

Le pompe di calore: tipologie e caratterizzazione

G.L. Morini

Laboratorio di Termotecnica

*Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del
Controllo Ambientale*

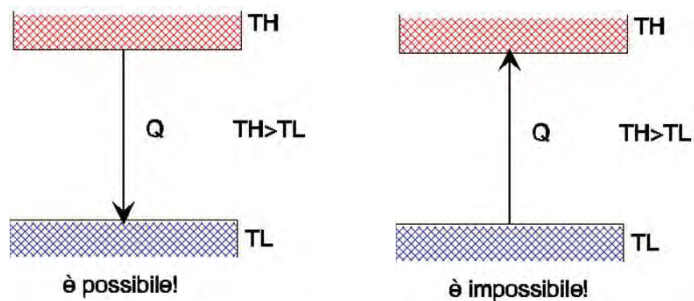
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

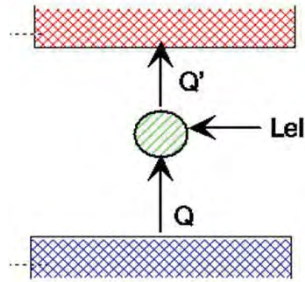
Vincoli termodinamici sui flussi di calore



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

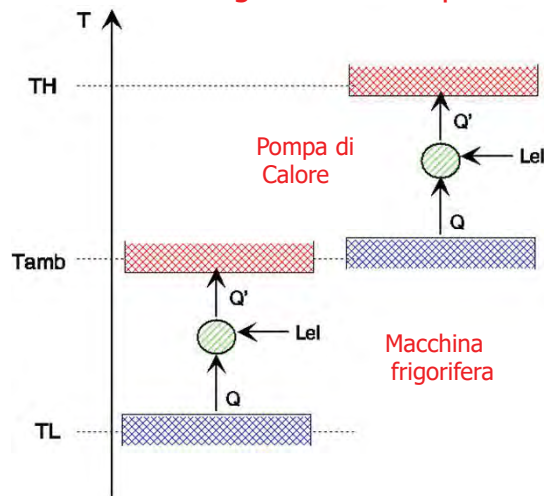
Macchina frigorifera



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

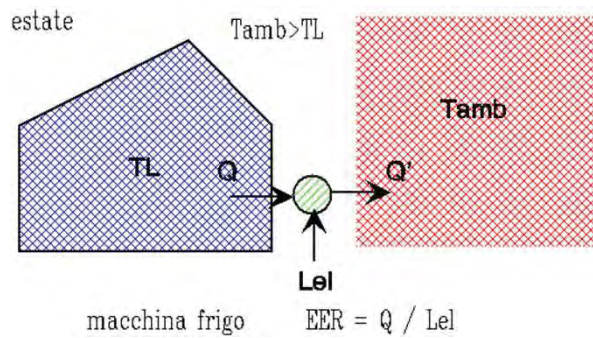
Macchina frigorifera – Pompa di Calore



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

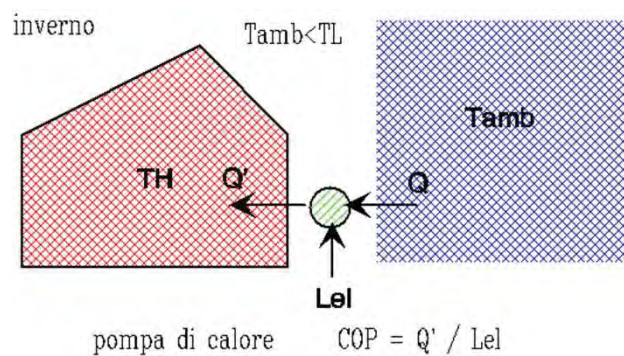
Reversibilità delle Pompe di Calore



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

Reversibilità delle Pompe di Calore



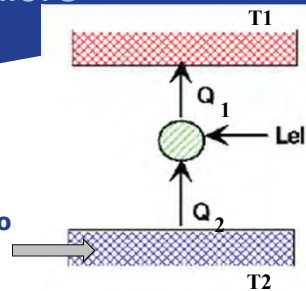
DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Classificazione Pompe di Calore

Classificazione in relazione al serbatoio
freddo

UNI TS 11300-4:

serbatoio freddo
(W, A, B)



1. Impianti con sorgente fredda = aria esterna (A)
2. Impianti con sorgente fredda = aria interna o da recupero (A)
3. Impianti con sorgente fredda = acqua di superficie (W)
4. Impianti con sorgente fredda = acqua di falda (W)
5. Impianti con sorgente fredda = terreno, con scambiatore orizzontale (B)
6. Impianti con sorgente fredda = terreno, con scambiatore verticale (B)

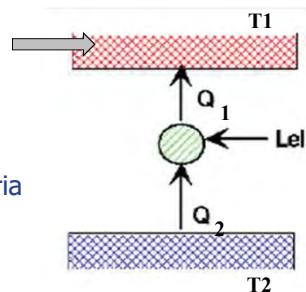


DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Classificazione Pompe di Calore

Classificazione in relazione alla
serbatoio caldo (fluido termovettore
della rete di utilizzo)

serbatoio caldo
(W-A)



1. impianti con fluido termovettore acqua (W)
2. impianti con fluido termovettore aria (A)

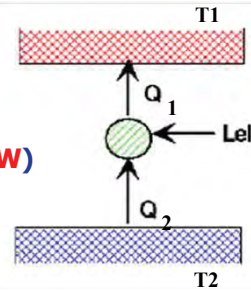


DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Classificazione Pompe di Calore

Classificazione sulla base dei 2 serbatoi di calore tra cui la macchina opera:

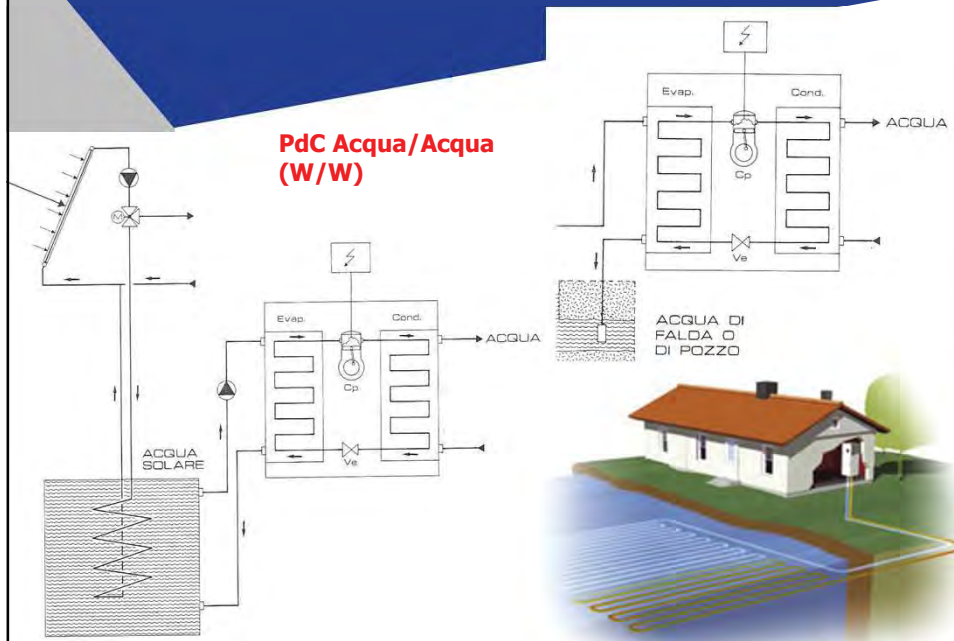
1. Pompa di calore **ACQUA – ACQUA (W – W)**
(in cui Q_2 e Q_1 sono scambiati con acqua)
2. Pompa di calore **ACQUA – ARIA (W – A)**
(in cui Q_2 è scambiato con acqua e Q_1 con aria)
3. Pompa di calore **ARIA – ACQUA (A – W)**
(in cui Q_2 è scambiato con aria e Q_1 con acqua)
4. Pompa di calore **ARIA – ARIA (A – A)**
(in cui Q_2 e Q_1 sono scambiati con aria)
5. Pompa di calore **TERRENO – ACQUA (B – W)**
(in cui Q_2 è scambiato con il suolo e Q_1 con acqua)



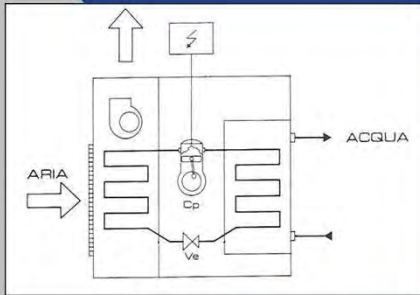
DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Sorgente: Acqua

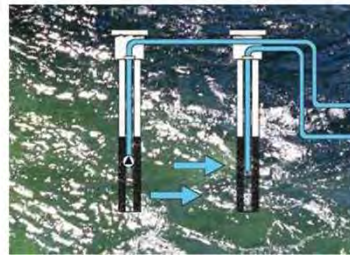
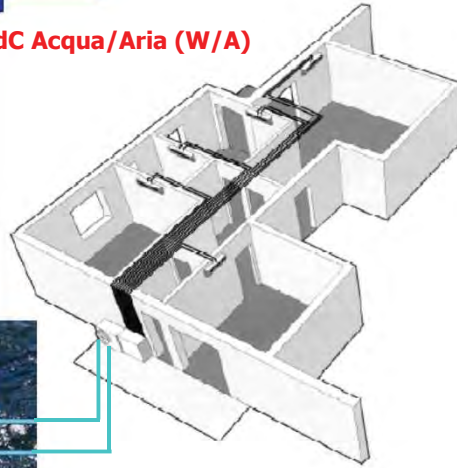
PdC Acqua/Acqua (W/W)



Sorgente: Acqua



PdC Acqua/Aria (W/A)

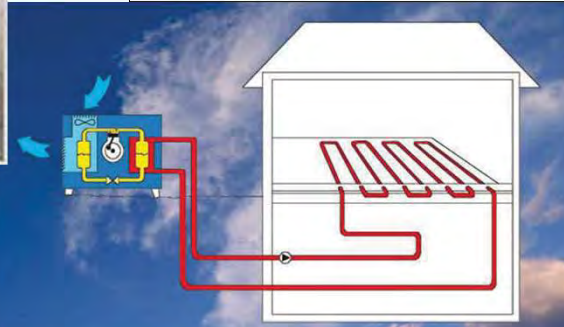
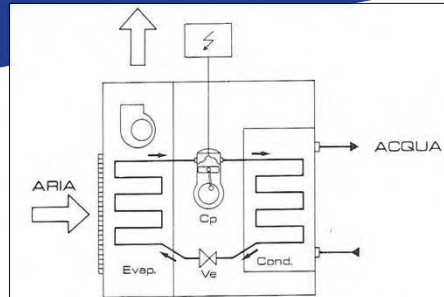


DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

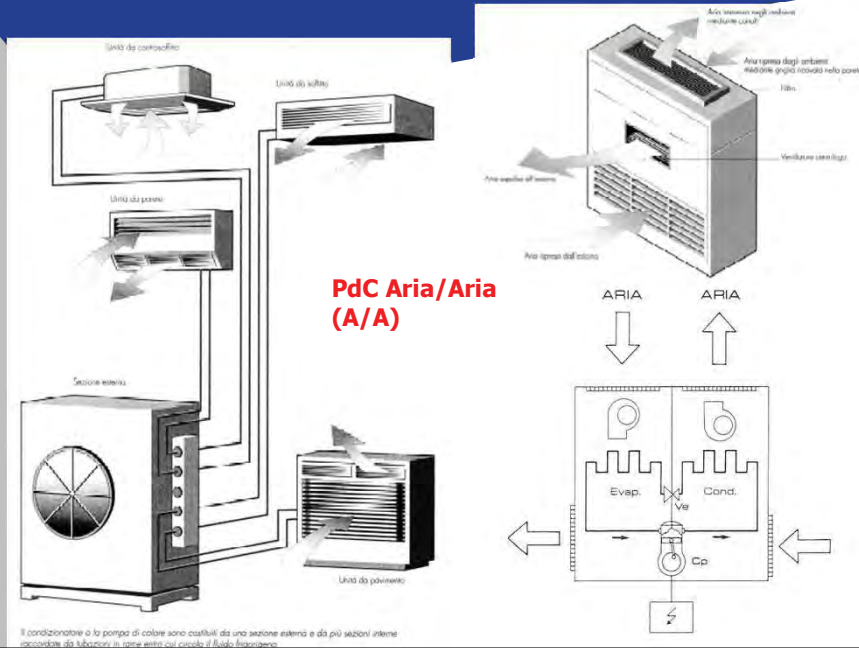
Sorgente: Aria



PdC Aria/Acqua (A/W)

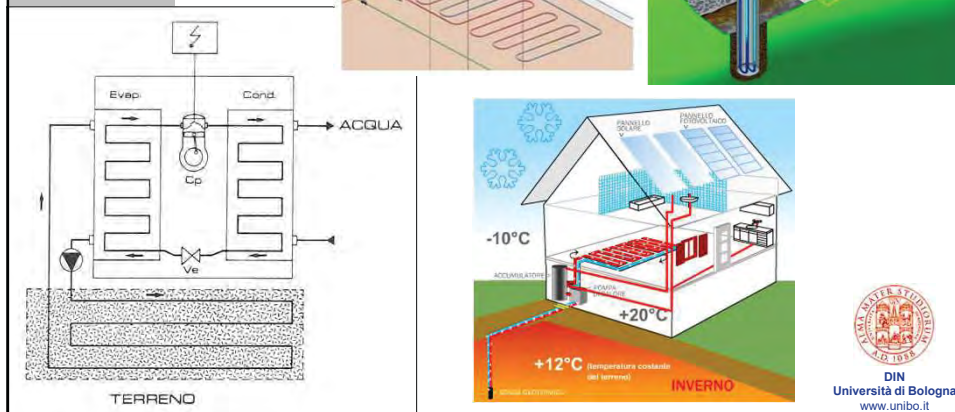


Sorgente: Aria



Sorgente: Terreno

PdC Terreno/Acqua (B/W)



Efficienza e Sorgenti termiche

Energy source – air:

Excellent availability, lowest investment, generally operated in dual-mode and mono-energetic mode (electric heating rod for low outside temperatures).

Energy source – ground:

The highest proportion of newly installed systems gain energy from this source; they can be operated in mono-mode and are highly efficient.

Energy source – water:

Important: Observe the water quality. Particularly high efficiency, can be operated in mono-mode.



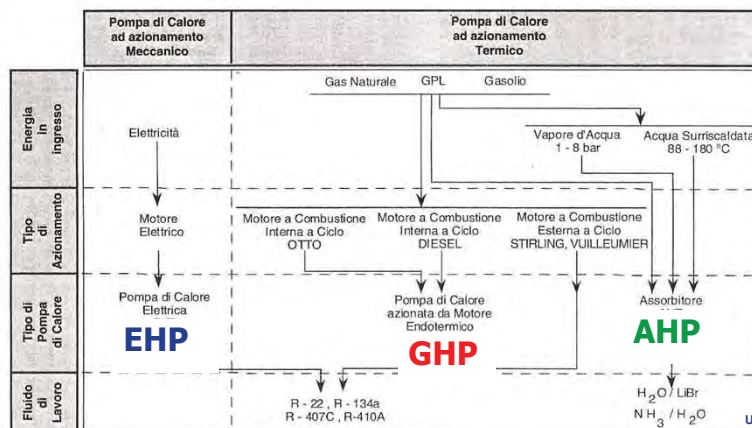
Fig. 20: Energy sources for heat pumps



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Classificazione Pompe di Calore

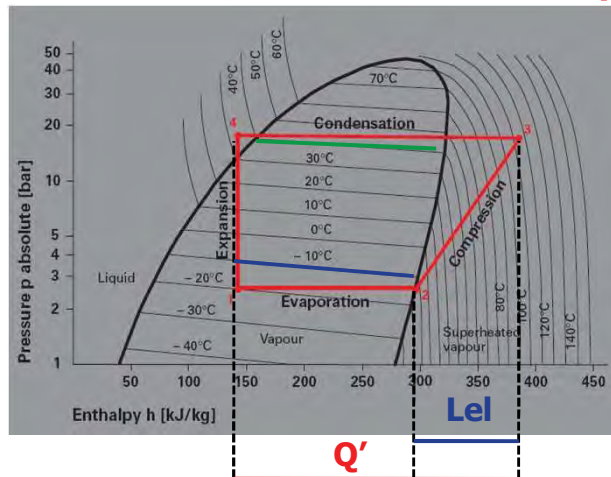
Classificazione in relazione al principio di funzionamento:



DIENCA
Università di Bologna
www.unibo.it

EHP

PdC reale: ciclo termodinamico (R407)



Taria = -10 °C
Tw = 40 °C



DIENCA
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

Macchina operatrice Ideale

$$EER_{th} = \frac{Q}{L_{el}} = \frac{Q}{Q' - Q} = \frac{T_L}{T_{amb} - T_L}$$

$$COP_{th} = \frac{Q'}{L_{el}} = \frac{Q'}{Q' - Q} = \frac{T_H}{T_H - T_{amb}}$$

Esempio numerico:

Calcolo COP_{th} per una pompa di calore ideale

Inverno $T_H = 40^\circ C$ $T_{amb} = 0^\circ C$

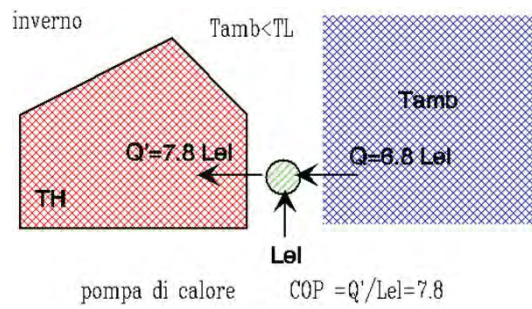
$$COP_{th} = \frac{40 + 273.15}{(40 + 273.15) - (0 + 273.15)} = 7.8$$



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

PdC vs Stufa Elettrica



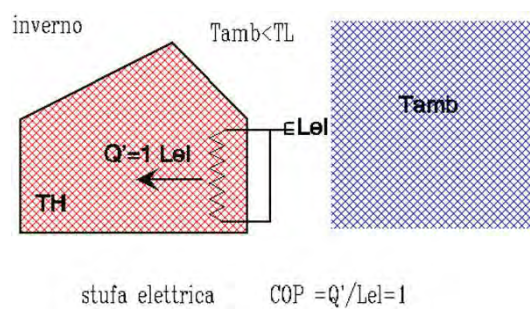
Prelevo (6.8 Lel) dall'ambiente esterno gratis!



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

PdC vs Stufa elettrica



La stufa elettrica ideale dissipa tutta l'energia elettrica prelevata in calore (1 Lel)

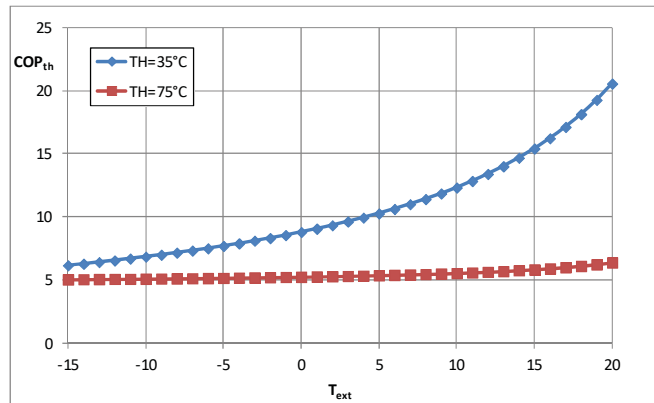


DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Analisi energetica

$$COP_{th} = \frac{Q'}{L_{el}} = \frac{Q'}{Q' - Q} = \frac{TH}{TH - T_{ext}}$$

Effetto della T esterna sul COP



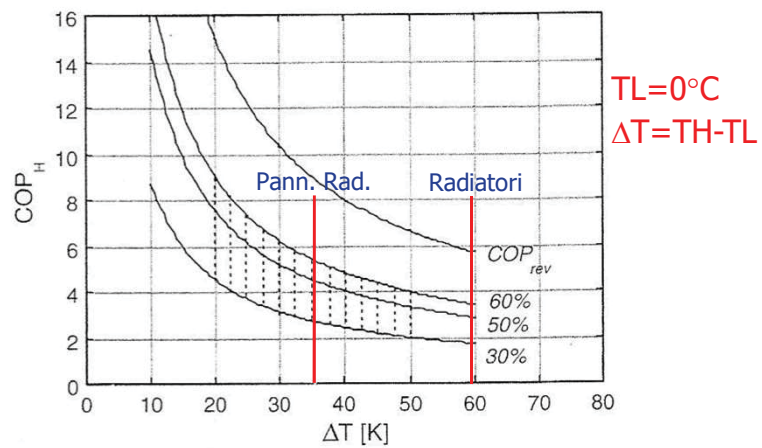
La PdC ha elevate prestazioni a **T_{amb} elevate** (quando non serve il riscaldamento) e per **bassa temperatura di mandata** dell'impianto



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

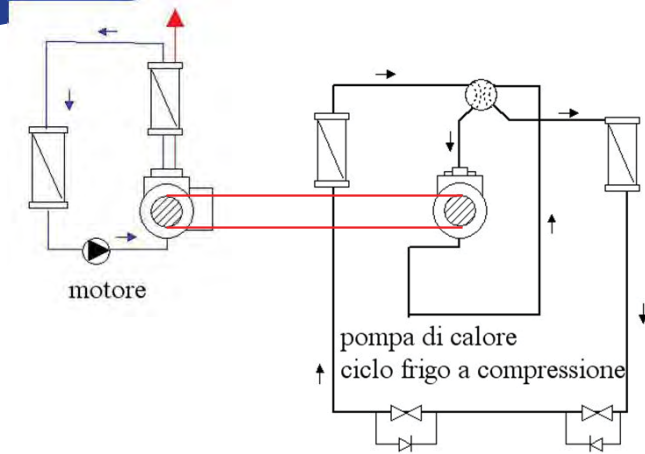
Analisi energetica

Accoppiamento con emettitori



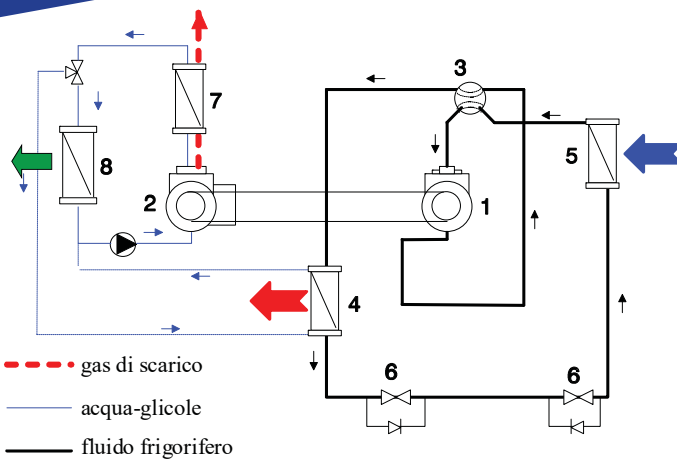
DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

GHP



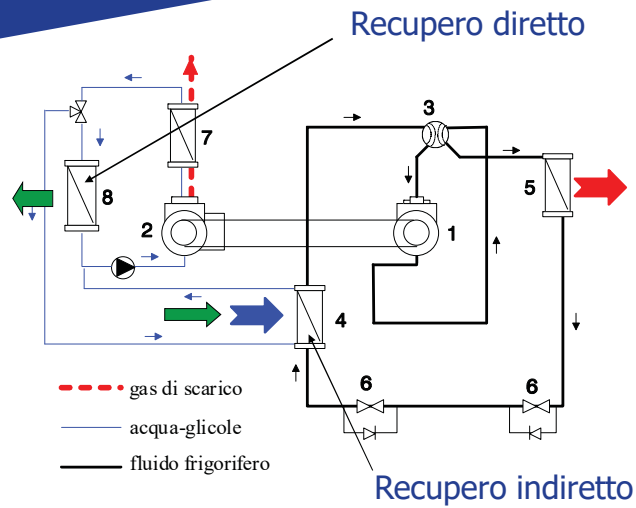
DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Schema di funzionamento estivo

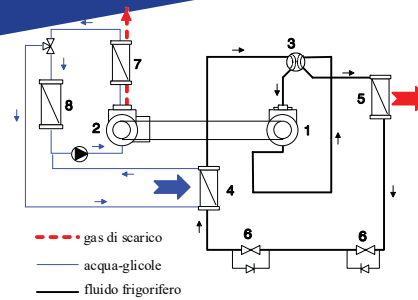


DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Schema di funzionamento invernale



Analisi energetica



Rendimento meccanico

$$\eta_M = \frac{L}{E_{p,pdc}}$$

Perdite termiche

$$\pi_p = \frac{E_d}{E_{p,pdc}}$$

Rendimento termico

$$\eta_T = 1 - \pi_p - \eta_M$$

Definizione di Primary Energy ratio (PER)

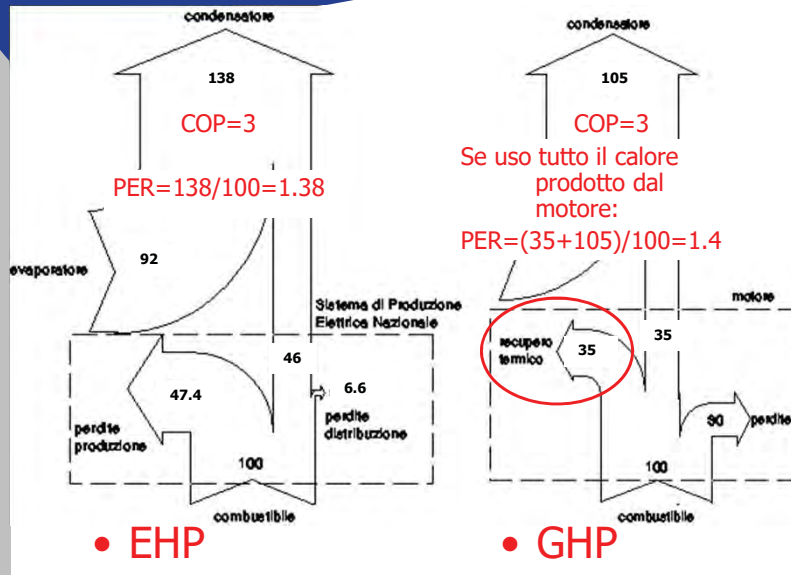
$$PER = CUC = \frac{E_{tot,pdc}}{E_{p,pdc}} = \frac{E_T + E_{pdc}}{E_{p,pdc}} = \eta_T + \eta_M COP$$

Es. numerico:

Motore con rend. Termico (η_T) pari a 35% e rend. Meccanico (η_M) 30% accoppiato ad una macchina a compressione con COP=3

$$PER = 0.35 + 0.3 \cdot 3 = 1.25 \text{ (125\%)}$$

EHP vs GHP: flussi energetici



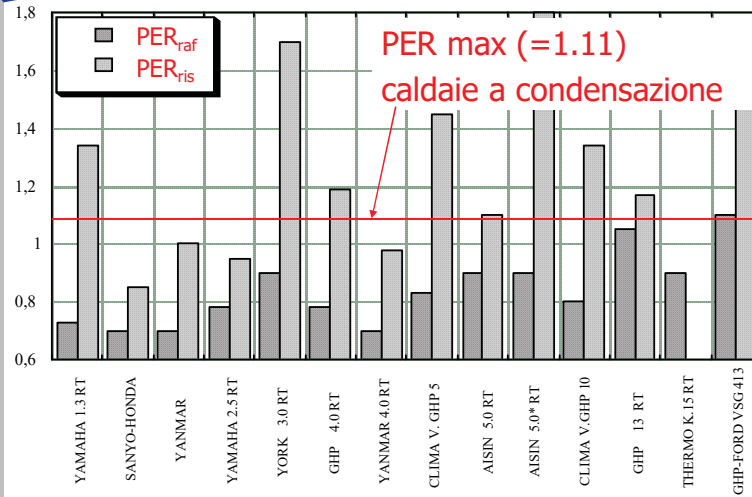
Dati tecnici GHP

PER PER

MODEL	Cooling Capacity [kW]	Heating Capacity [kW]	Engine displ. [cm ³]	Engine rpm	Gas consump. (cool.) [Nm ³ /h]	Gas consump. (heat.) [Nm ³ /h]	NOISE [dB]	CUC (cool.)	CUC (heat.)	Weight [kg]	Outdoor unit dim. (W*D*H) [mm]	HC/CC
YAMAHA 1.3 RT	4.600	7.800	245.00	1100/2000	0.5000	0.4400	50	0.7900	1.340	148.00	600*380*1150	1.652
SANYO/DAIDA	5.000	8.900						0.7000	0.8500	90.00	750*350*950	
YANMAR	6.700	8.700						0.7000	1.060	120.00	800*300*1030	
YAMAHA 2.2 RT	7.820	12.200	293.00	1200/2500	0.7200	0.7000	56			186.00	800*380*1129	1.560
YAMAHA 2.2 RT	7.820	8.160	293.00	1200/2500	0.7200	0.7000	52			186.00	800*380*1129	1.044
YAMAHA 2.5 RT	8.700	10.500	293.00	1200/2500	0.8300	0.8700	52	0.7800	0.9500	186.00	800*380*1129	1.207
YCI K 3.0 RT	10.500	16.100	272.50	1200/3000				0.9000	1.700		1092*965*914	1.533
YANMAR 3.0 RT	10.500	15.700	439.00	1500/2500	1.070	1.250	59			260.00	950*460*1150	1.495
AISIN 3.3 RT	11.600	13.400									850*700*1650	1.155
GHP 4.0 RT	13.400	19.600	658.00				60	0.7800	1.190			1.388
SACHS		20.000		1200/2400			53		1.510			
YANMAR 4.0 RT	13.800	21.700	440.00	1500/3300	1.340	1.220	60	0.7000	0.9800		1000*500*1160	1.573
YAMAHA 3.9 RT	13.800	17.200	547.00	900/2500						278.00	1050*600*1290	1.246
YANMAR 3.7 RT	14.200	21.300										1.500
CLIMA V GHP 5	14.400	25.000	903.00		1.800	1.800	66	0.9300	1.450	500.00	1250*730*1890	1.736
AISIN 5.0 RT	17.400	29.900	547.00	1600/2500	1.500	1.420	62	0.9000	1.100	450.00	970*700*1840	1.201
AISIN 5.0 RT	17.400	29.100	547.00	1200/2800			62	0.9000	1.800	450.00	970*700*1840	1.500
YAL/JHA 5.3 RT	18.600	22.900	547.00	1000/3000	1.800	1.600				410.00	1200*700*1950	1.199
AISIN 5.3 RT	19.800	22.800	547.00	1600/2750	1.580	1.420	59			425.00	1180*660*1750	1.152
YANMAR 5.0 RT	20.500	28.500										1.390
YANMAR 5.8 RT	20.500	28.500	658.00	1200/3200	2.150	2.300	60			430.00	990*990*1299	1.390
CLIMA V GHP 10	27.000	45.000	903.00		3.500	3.500	68	0.8000	1.940	790.00	1520*890*1990	1.697
YANMAR 7.8 RT	27.000	38.400	875.00	1200/3300	2.310	2.910	63			535.00	1000*700*2016	1.376
SANYO 3.9 RT	34.000	39.500	1988.0	800/2200	2.920	2.860	63			1000.00	1750*1000*2170	1.131
AISIN 13.2 RT	37.200	44.200	1094.0	1500/2750	3.600	2.840	63			950.00	2280*700*2034	1.188
SANYO 11.6 RT	41.300	45.400	1998.0	800/2200	4.170	3.860	63			1050.00	1750*1000*2170	1.100
GHP 13 RT	43.600	46.500	1395.0				60	1.050	1.170			1.067
SANYO 13.2 RT	46.500	51.200									1850*1000*2172	1.101
YAMAHA 13.2 RT	48.800	61.600	1998.0	700/2000	4.120	4.130	62			960.00	1700*1100*1860	1.262
YANMAR 13.2 RT	48.800	59.000	1429.0	1200/2500	4.240	4.100	64			1000.00	1760*970*1890	1.209
SANYO 14.9 RT	52.300	66.500	1988.0	800/2200	4.950	4.410	64			1100.00	1750*1000*2170	1.157
THERMO K15 RT	53.000	70.000	2670.0	900/2600				0.9000		1179.00	1930*993*1270	1.321
CAFIER 25 RT			3000.0							2192.00	2324*5512*1338	
GHP FORD VSD 413	70.000	90.000	1300.0	1500/3000				1.100	1.600			1.286

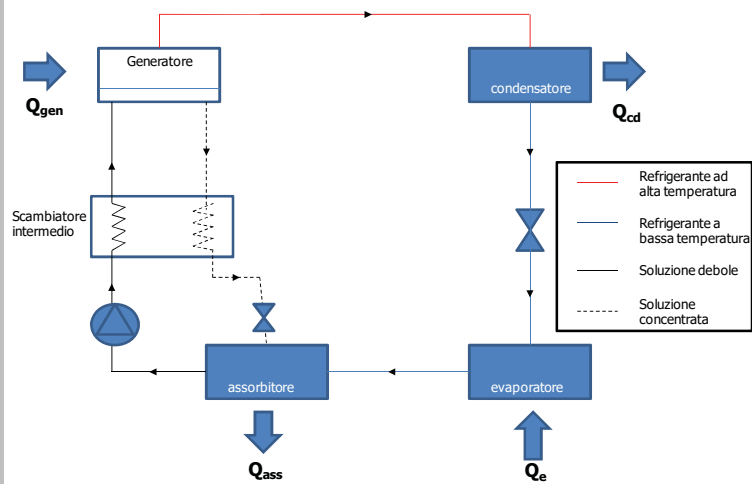
Valutazioni energetiche

Dati tecnici di GHP in commercio



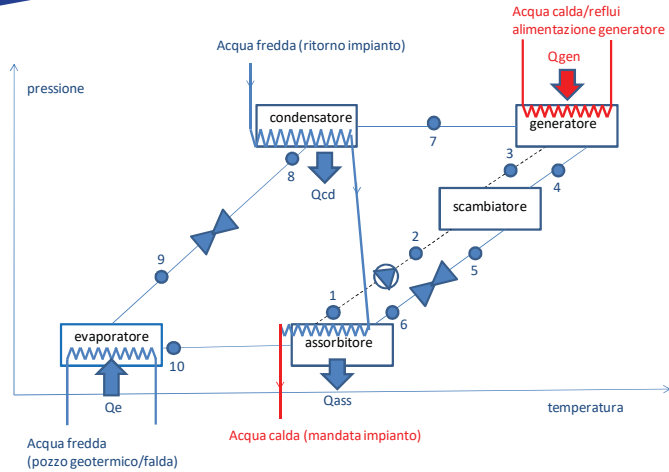

 DIN
 Università di Bologna
 www.unibo.it

AHP

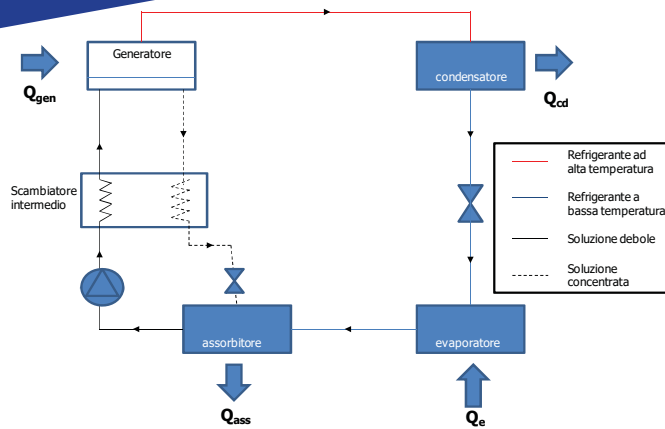



 DIN
 Università di Bologna
 www.unibo.it

AHP



AHP: parametri energetici



$$GUE = \frac{Q_{i,tot}}{Q_{gen}} = \frac{Q_{cd} + Q_{ass}}{Q_{gen}}$$

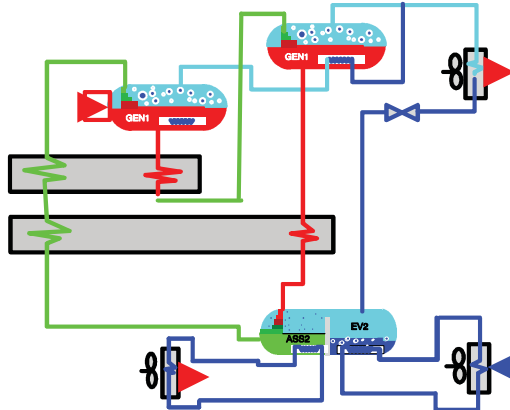
$$COP_t = \frac{Q_{i,tot}}{Q_{gen}} = \frac{Q_{cd} + Q_{ass}}{Q_{gen}}$$

$$GUE = COP_t = PER$$



Assorbimento (AHP): doppio stadio

- Lay-out macchina doppio stadio: doppio generatore (in serie) e doppio scambiatore di recupero



AHP: H₂O-BrLi

Macchine a bassa temperatura acqua-BrLi
(W-W) monostadio

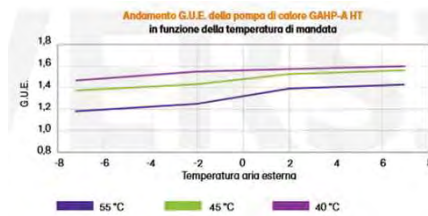
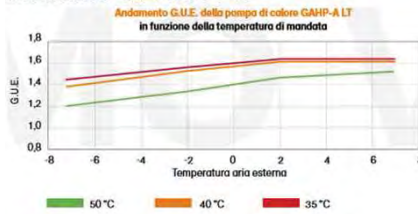
Acqua serbatoio freddo Acqua calda

T_{gen} (°C)	T_{ev} (°C)	T_{max} (°C)	GUE/COP _s
80	8	36.7	1.47
	9	37.9	1.53
	10	38.6	1.58
	11	38.6	1.60
	12	39.0	1.60

T_{gen} (°C)	T_{ev} (°C)	T_{max} (°C)	GUE/COP _s
75	8	34.7	1.55
	9	35.9	1.58
	10	36.6	1.60
	11	36.6	1.62
	12	36.6	1.62

AHP: NaCl-H₂O

Macchine a fiamma diretta A-W



Pompa di calore a CO₂



Uso della CO₂ (R744) come fluido refrigerante

CO₂ sostanza naturale con basso GWP (GWP=1)

Non infiammabile

Non tossica

Chimicamente stabile

composto	GWP	note
CO ₂	1	riferimento
R12	8500	CFC
R11	4000	CFC
R500	8500	miscela di R12 e R152a
R502	4300	miscela di R22 e R115
R22	1700	HCFC
R123	90	HCFC
R134a	1300	HFC
R290	3	idrocarburo
R407c	1610	miscela di R32, R125 e R134a
R410a	1890	miscela di R32 e R125
CH ₄ (metano)	24	idrocarburo

Pompa di calore a CO2

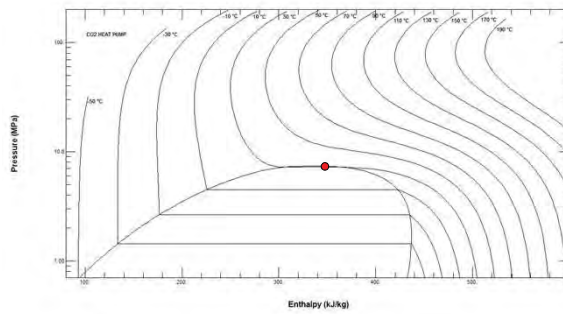
Uso della CO2 (R744) come fluido refrigerante

Parametri termodinamici critici
 $P_{cr} = 7.38 \text{ MPa} = 73.8 \text{ bar}$
 $T_{cr} = 30.98^\circ\text{C}$

Ciclo di lavoro trans-critico

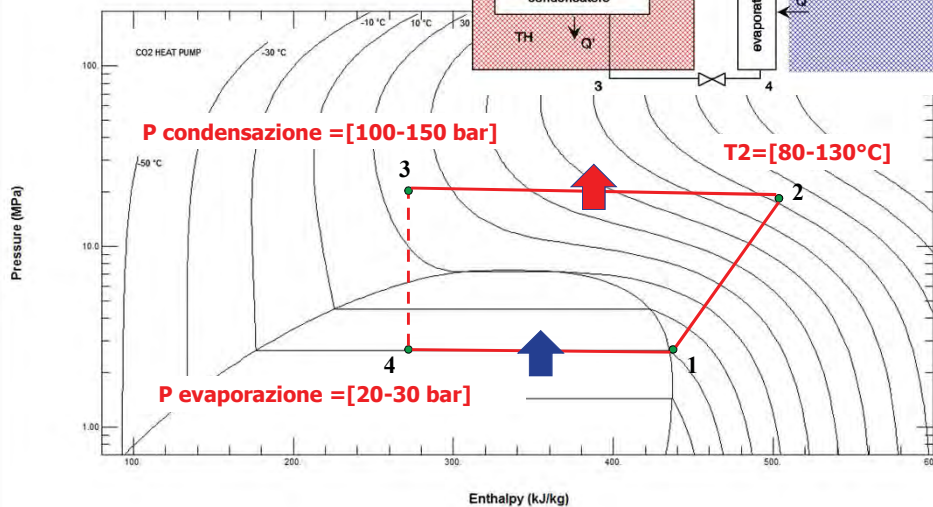
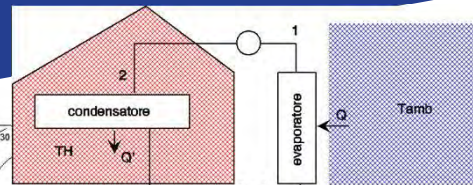


DIN
 Università di Bologna
 www.unibo.it



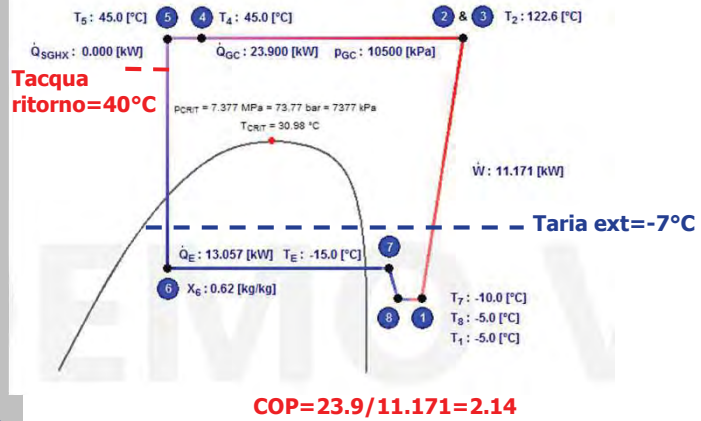
Pompa di calore a CO2

Ciclo di lavoro



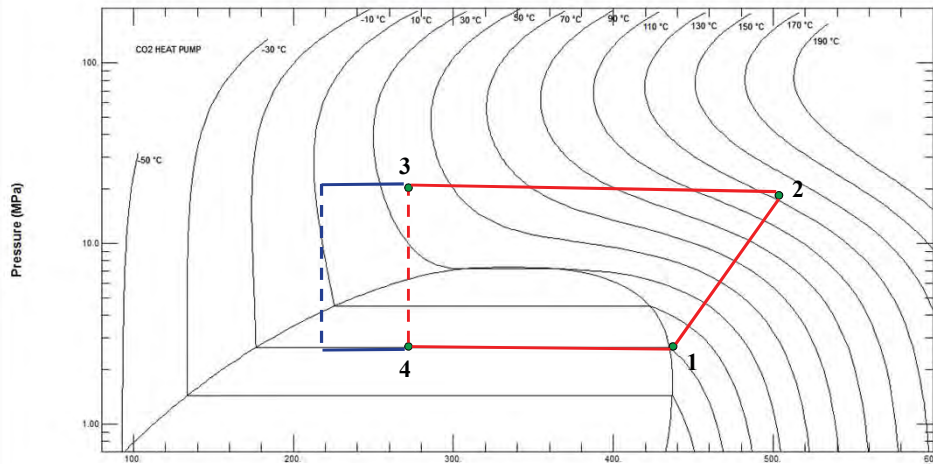
Pompa di calore a CO2

Uso della CO2 (R744) come fluido refrigerante



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

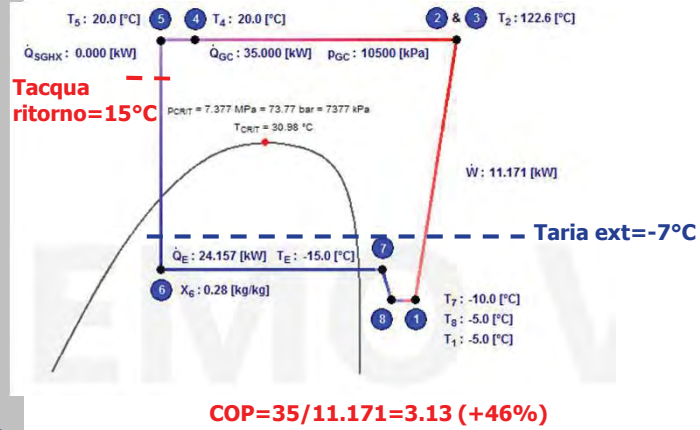
Pompa di calore a CO2



Se la temperatura dell'acqua in ingresso anziché essere pari a 40°C fosse pari a 15°C (come nel caso dell'ACS) il COP aumenterebbe!!!

Pompa di calore a CO2

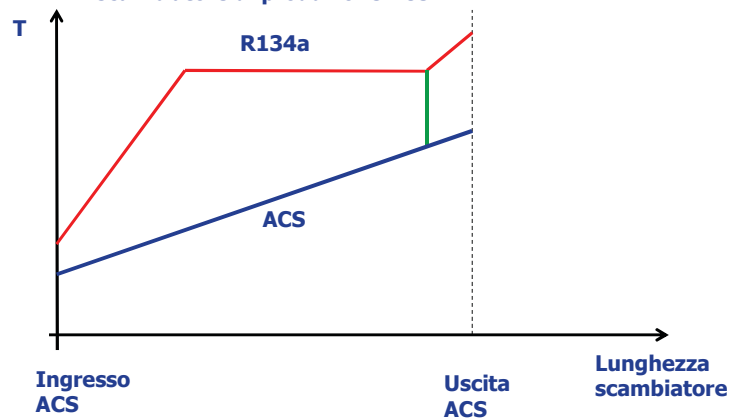
Abbassamento temperatura acqua di ritorno



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Pompa di calore a CO2

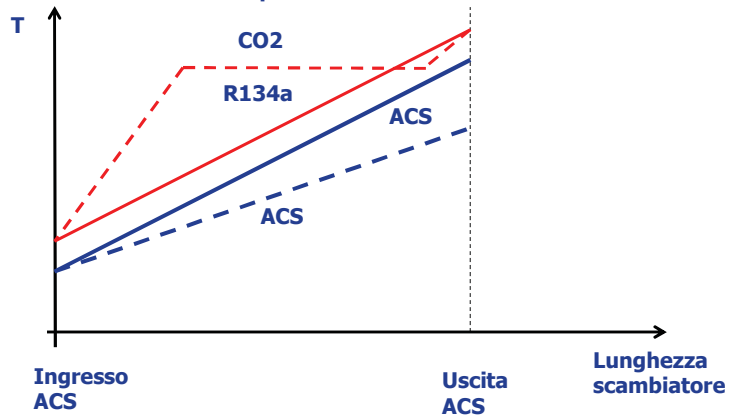
Andamento temperatura lungo scambiatore di produzione ACS



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Pompa di calore a CO2

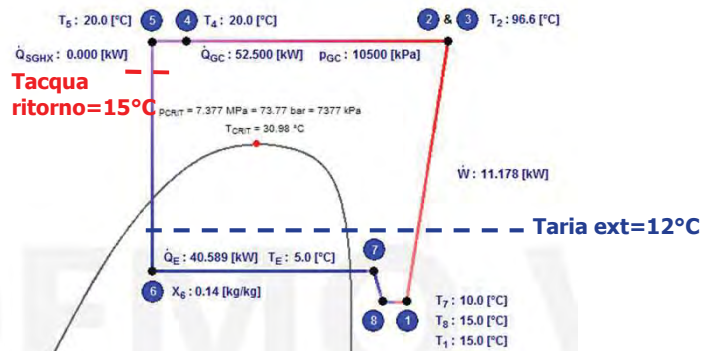
Andamento temperatura lungo scambiatore di produzione ACS



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Pompa di calore a CO2

Aumento della temperatura dell'aria esterna



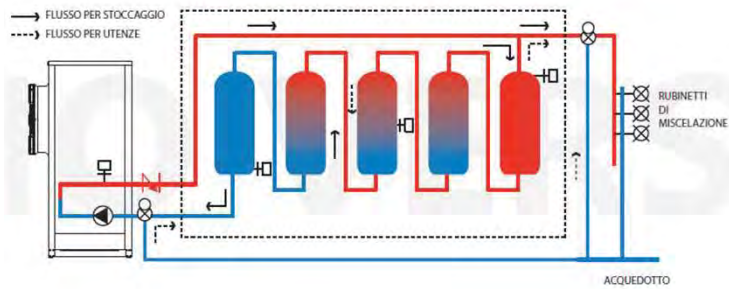
$$\text{COP} = 52.5 / 11.178 = 4.7$$



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Pompa di calore a CO2

Come mantenere bassa la temperatura dell'acqua in ingresso nella PdC: sola produzione ACS

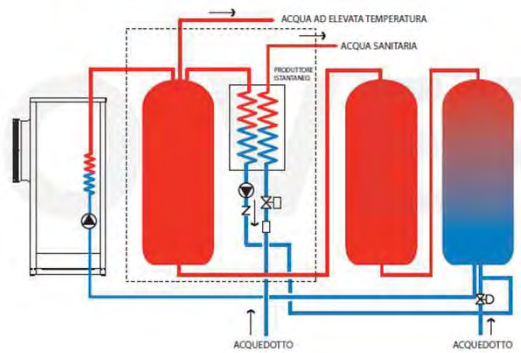


DIN
Università di Bologna
www.unibo.it

Pompa di calore a CO2

Come mantenere bassa la temperatura dell'acqua in ingresso nella PdC: produzione ACS + radiatori

SISTEMA ACS E ACQUA AD ALTA TEMPERATURA



DIN
Università di Bologna
www.unibo.it