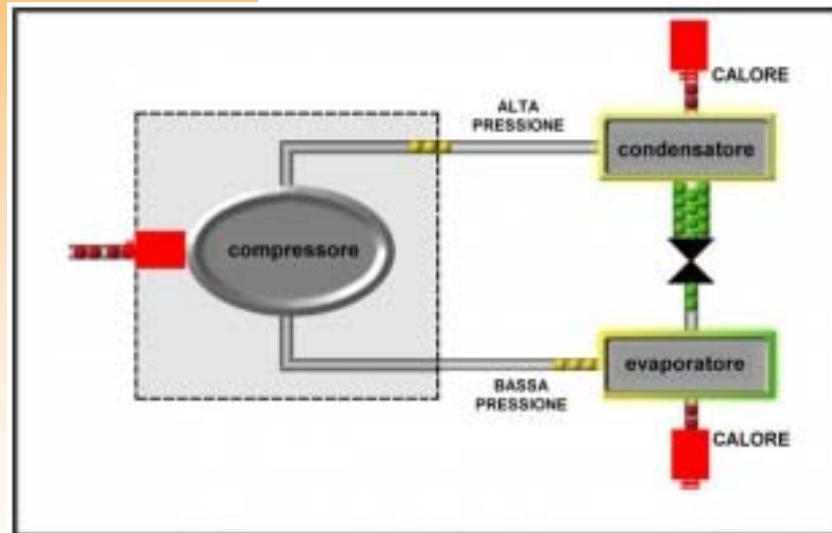
**Generatore:** la soluzione liquida dei fluidi frigorifero ed assorbente viene riscaldata nel generatore per mezzo di un bruciatore a gas, separando il fluido refrigerante, che evapora aumentando di temperatura e di pressione.

**Compressione:** il fluido frigorifero allo stato gassoso e a bassa pressione, proveniente dall'evaporatore, viene portato ad alta pressione; nella compressione si riscalda assorbendo una certa quantità di calore.



# Tipologie

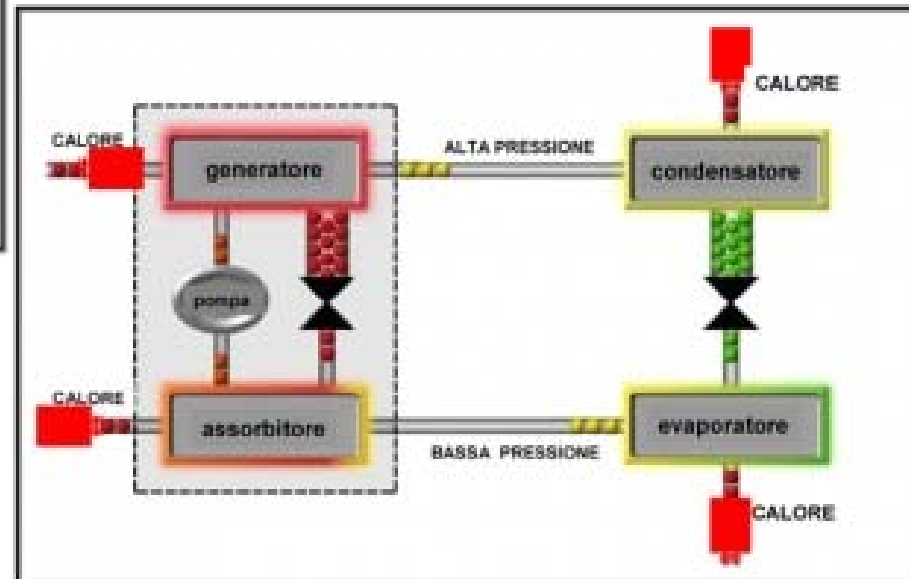
## Pompa di calore ad assorbimento



**Compressione:** il fluido frigorifero allo stato gassoso e a bassa pressione, proveniente dall'evaporatore, viene portato ad alta pressione; nella compressione si riscalda assorbendo una certa quantità di calore.

**Assorbitore:** il fluido frigorifero viene assorbito dal fluido assorbente, rendendolo nuovamente liquido.

**Generatore:** la soluzione liquida dei fluidi frigorifero ed assorbente viene riscaldata nel generatore per mezzo di un bruciatore a gas, separando il fluido refrigerante, che evapora aumentando di temperatura e di pressione.



# Tipologie

Pompa di calore ad assorbimento

Descrizione Ciclo: soluzioni di refrigerante ed assorbente

1. Riscaldamento soluzione nel generatore di calore (o con calore di recupero) → separazione soluzione, il refrigerante evapora
2. Condensatore : refrigerante viene fatto condensare (calore ceduto alla sorgente calda)
3. Espansione: refrigerante viene fatto passare attraverso opportuni restrittori → diminuisce pressione e temperatura
4. Evaporatore: il refrigerante assorbe calore dal fluido dalla sorgente fredda
5. Assorbitore: il refrigerante viene assorbito dal fluido assorbente

# Tipologie

Pompa di calore ad assorbimento

Acqua e Bromuro di Litio



Acqua e Bromuro di Litio	
Taglia	4.5 ; 17.5 kW ~23 MW freddi
COP	0.7 / 1.1
Alimentazi	Acqua calda; Vapore; Fumi; Fiamma diretta
Utilizzo	Raffrescamento (modelli con scambio invernale)

# Tipologie

Pompa di calore ad assorbimento

Acqua e Ammoniaca



Acqua e Ammoniaca	
Taglia	10; 17kW ~525 kW (freddo) ; 35-1380 kW (caldo)
COP	0.6 -0.95 (freddo) ; 1.4-1.7 (caldo)
Alimentazione	Fiamma diretta (Olio diatermico)
Utilizzo	Raffrescamento, Riscaldamento, Cons. Cibi

# Analisi Economica

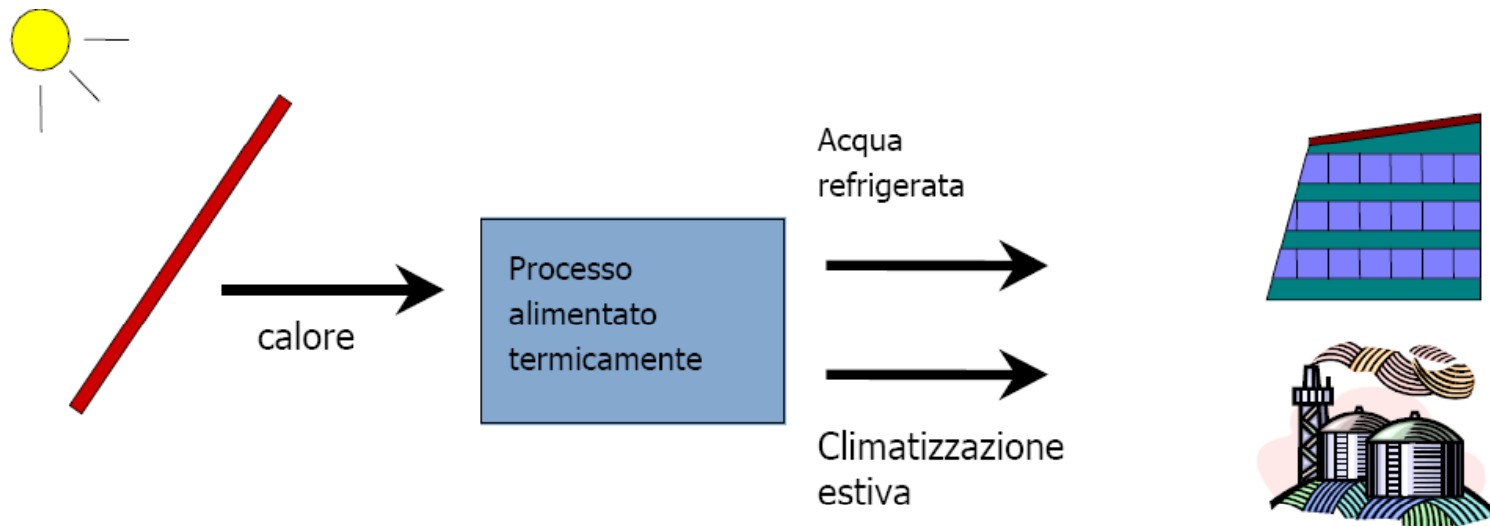
## Pompa di calore ad assorbimento

Struttura		
Potenze richieste		
Riscaldamento	kW	400
Raffrescamento	kW	400
Produzione ACS	kW	150

Soluzioni a confronto	Consumo Energia Elettrica	consumo gas metano	Costi di gestione annui	Differenza Costi gestione	Differenza Investimento
	kWh/anno	Nm3/anno	€/anno	€/anno	€
Centrale Termica con caldaia a condensazione e chiller tradizionale elettrico	68.072	77.292	49.667	-	-
b) Impianto a pompa di calore aria-acqua di tipo tradizionale elettrico	278.743	14.020	55.813	6.146	-9.760
c) Impianto con pompa di calore geotermica elettrica	192.272	14.020	39.552	-10.115	285.000
d) Impianto con pompa di calore geotermica ad assorbimento	14.474	81.843	40.247	-9.420	190.000
e) Impianto con pompa di calore aria-acqua ad assorbimento	24.477	86.355	39.315	-10.352	86.000

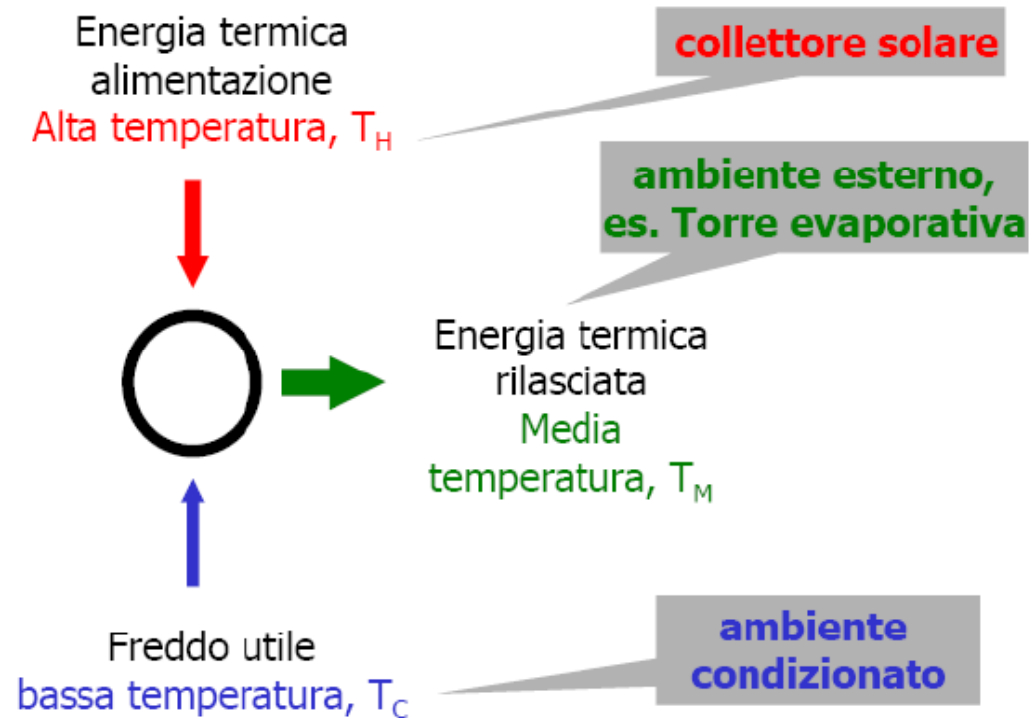
# Solar Cooling

## Principio di Funzionamento







# Solar Cooling

## Principio di Funzionamento





# Solar Cooling

	Cicli chiusi Produzione acqua refrigerata		Cicli aperti Condizionamento aria diretto	
Tipo di sorbente	solido	liquido	solido	liquido
				
Tipici materiali in uso	Acqua - Silicagel, Ammoniaca – Sali A.	Acqua - LiBr, Ammoniaca - acqua	Acqua - Silicagel, Acqua – Cl di Litio	Acqua –Cloruro di Calcio Acqua – Cloruro di Li
Tecnologie disponibili sul mercato	Macchine ad Adsorbimento	Macchine ad Assorbimento	Raff. Evaporativo con Ad-assorbimento	-
Potenza frigorifera [kW]	7 - 430 kW	4.5 kW fino >5 MW	20 kW - 350 kW (pro Modul)	-
Produttori	2 produttori giapponesi	USA, Asia; solo poche piccola capacità	ca. 5 produttori di rotor; molti UTA	
Efficienza (COP)	0.3-0.7	0.6-0.75 (1-effetto) < 1.2 (2-effetto)	0.5 fino >1	fino >1
Tipiche temperature di alimentazione	60-95°C	80-110°C (1-effetto) 130-160°C (2-effetto)	45-95°C	45-70°C

# Solar Cooling

**Assorbimento:** processo di penetrazione di

-un gas in un solido o in un liquido

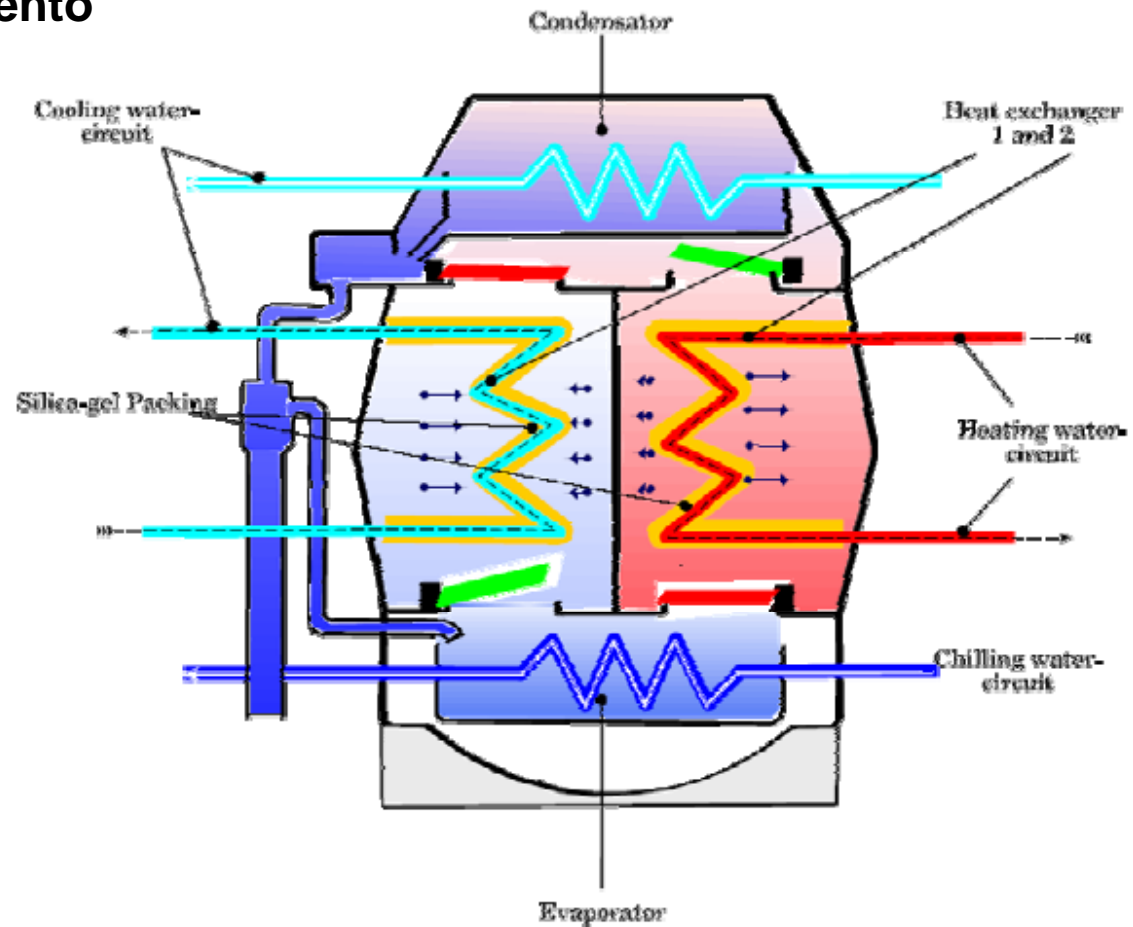
-un liquido in un solido

quando la sostanza assorbita permea uniformemente tutta la massa del corpo assorbente.

**Adsorbimento:** processo attraverso il quale un gas viene fissato sulla superficie di un solido o più raramente di un liquido.

# Solar Cooling

## Adsorbimento



# Solar Cooling

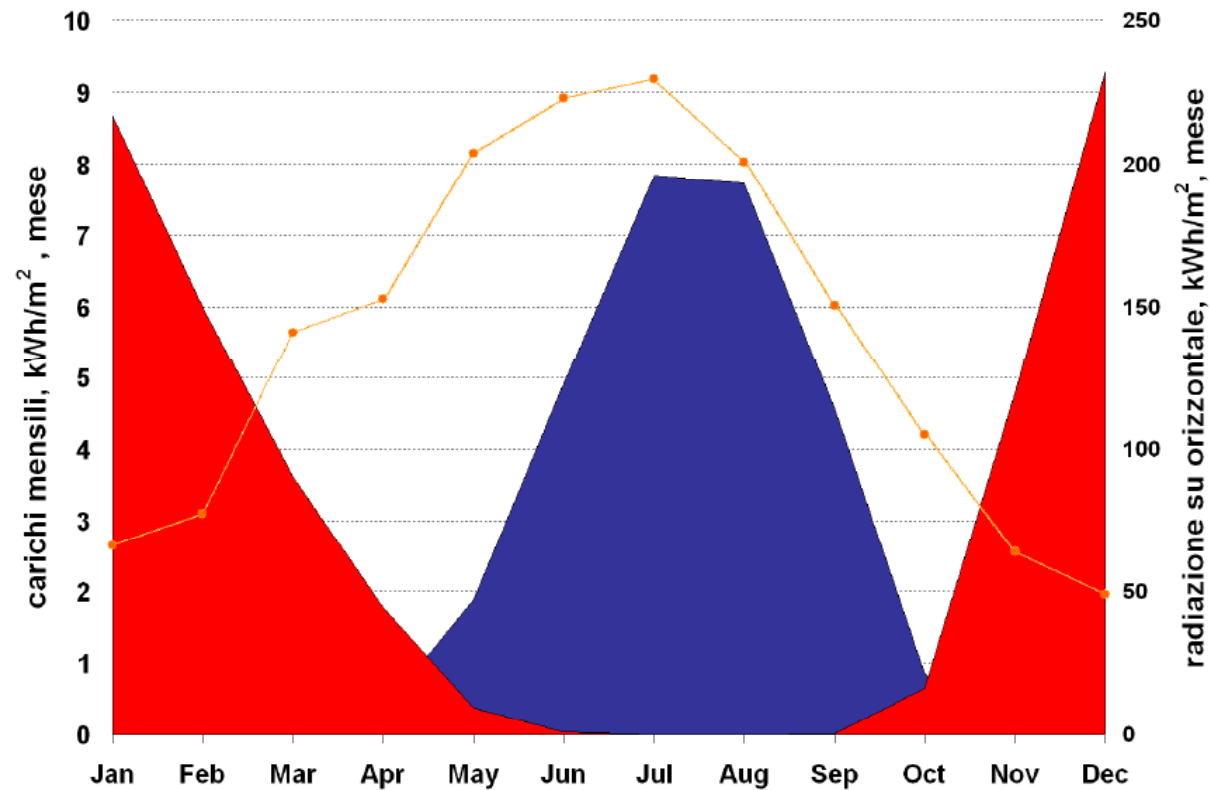
## Adsorbimento

Quando l'assorbente nel primo compartimento è rigenerato utilizzando acqua calda da una fonte di calore esterna (i collettori solari), l'assorbente nel secondo compartimento (adsorbitore) adsorbe il vapore d'acqua proveniente dall'evaporatore.

L'acqua presente nell'evaporatore, recuperando calore dal circuito di acqua esterna, si trasforma nella fase gassosa e avviene la produzione di freddo.

# Solar Cooling

Sovrapposizione – producibilità e richiesta



# Tipologie

## Modalità di compressione

Pompe di calore a compressione

Pompe di calore ad assorbimento

(Pompe di calore alimentate da motori a combustione interna)

## Sorgente Utilizzata

Aria

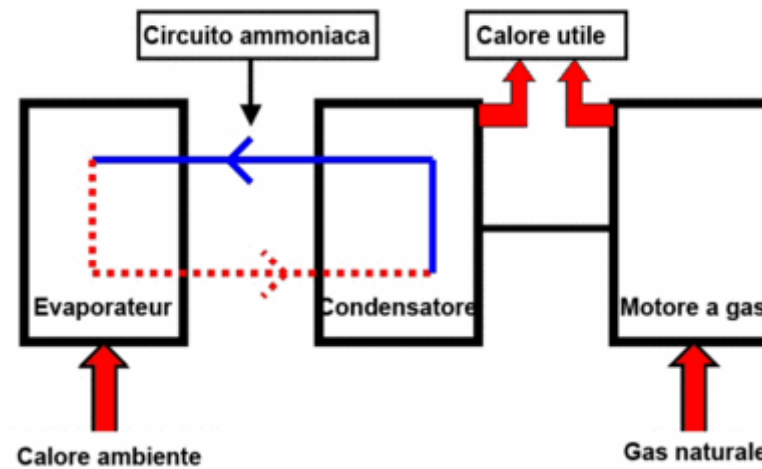
Acqua

Terreno

Altri fluidi

# Tipologie

Pompa di calore con motori a gas



# Tipologie

Pompa di calore con motori a gas

