

# Cogenerazione e trigenerazione:

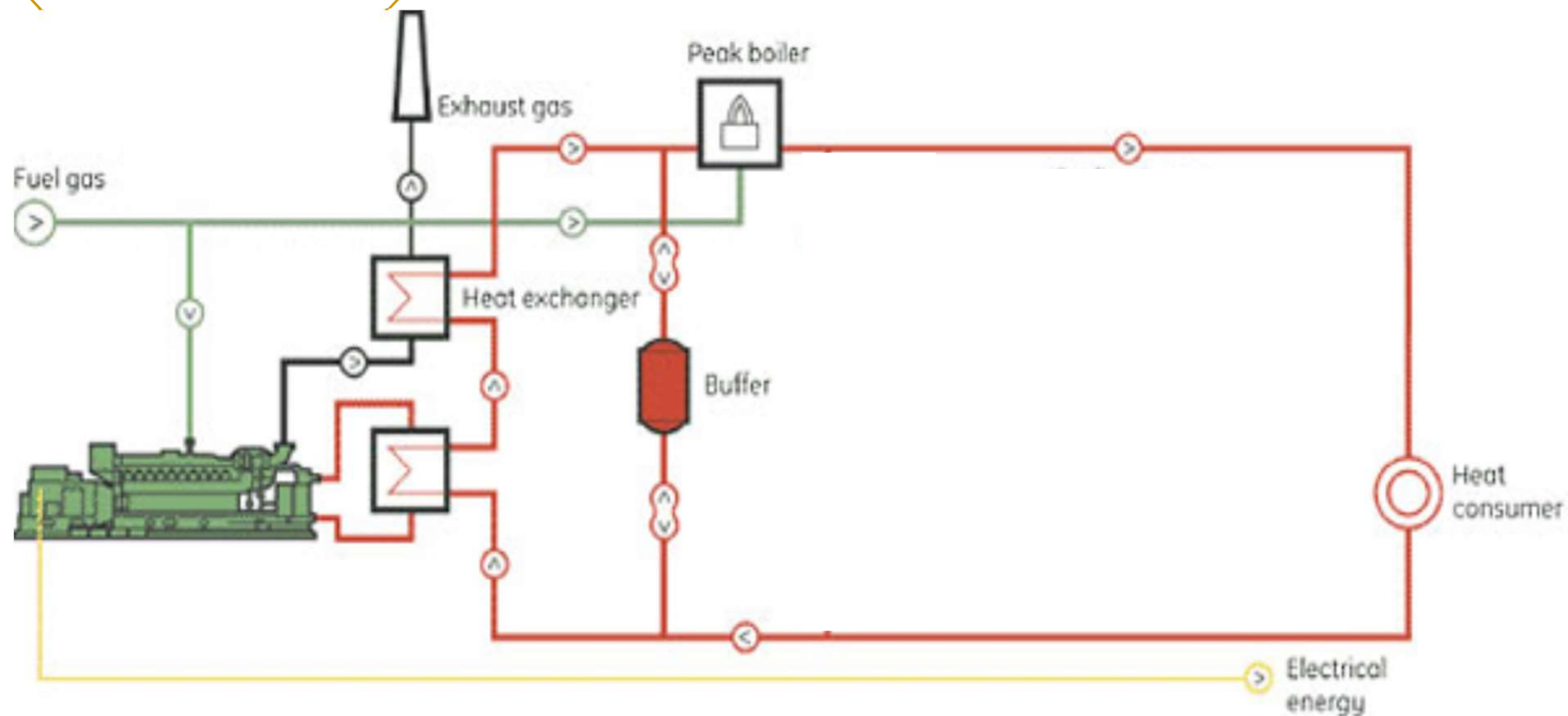
## Macchine ad assorbimento per la trigenerazione e il solar-cooling



**prof. Mauro REINI**  
**docente di sistemi per l'energia e l'ambiente**  
**Università di Trieste – Polo di Pordenone**

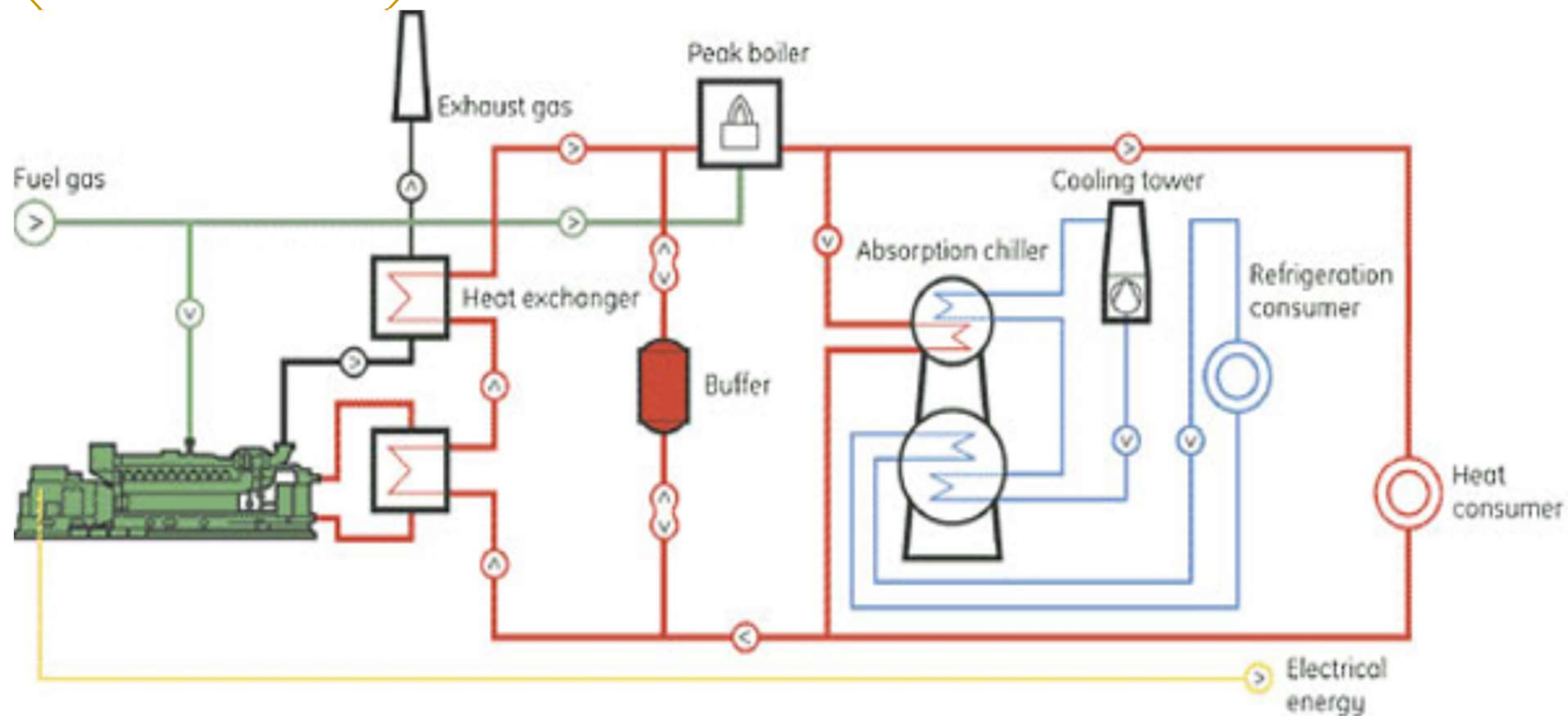


# Sistemi Tri-generativi



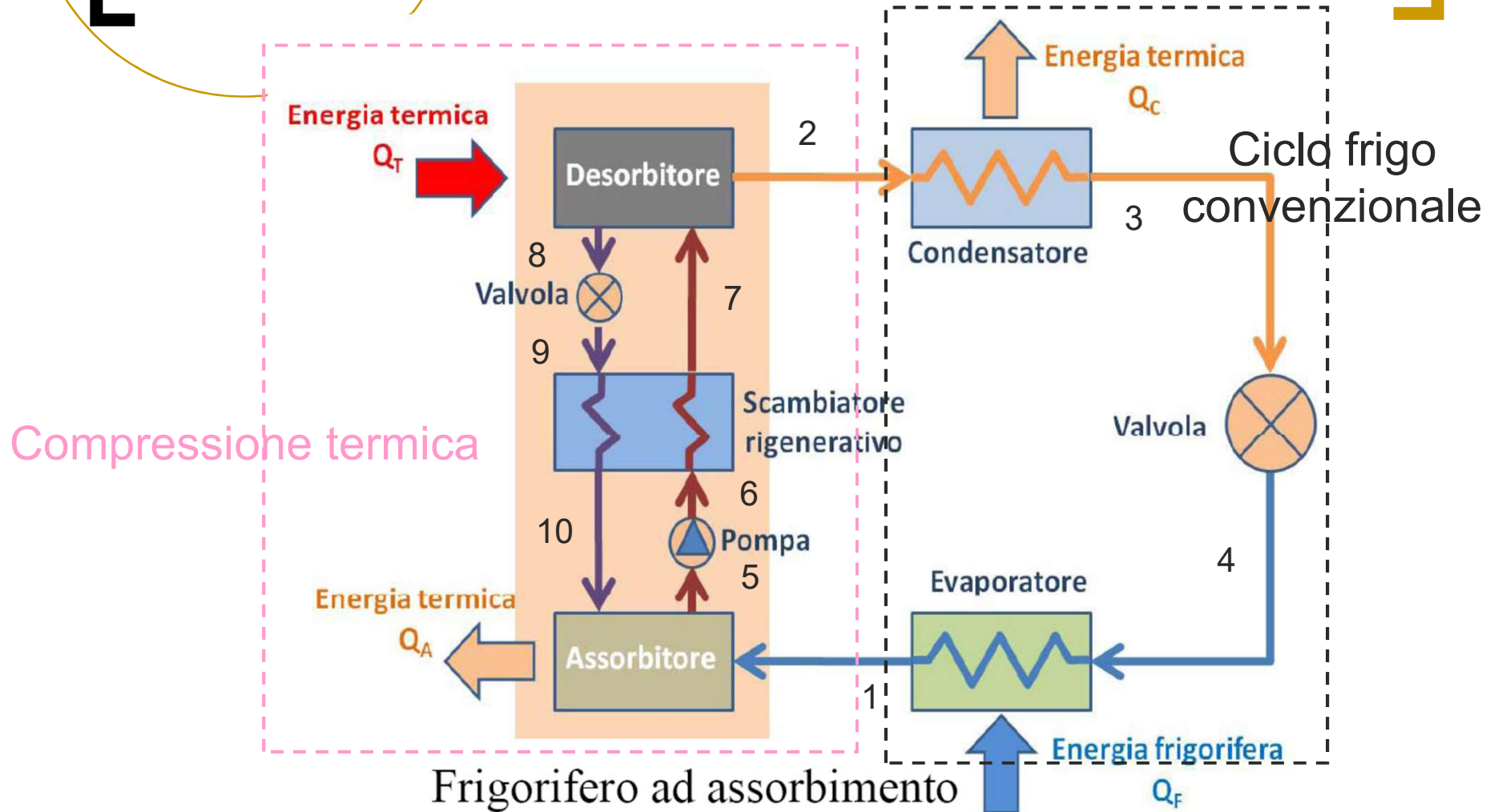
Tutte le utenze stagionali sono affette da un ridotto utilizzo del cogeneratore nei mesi estivi: Ampio ricorso al calore di integrazione, riduzione della efficienza annuale del CHP, PBP lunghi.

# Sistemi Tri-generativi

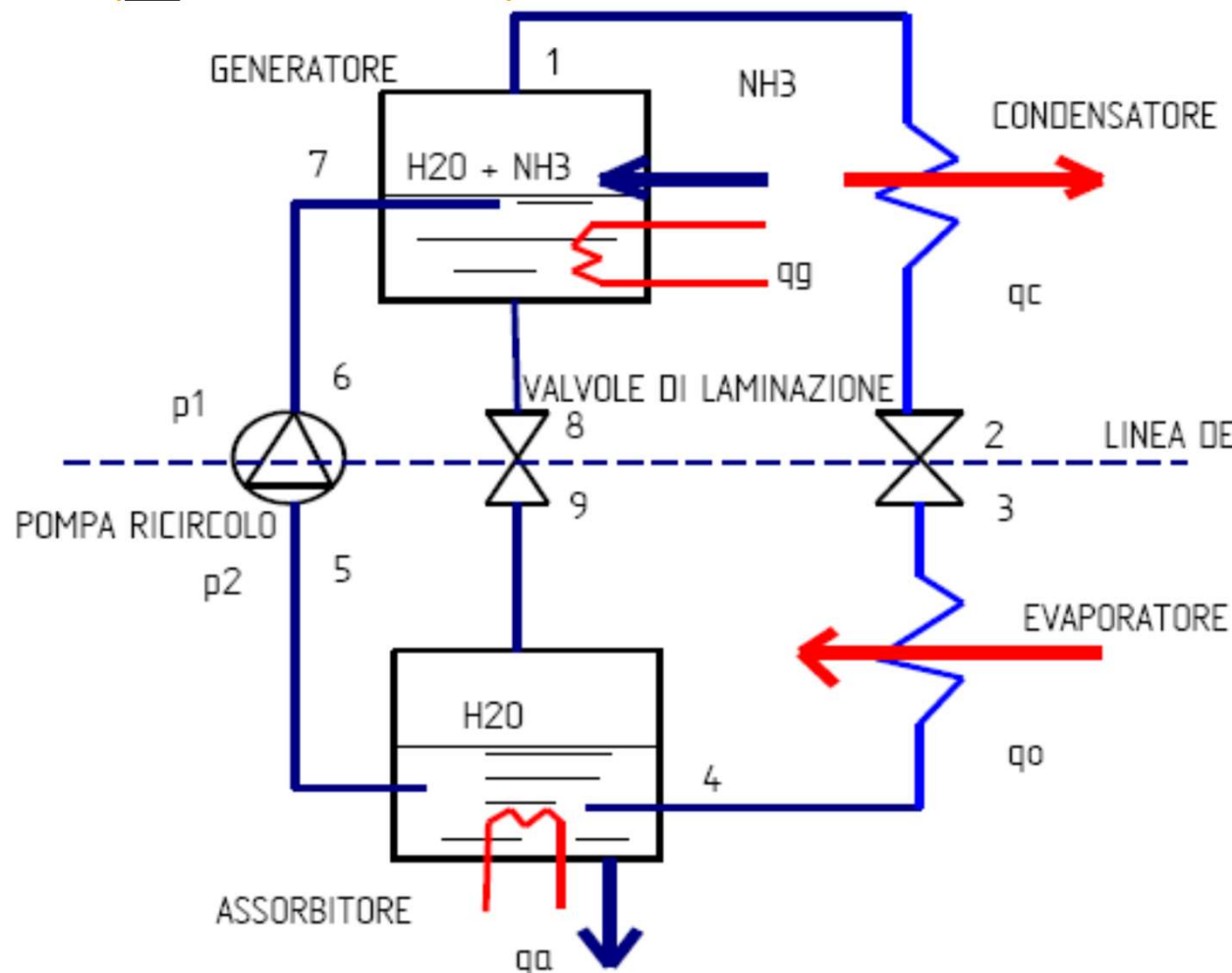


**I sistemi tri-generativi consentono di utilizzare il calore cogenerato anche in estate, producendo acqua refrigerata.**

# Macchine frigo ad assorbimento



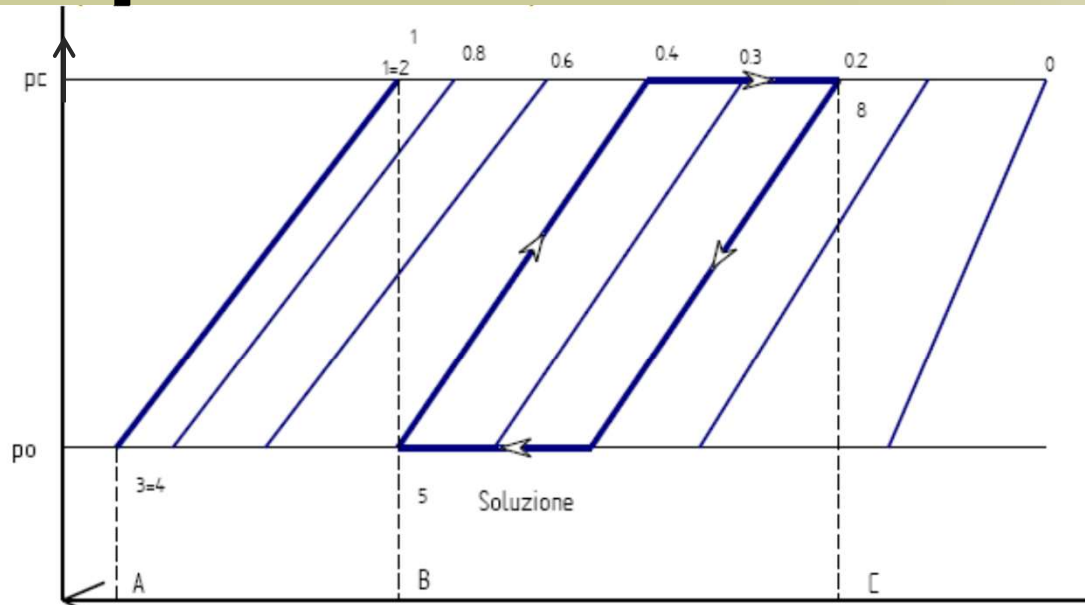
# Macchine frigo ad assorbimento



Per acqua ed ammoniaca si hanno  $130^{\circ}\text{-}150^{\circ}\text{C}$  al generatore e  $45^{\circ}\text{-}55^{\circ}\text{C}$  in assorbitore/condensatore. La temperatura all'evaporatore (funzione della  $p_v$ ) è di qualche grado sotto lo zero.

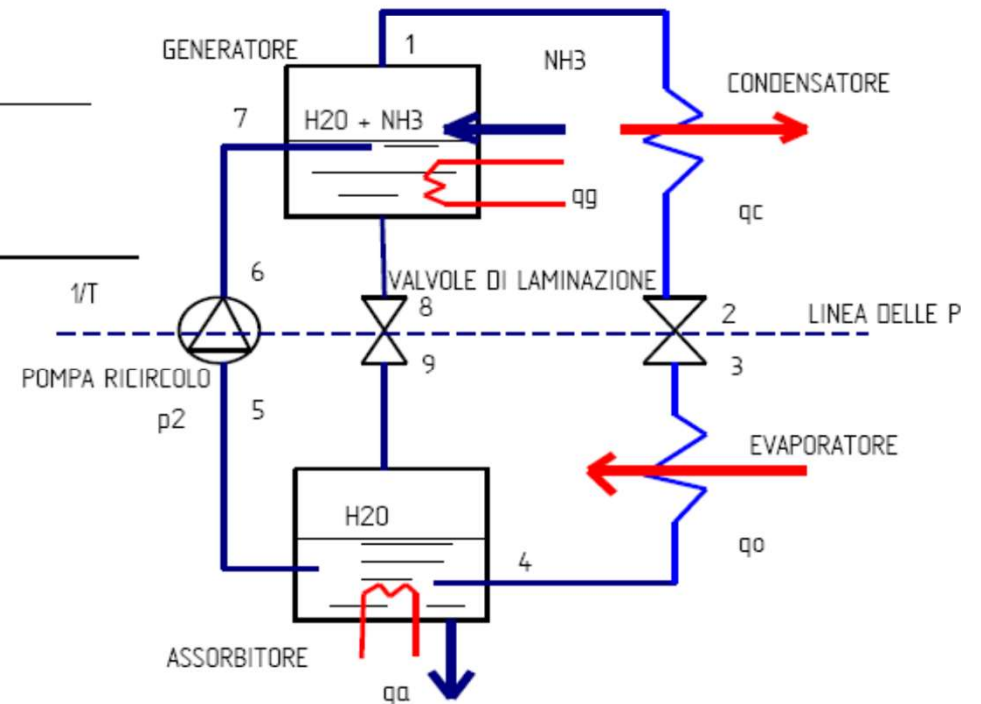
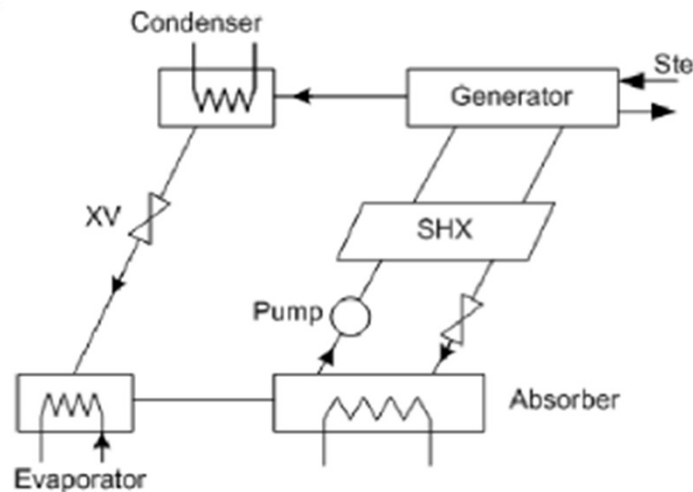
Si utilizzano anche miscele acqua-bromuro di litio o acqua-fluoruro di litio (è l'acqua che funge da refrigerante), che hanno il pregio di funzionare a temperatura inferiore (circa  $80^{\circ}\text{C}$ ).

# Macchine frigo ad assorbimento

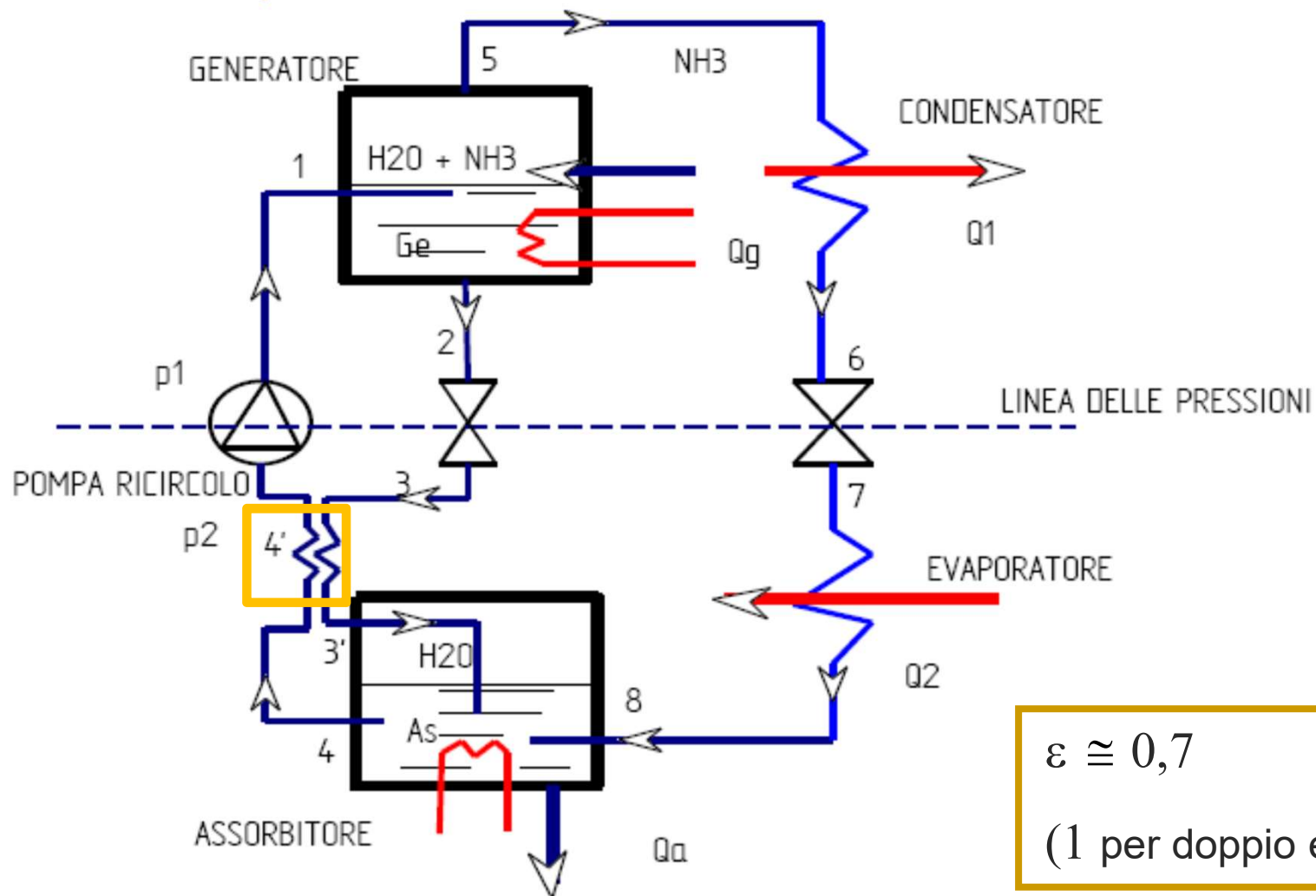


$$q_0 + q_g = |q_a| + |q_c|$$

$$\varepsilon = \frac{q_0}{q_g + |P_p|} \cong \frac{q_0}{q_g}$$



# Macchine frigo ad assorbimento con recupero interno di calore



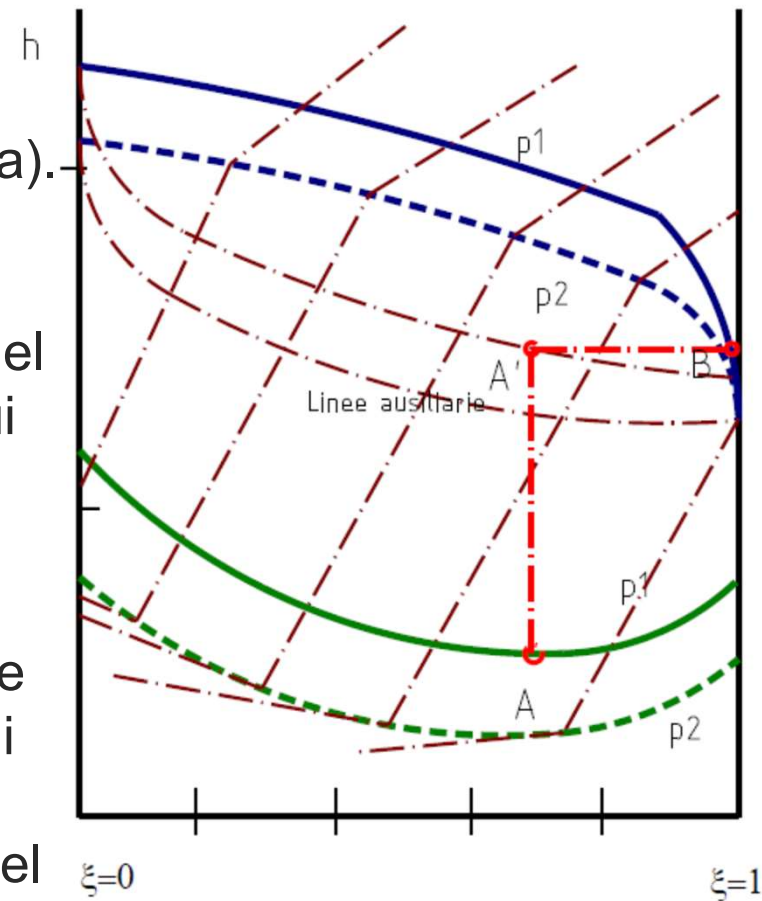
$\varepsilon \cong 0,7$   
(1 per doppio effetto)

# Abaco di Bosnjacovic

È un diagramma concentrazione-entalpia (non concentrazione-temperatura).

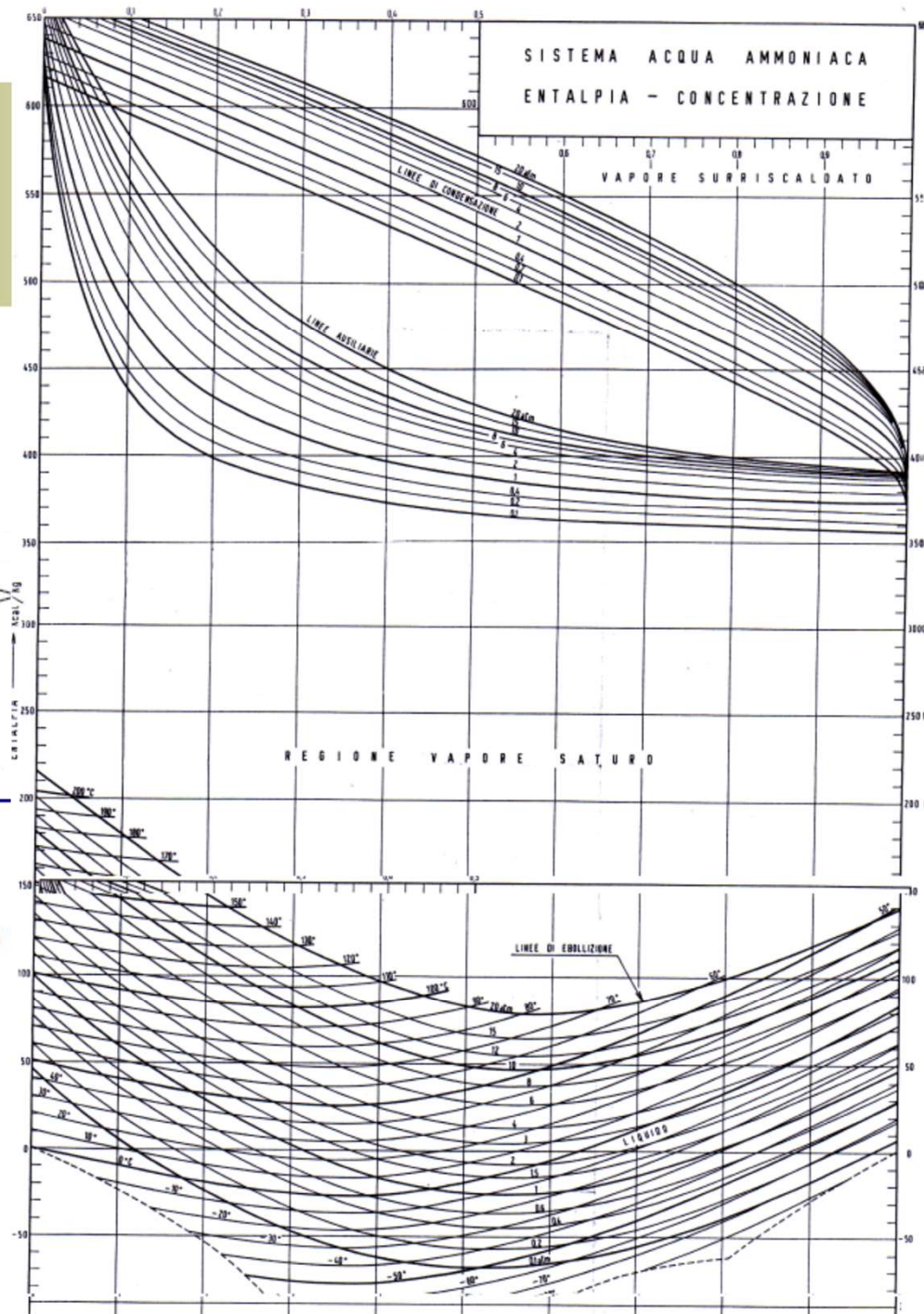
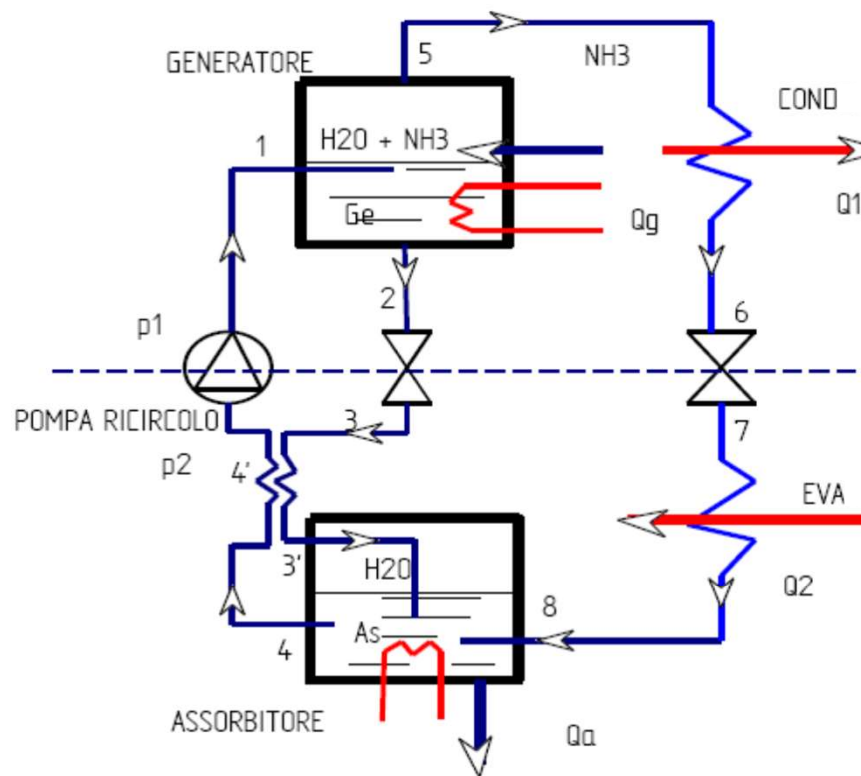
Le curve ausiliarie servono per determinare il punto corrispondente del vapore in equilibrio con il liquido di cui sono note ( $\xi$  e  $T$ ) o ( $\xi$  e  $p$ ).

Il liquido segnato con A è in equilibrio con il vapore B determinato dall'intersezione della retta orizzontale passante per A' (con A' sull'ausiliaria di pari pressione e concentrazione di A) con la curva *vaporus* alla pressione del liquido.

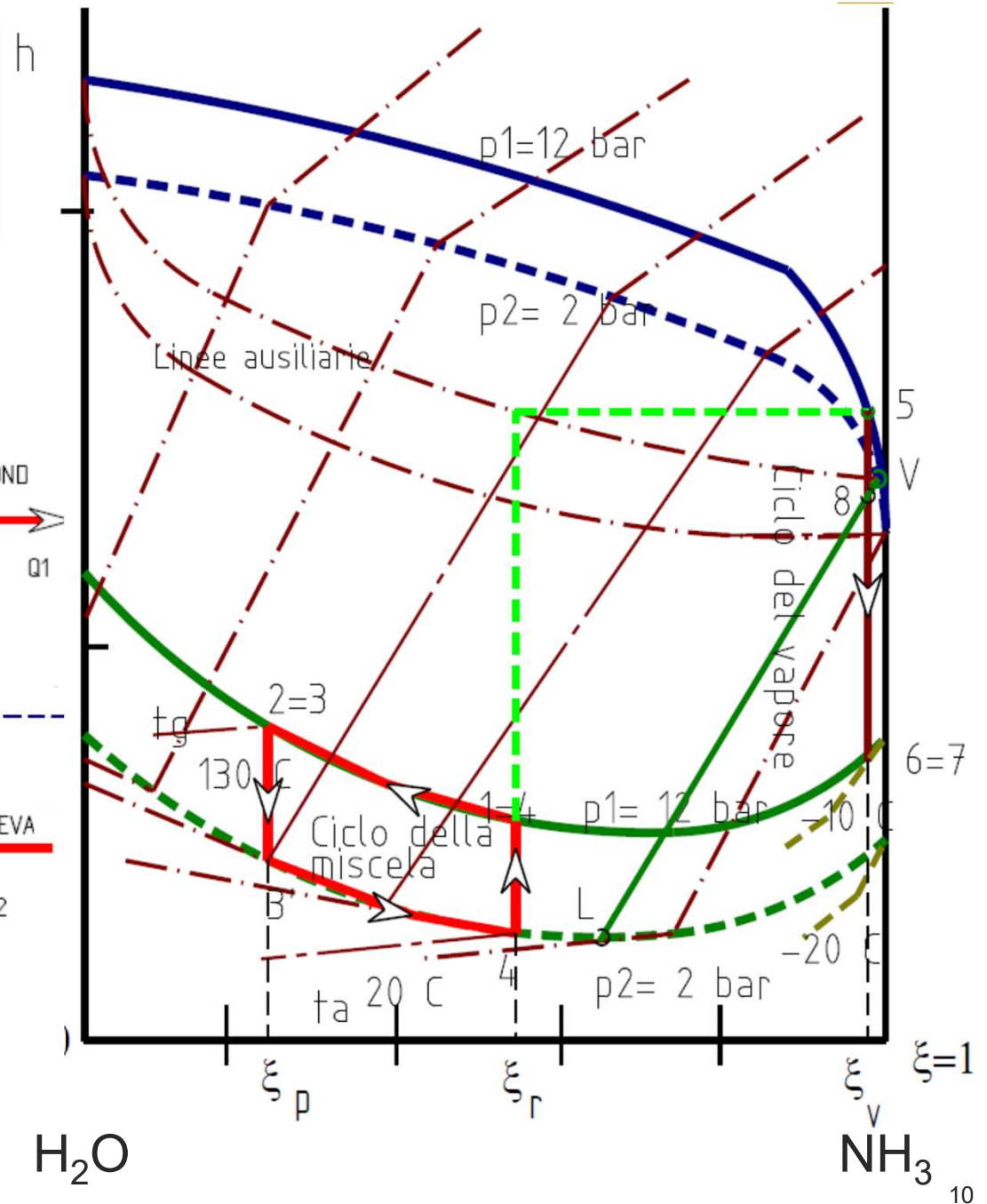
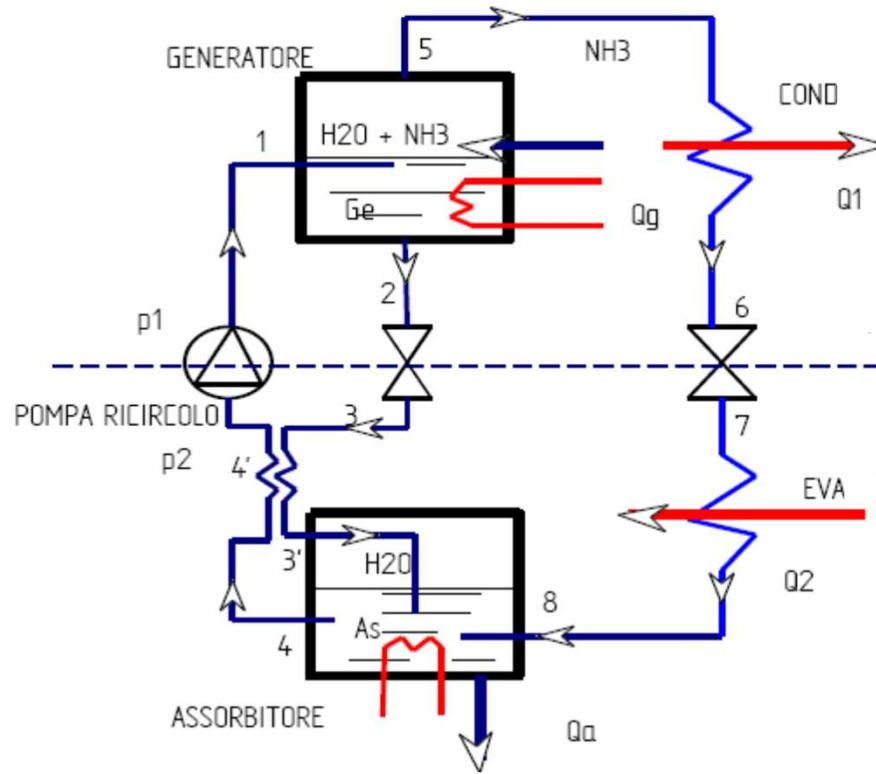




# Abaco di Bosnjacovic

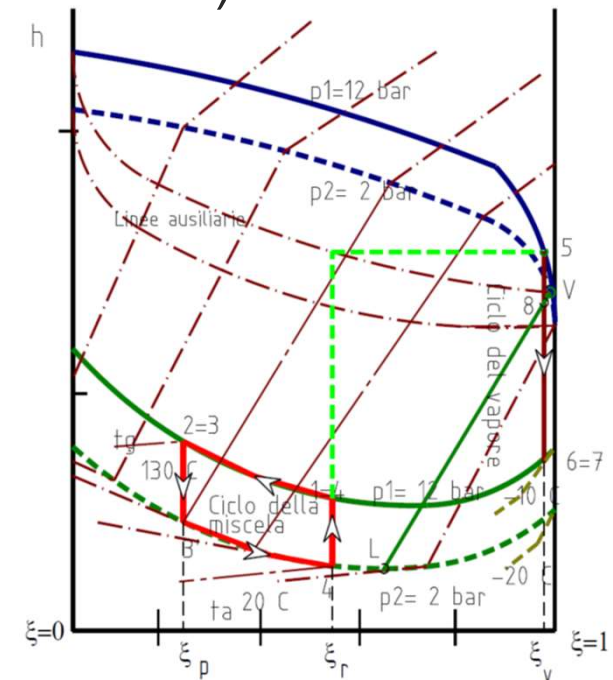
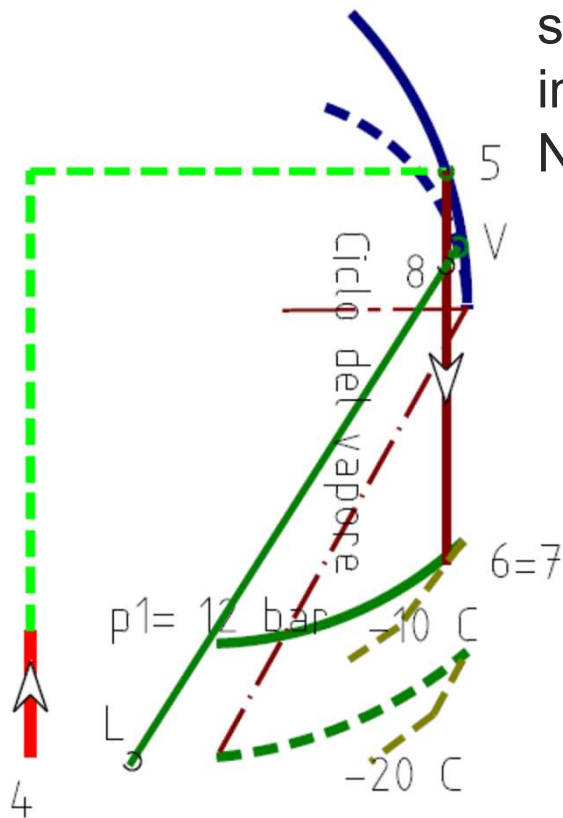


# Abaco di Bosnjacovic



# Abaco di Bosnjacovic

Per determinare 8 occorre conoscere le condizioni della miscela tutta liquida alla temperatura di inizio vaporizzazione (L) e di quella tutta vapore nelle stesse condizioni, (V); le condizioni 8 sono date dalla intersezione della retta  $\xi_v = \text{costante}$  (la percentuale di  $\text{NH}_3$  rimane costante nella miscela) con la retta LV.



# Macchine frigo ad assorbimento

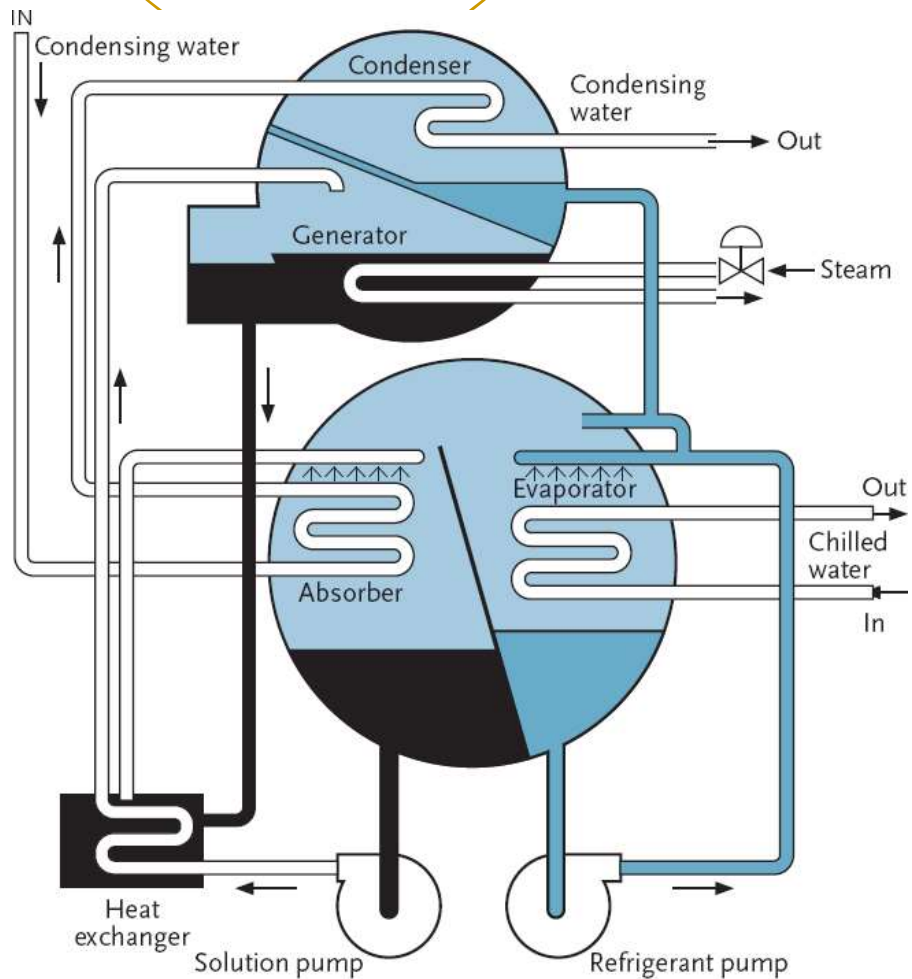
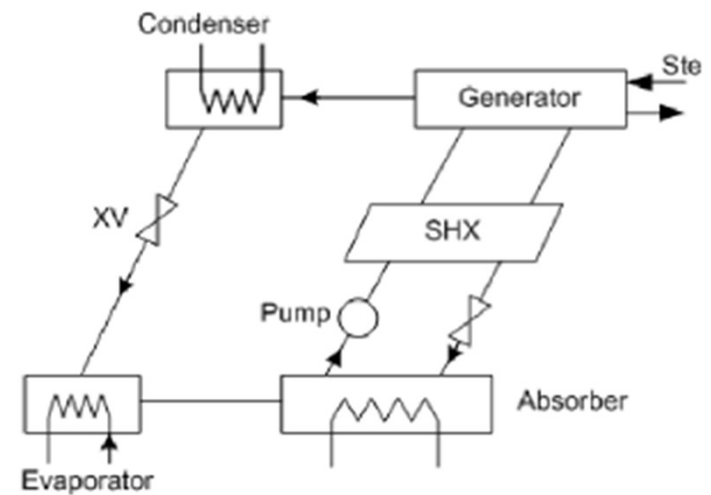
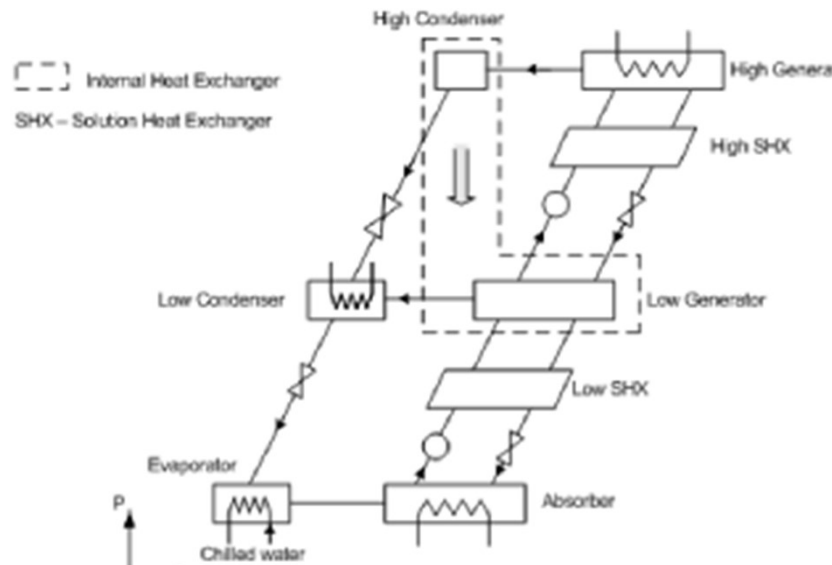
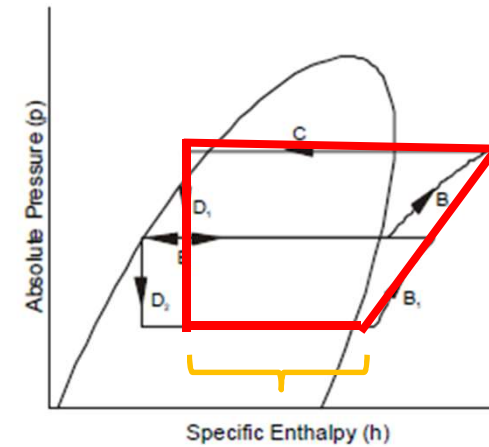
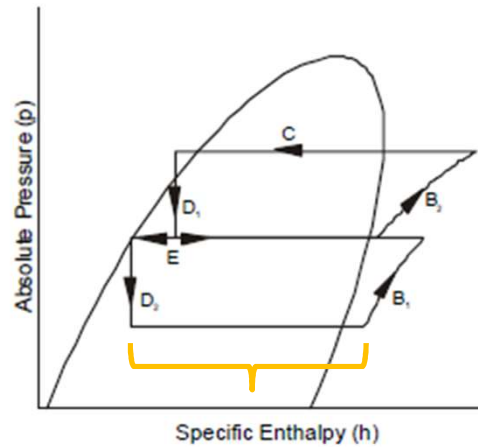
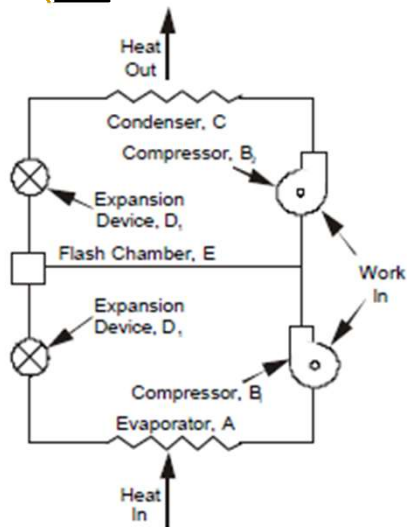


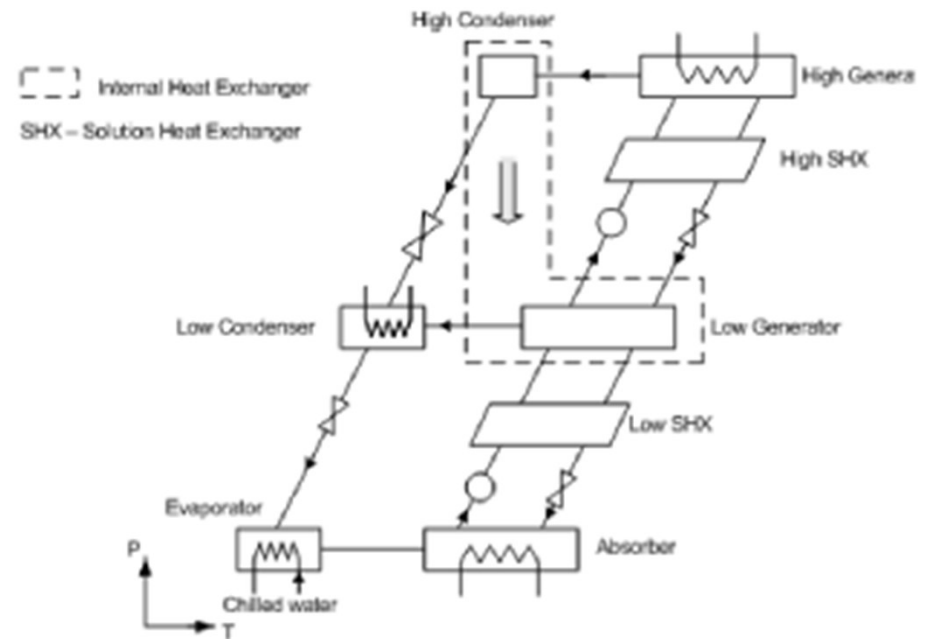
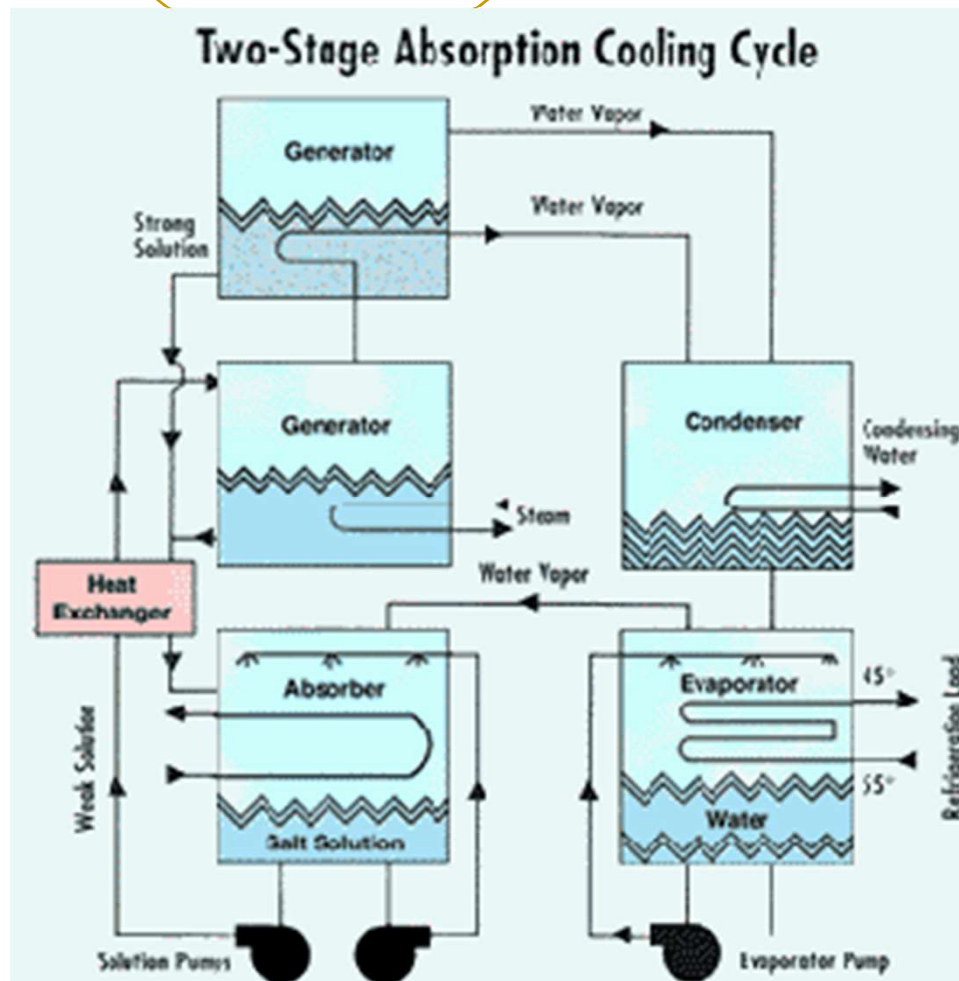
Figure 3 Components of a two shell lithium bromide water chiller



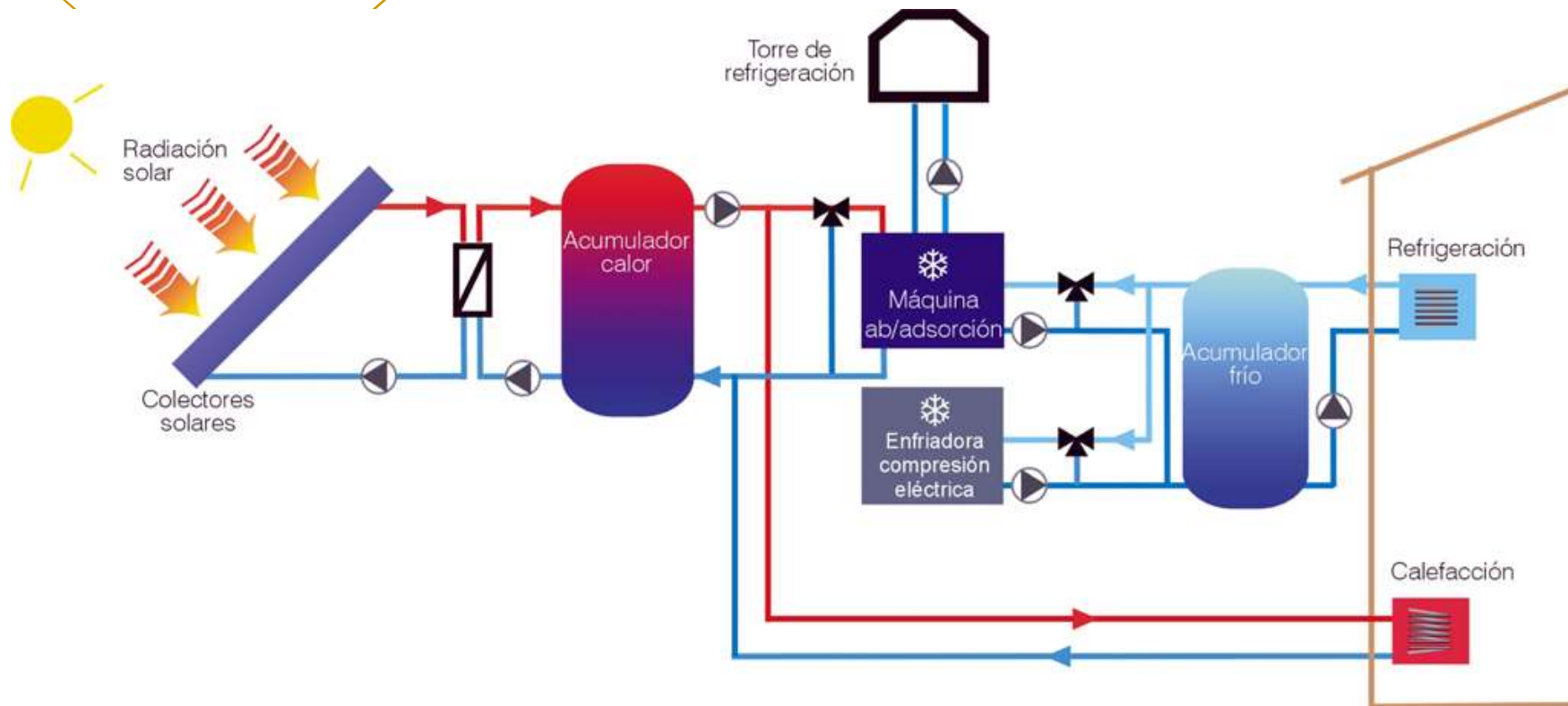
# Assorbitori a doppio effetto



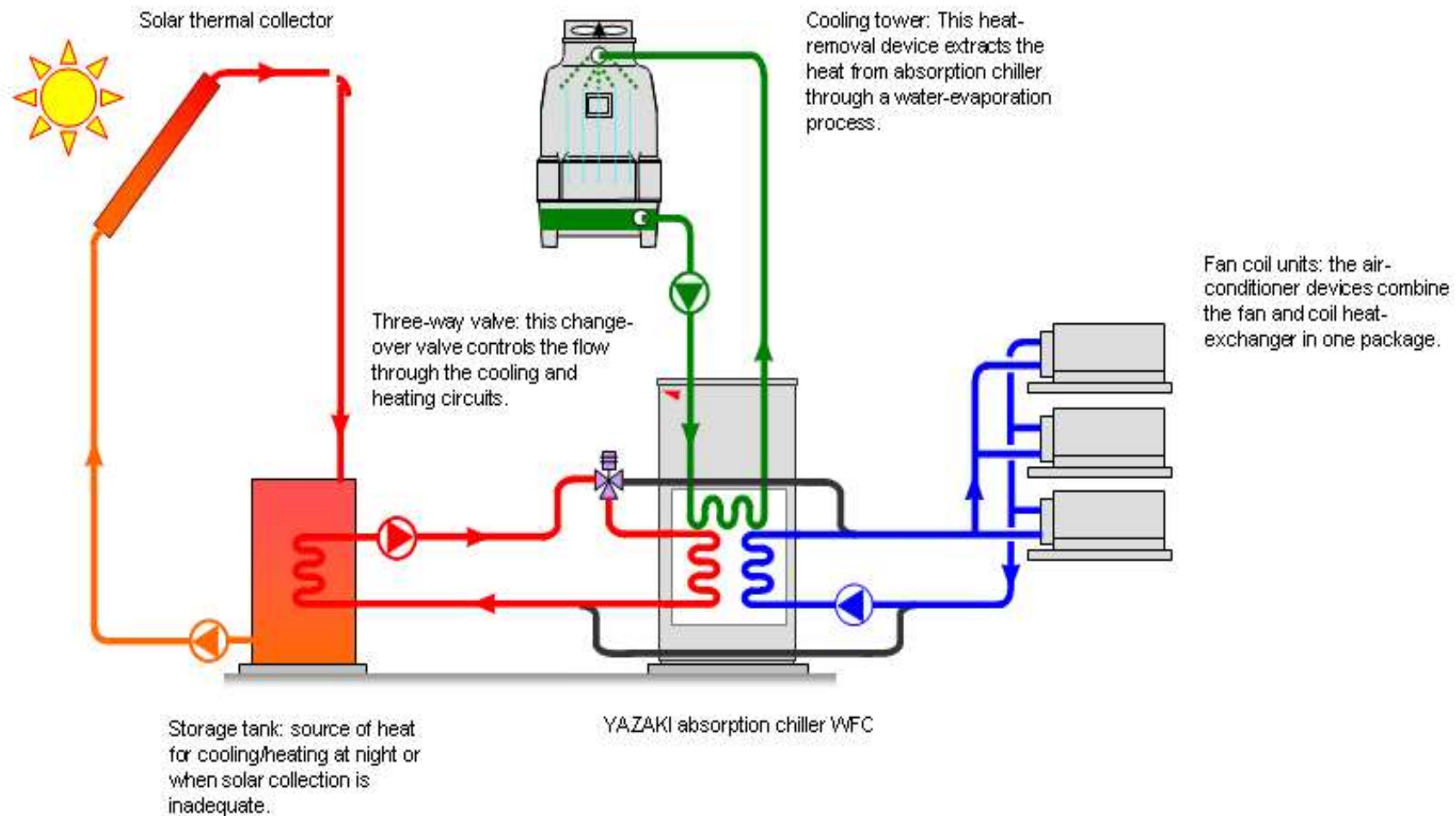
# Assorbitori a doppio effetto



# Sistemi solar cooling ad assorbimento



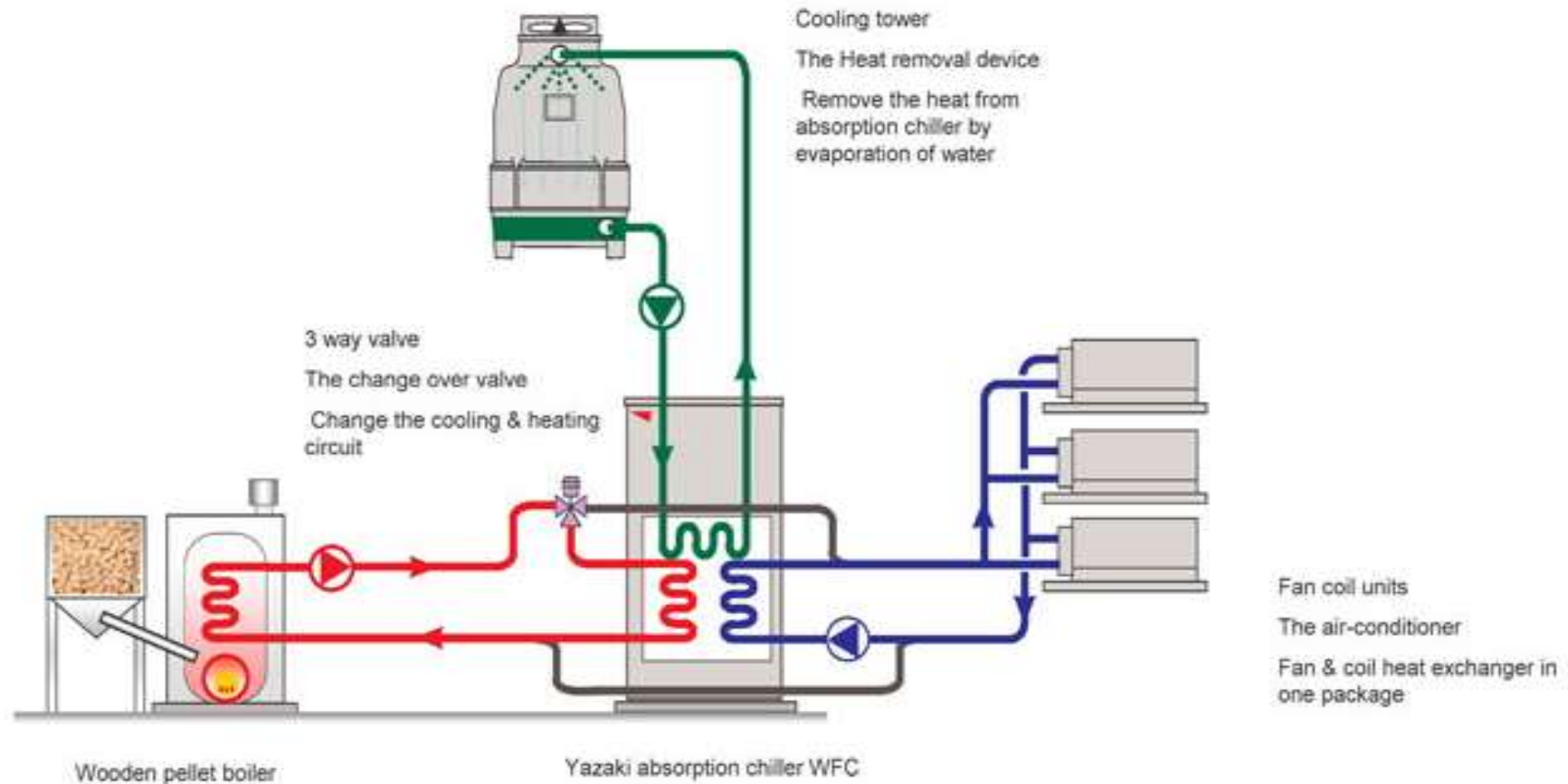
# Sistemi solar cooling ad assorbimento



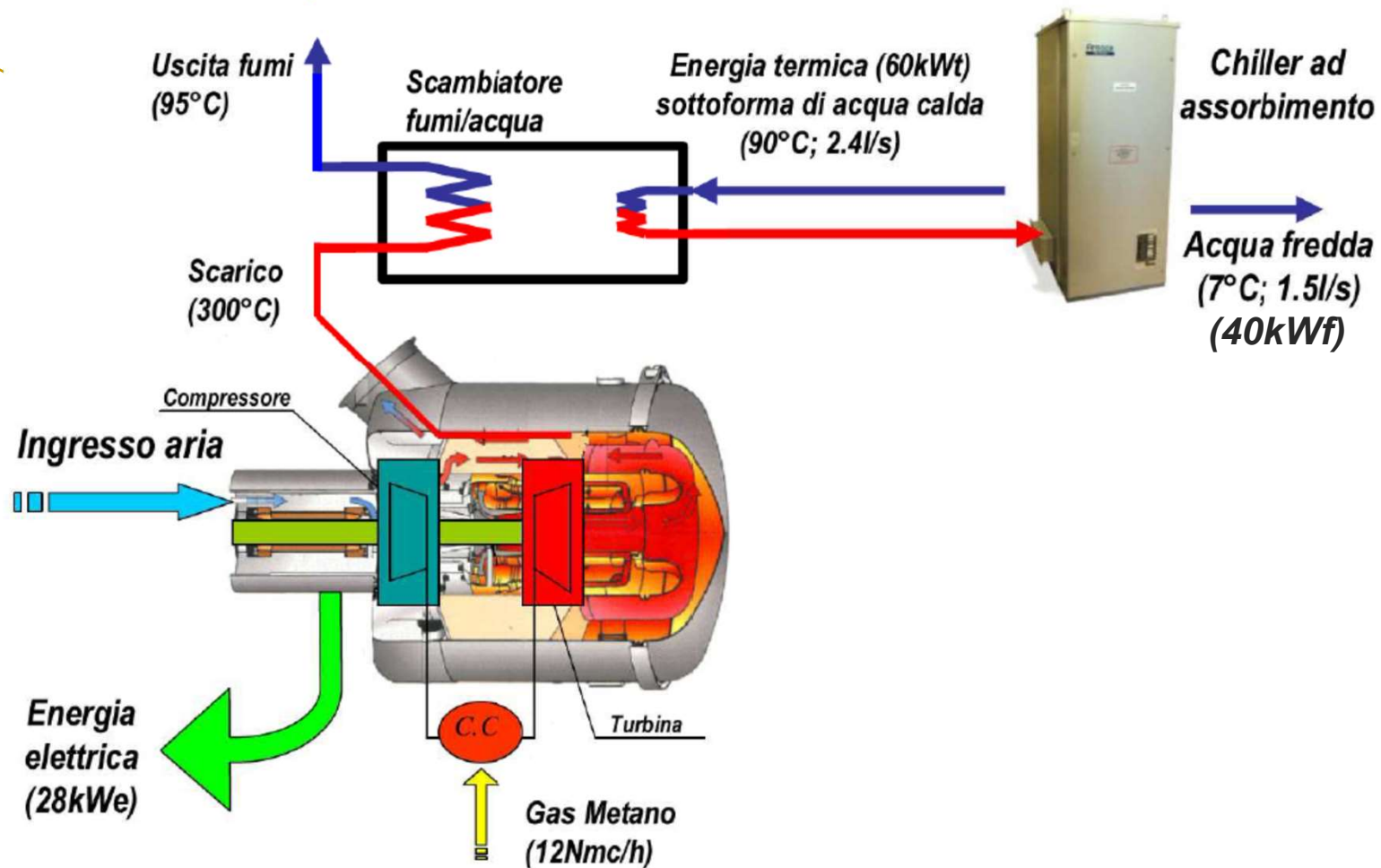


# Sistemi ad assorbimento con RES

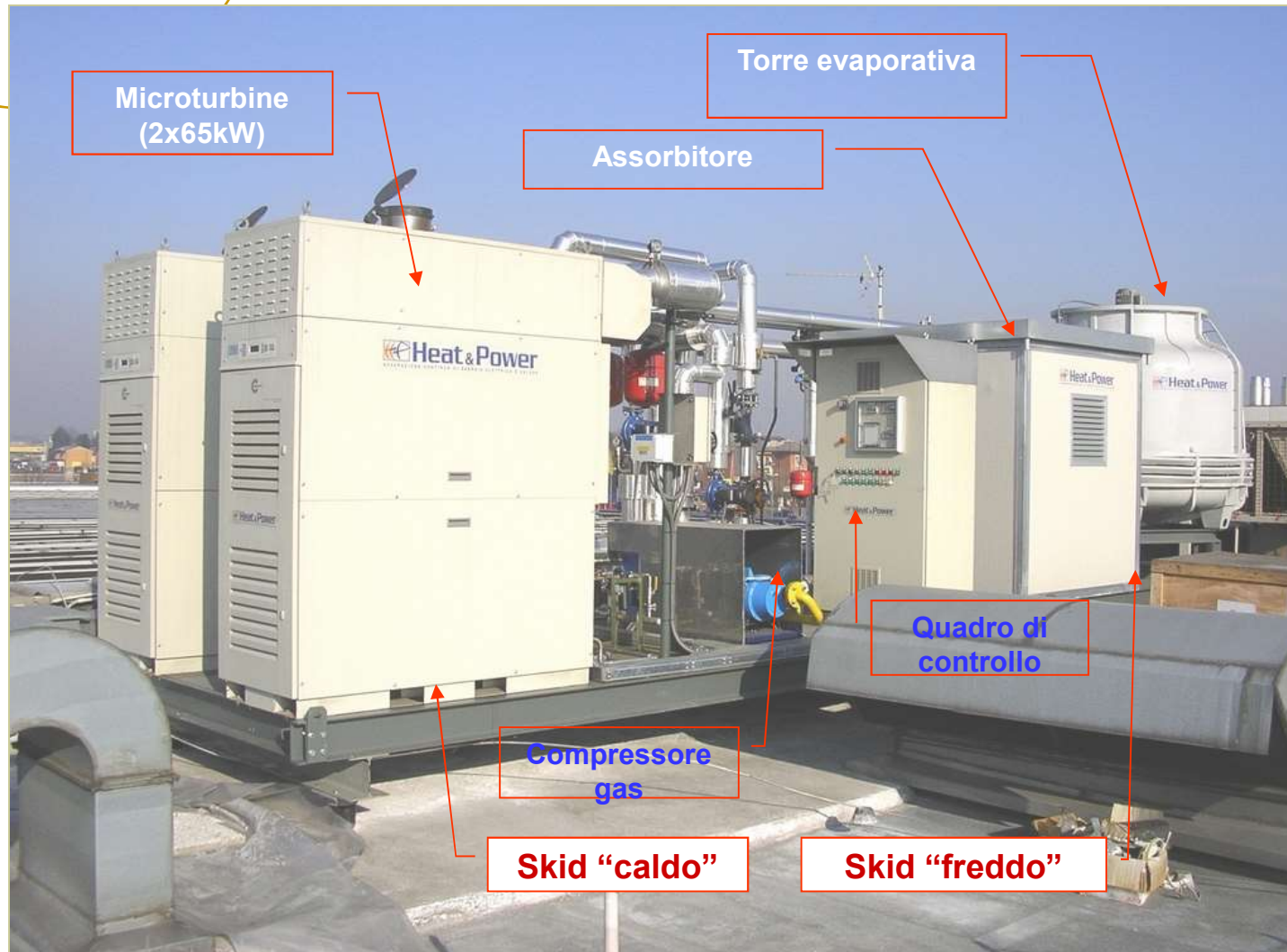
## Waste Heat from Biomass



# Sistemi Tri-generativi con $\mu$ TG



# Un esempio di Tri-generazione



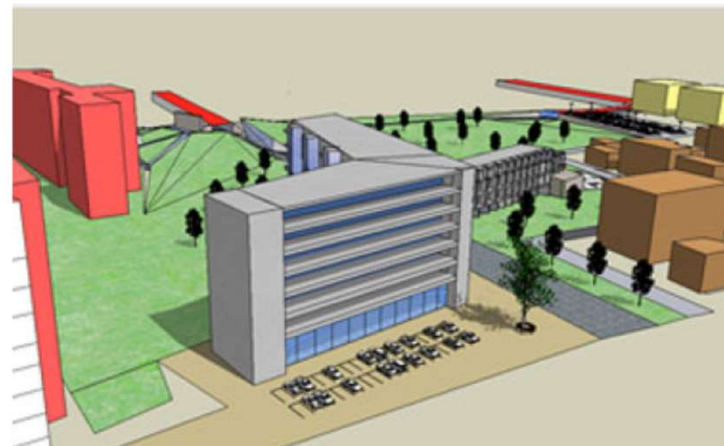
# Possibili impieghi della trigenerazione

*Grandi edifici*

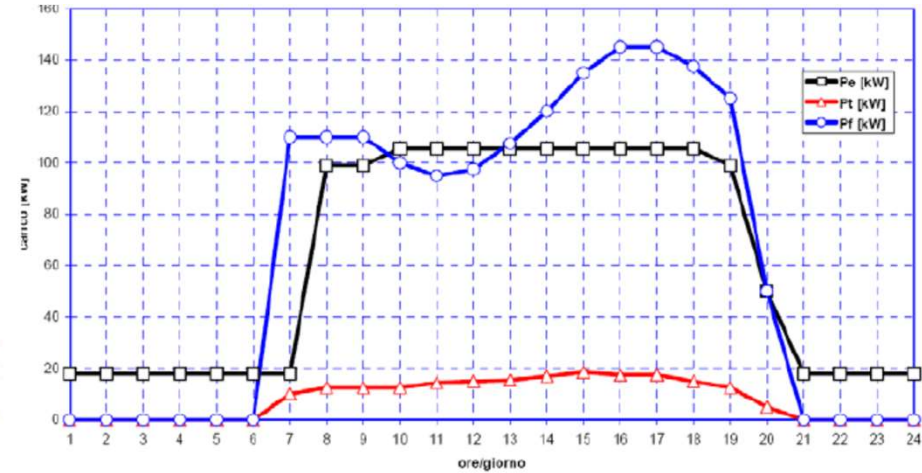
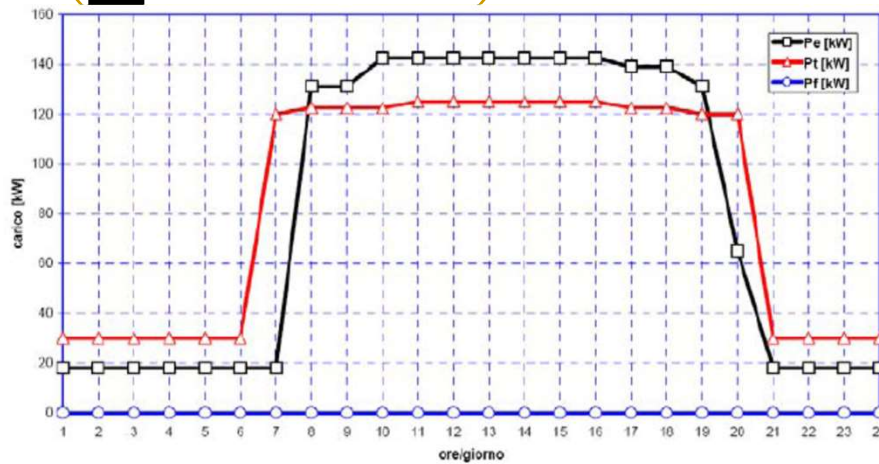


*Ospedali*

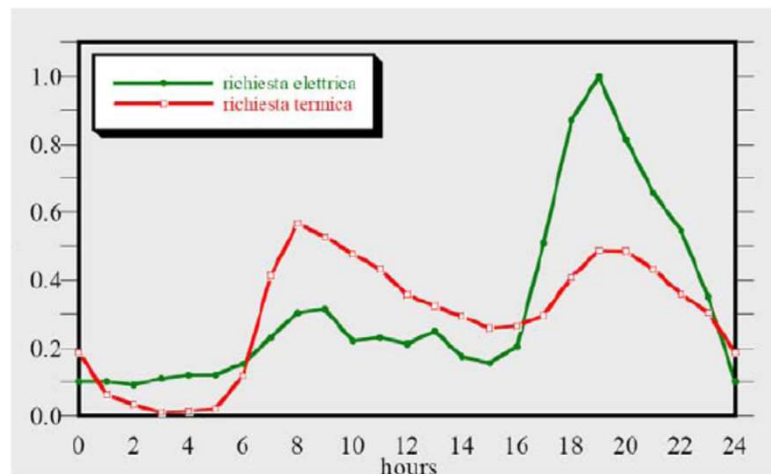
*Edifici residenziali (Condomini)*



# Variabilità dei carichi delle utenze durante la giornata - tipo



Utenza nel **civile**  
nelle 24 ore

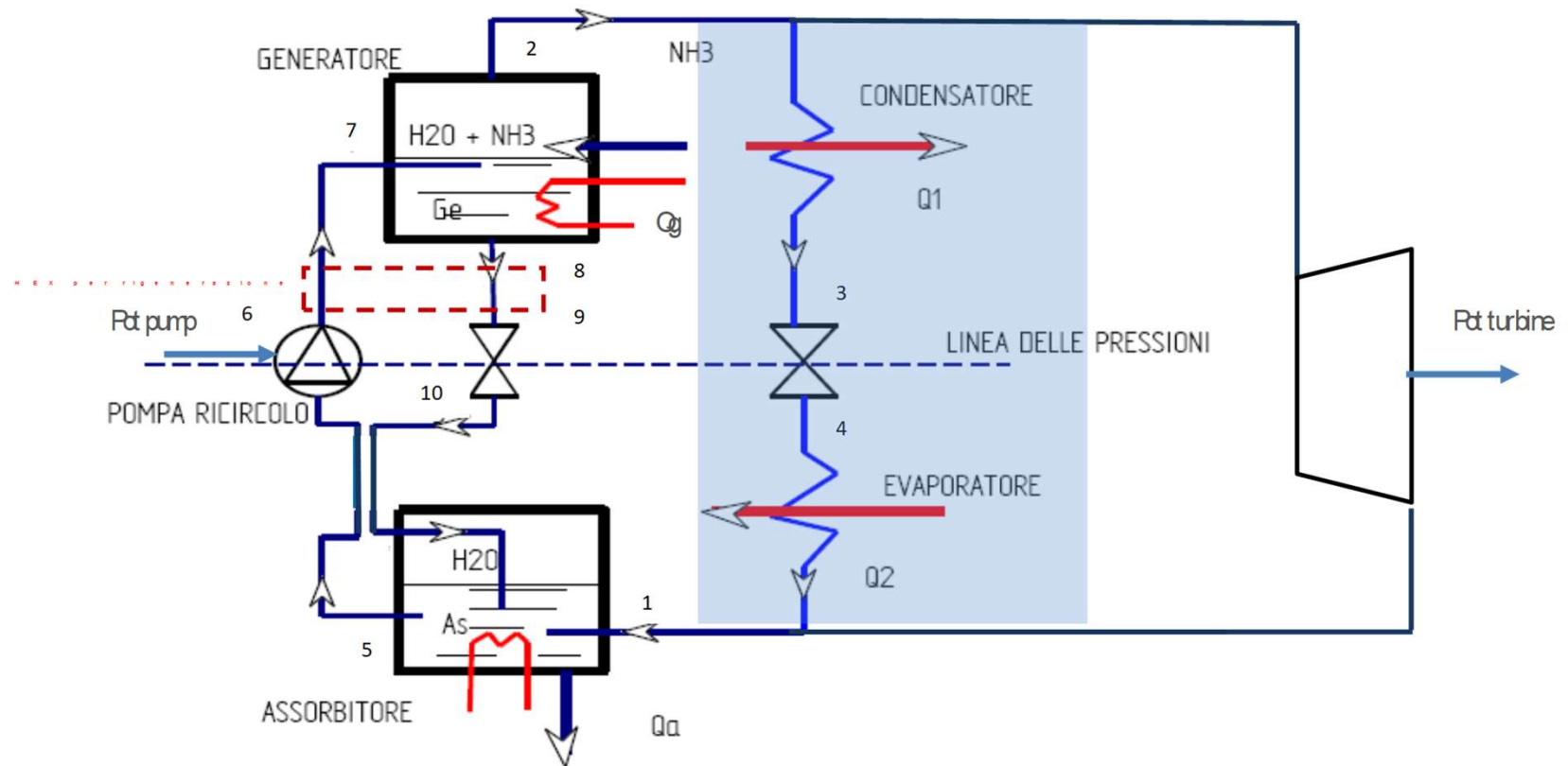


Utenza nel **terziario**  
nelle 24 ore

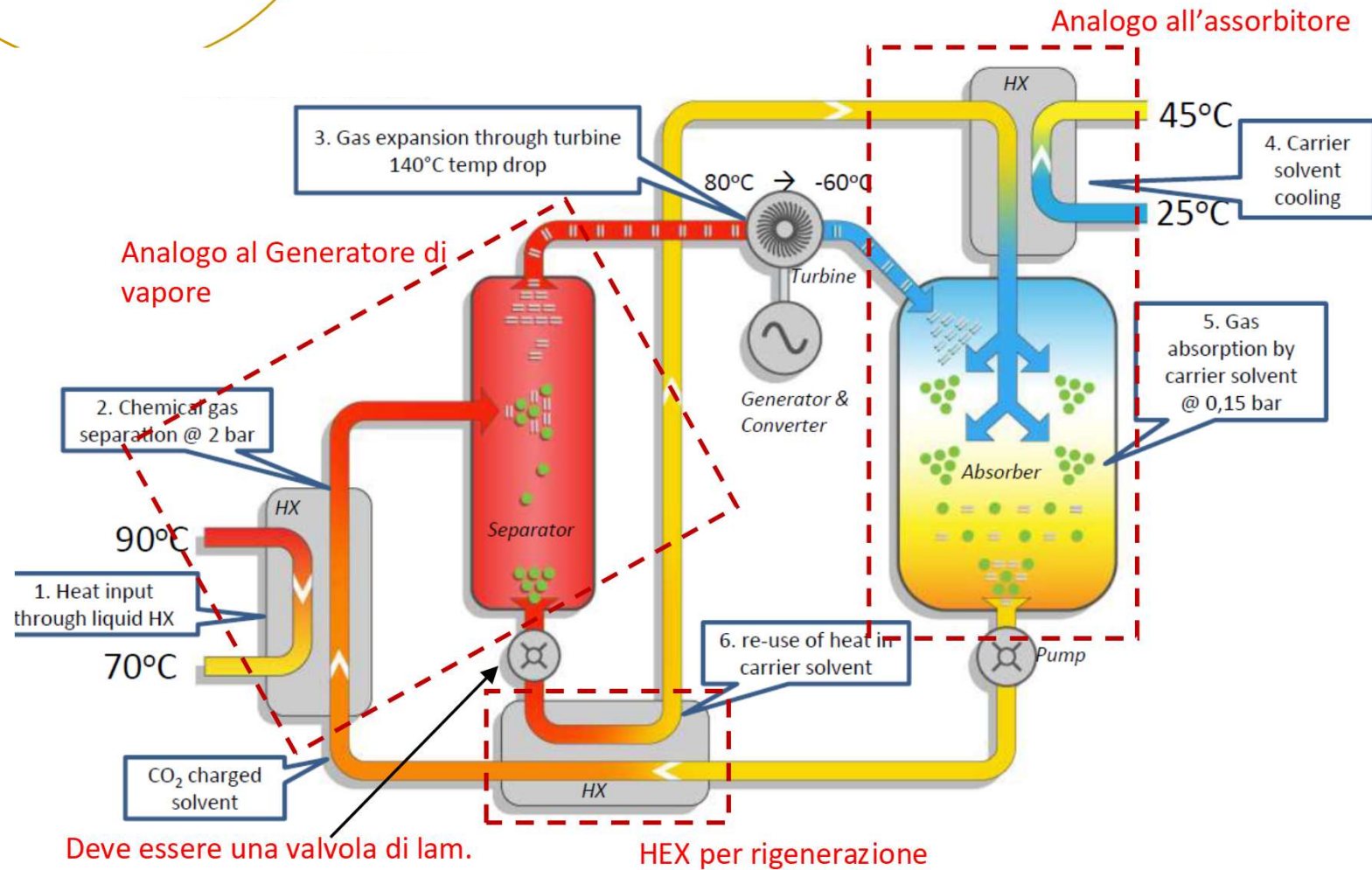


# ABSORPTION POWER CYCLE

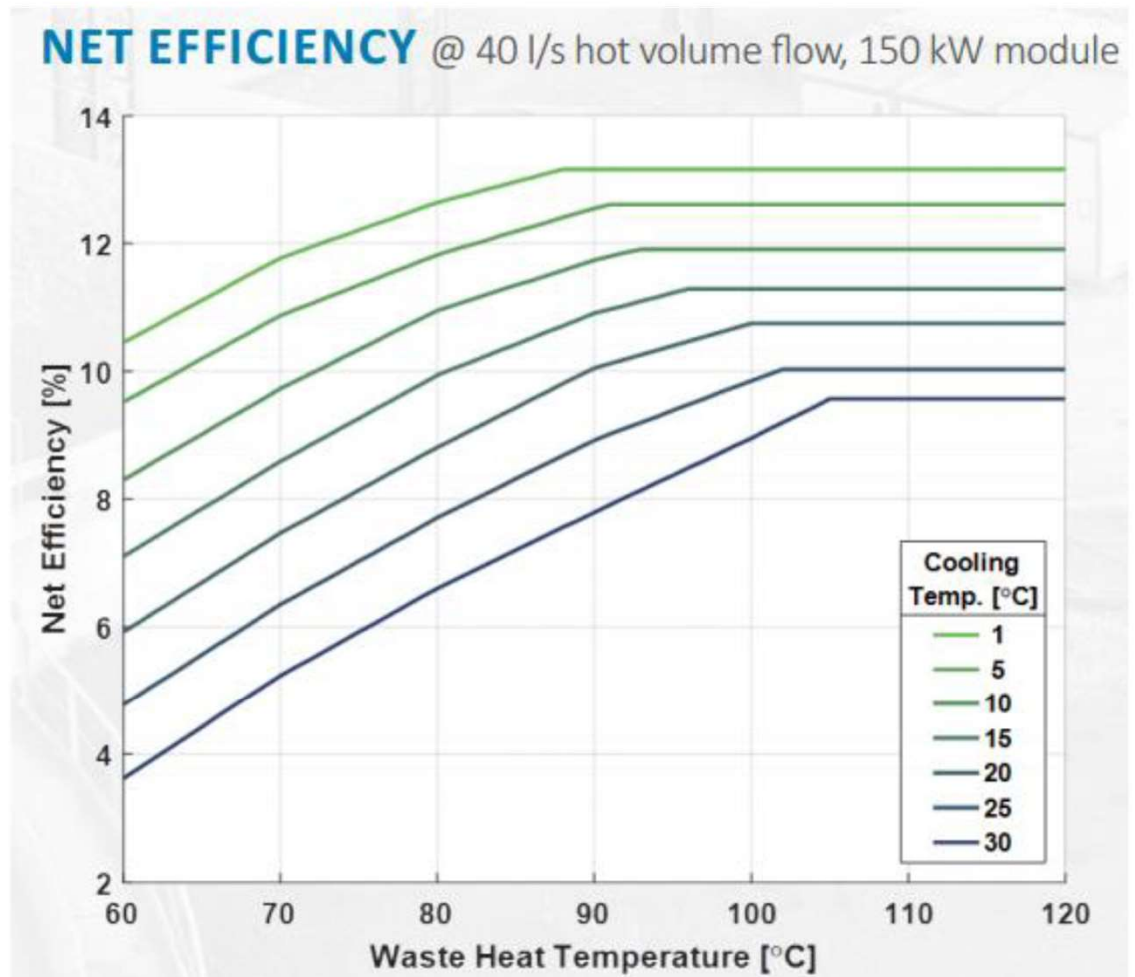
Il Ciclo Climeon è analogo ad una termocompressione, quale avviene nelle macchine frigo ad assorbimento, seguita da una espansione che sostituisce condensatore ed evaporatore.



# ABSORPTION POWER CYCLE



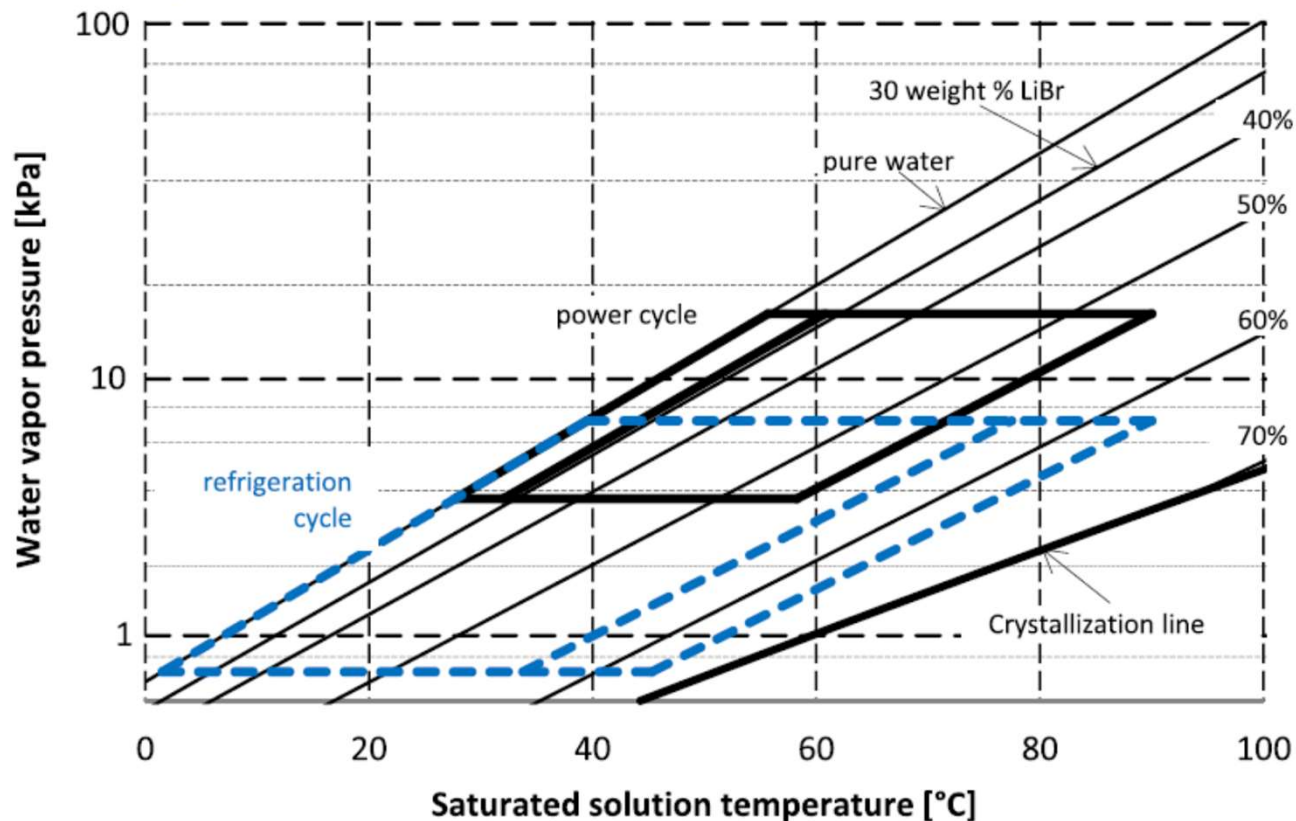
# ABSORPTION POWER CYCLE



Efficienza elettrica netta di un gruppo CLIMEON



# ABSORPTION POWER CYCLE



Dühring diagram for a LiBr aqueous solution, highlighting a typical absorption refrigeration cycle and the power cycle presented in Novotny and Kolovratnik - *Int. J. Energy Res.* 2017; 41:952–975, both with a highest solution temperature of 90°C.

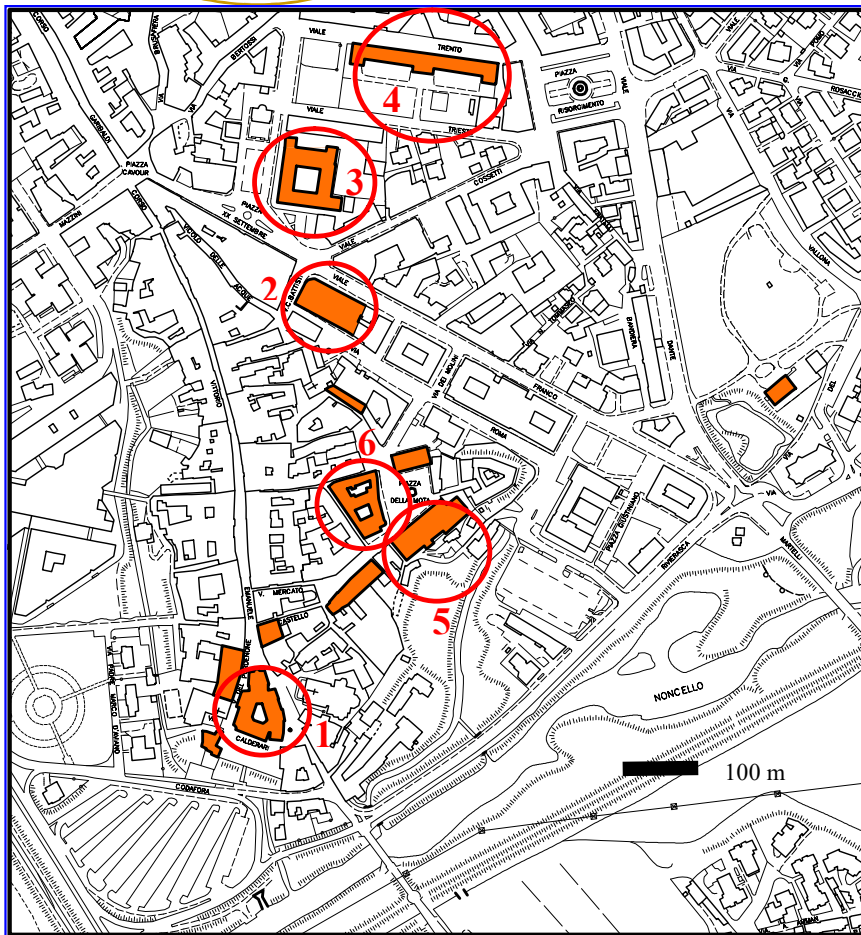
# ABSORPTION POWER CYCLE

Cycle, fluid	$\eta_u$ [%]	$\eta_{c, \text{gross}}$ [%]	$\eta_{u, \text{gross}}$ [%]	$\eta_{ex, \text{gross}}$ [%]	$\eta_{ex}$ [%]	Note	$p_{\text{high}}$	$p_{\text{low}}$	$x_e$
							[bar]	[bar]	[%]
APC NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	1.4	5.5	1.7	13.8	11.3	$c_{\text{NH}_3} = 89\%$	20.70	10.67	98
APC H <sub>2</sub> O-LiBr	1.6	6.1	2.0	15.8	13.2	$c_{\text{H}_2\text{O}} = 41\%$	0.06	0.01	98
APC amyl-acetate-CO <sub>2</sub>	1.0	3.6	1.8	14.6	7.8	$c_{\text{AA}} = 11\%$	92.50	60.00	97
APC imidazolium-R134a	0.9	8.7	1.5	11.8	7.3	$c_{\text{R134a}} = 77\%$	0.60	0.10	99
APC imidazolium-H <sub>2</sub> O	1.0	6.8	1.4	11.7	8.1	$c_{\text{H}_2\text{O}} = 8\%$	0.90	0.33	94
APC MeOH-HepOH	1.5	6.5	2.0	15.8	12.2	$c_{\text{MeOH}} = 60\%$	0.63	0.18	95
ORC pentane-cyclohexane	1.6	7.1	2.0	16.5	12.9	$c_{\text{n-Pentane}} = 60\%$	1.40	0.43	100
RC H <sub>2</sub> O	1.0	6.4	1.5	12.4	8.4		0.20	0.05	95
ORC isobutane	1.1	5.9	1.6	13.0	8.6		8.97	4.46	100
ORC MM	1.0	5.5	1.5	12.1	8.0		0.28	0.09	100
ORC R245fa	1.1	6.0	1.6	13.1	8.7		4.79	2.00	100
R-ORC isobutane	–	–	–	–	–	Optimum at $Q_{\text{rec}} = 0$			
R-ORC MM	1.0	5.9	1.5	12.2	8.2				
R-ORC R245fa	–	–	–	–	–	Optimum at $Q_{\text{rec}} = 0$			
SC-ORC R143a	0.8	6.2	1.1	8.7	6.2				
SC-ORC R41	1.2	4.6	2.0	16.0	9.6				

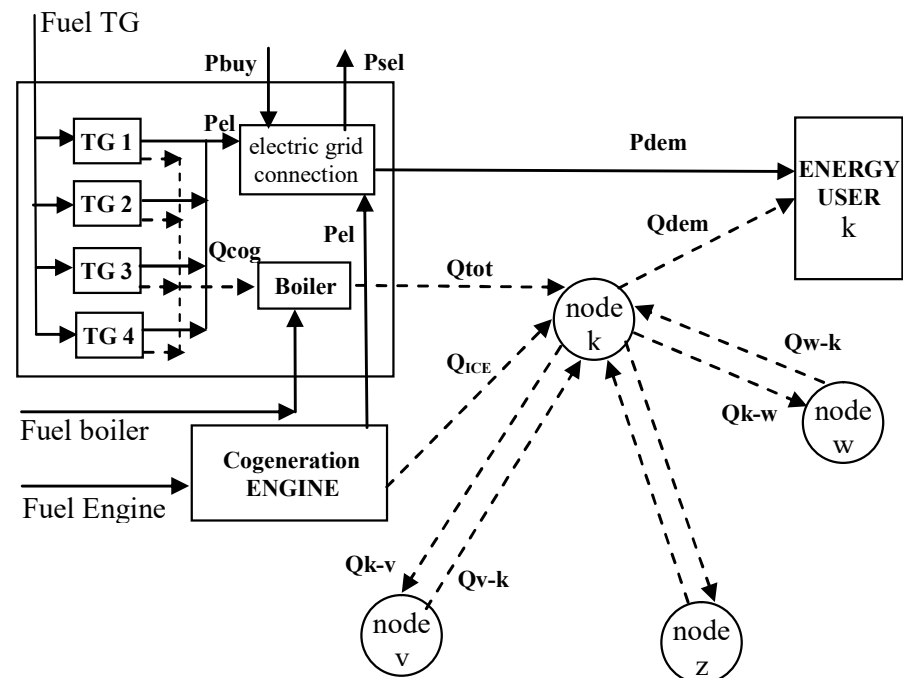
Results of thermodynamic analysis for 100 °C heat source. Novotny, Vitvarova, and Kolovratnik - Absorption Power Cycles with Various Working Fluids for Exergy-Efficient Low-Temperature Waste Heat Recovery.

u = energy utilization; gross = without considering auxiliary power for heat dissipation; c = cycle only; ex = exergy

# Sintesi di sistemi di cogenerazione distribuita e teleriscaldamento



Ipotesi di cogenerazione distribuita con  $\mu$ TG, integrata con micro-reti di teleriscaldamento, per il centro storico di Pordenone



# Sintesi di sistemi di cogenerazione distribuita e teleriscaldamento

## ALTERNATIVE:

Se si sceglie il sistema di cogenerazione centralizzato, in genere basato su un motore a combustione interna (ICE) :

- il calore cogenerato deve essere distribuito agli utenti e deve essere realizzato un sistema di teleriscaldamento all'interno di una zona ad alta densità di edifici storici.
- Il costo di investimento dell'intero sistema aumenta,

Se si sceglie il sistema di cogenerazione distribuita con  $\mu$ TG:

- Queste hanno un costo più elevato per kWe installato,
- Hanno anche un'efficienza elettrica più bassa dell' ICE.

# Sintesi di sistemi di cogenerazione distribuita e teleriscaldamento

## OBIETTIVI:

- scegliere se il motore centralizzato deve essere adottato o meno,
- definire il numero di micro-turbine (di taglia fissata) all'interno di ogni edificio,
- definire i "minimi" collegamenti corretti tra gli edifici, al fine di ottimizzare il consumo di energia a basso carico termico,
- definire la strategia ottimale di funzionamento del sistema,
- valutare la riduzione globale delle emissioni, in particolare di CO<sub>2</sub>.

# Sintesi di sistemi di cogenerazione distribuita e teleriscaldamento

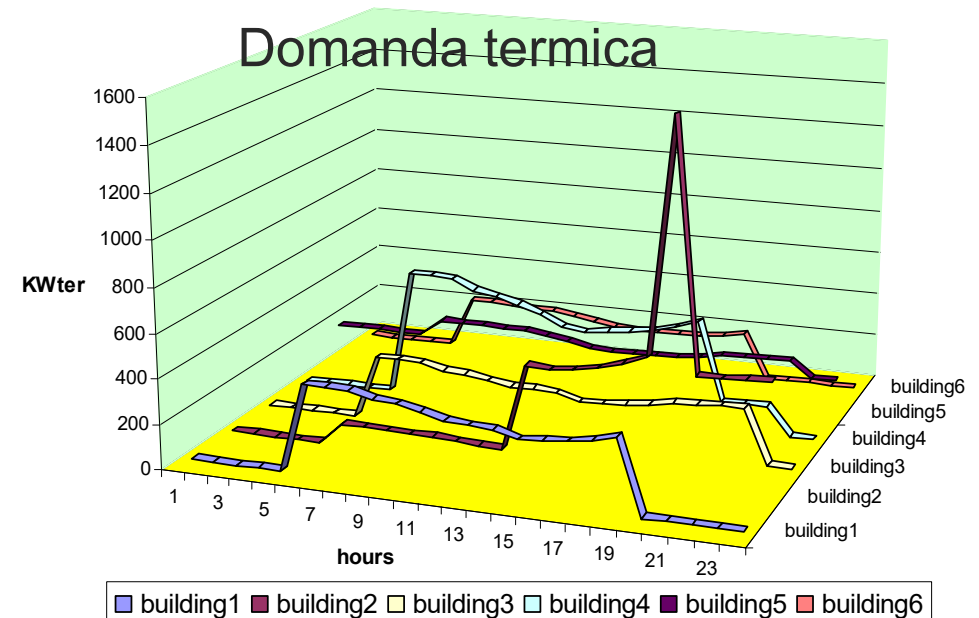
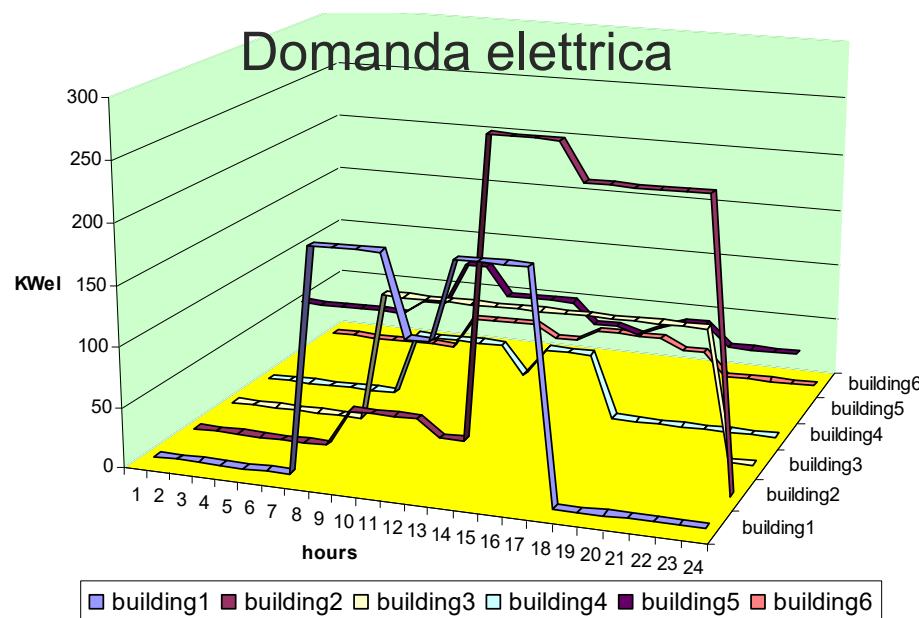
## RISOLUZIONE DEL PROBLEMA:

- definire un programma di Programmazione Lineare Intera Mista (MILP),
- risolverlo per mezzo di un software commerciale,
- OBJ: Totale costo annuo per acquisire, mantenere e gestire l'intero sistema,
- Tenendo conto dei vincoli economici: tasso di interesse, prezzo di gas ed elettricità, costo dei componenti e dell'integrazione impiantistica,.....
- tenendo conto dei vincoli fisici: richieste termiche ed elettriche delle utenze nel tempo, effetto della temperatura ambiente sull'efficienza delle turbine,.....

# Sintesi di sistemi di cogenerazione distribuita e teleriscaldamento

## DOMANDA ENERGETICA:

- L'intero anno è modellato con 3 "giornate tipo", per la domanda di energia, e 24 "giornate tipo" per il valore dell'energia elettrica ceduta alla rete.



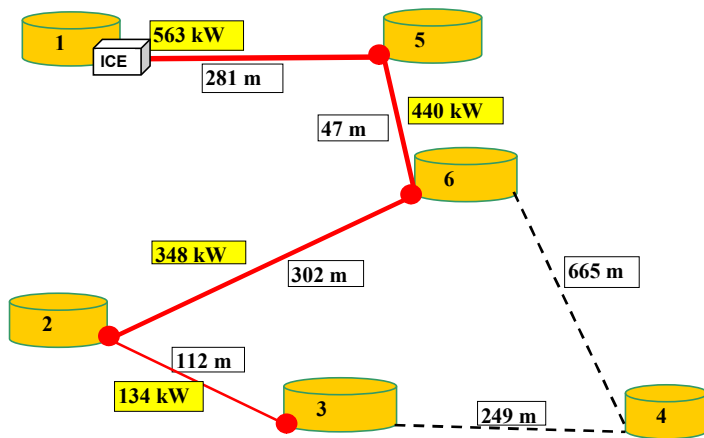
# Il modello MILP

- OBJ risulta lineare verso le variabili che esprimono il consumo dei sistemi CHP;
- Variabili binarie vengono impiegate per esprimere la presenza/assenza di  $\mu$ TG, ICE e tratti di rete,
- Oltre che allo stato acceso/spento delle macchine.
- In ciascun intervallo di tempo l'ottimizzazione deve tenere conto dei vincoli:
  - Le curve di prestazione dei componenti (variabili con la temperatura) devono essere rispettate;
  - La domanda termica deve essere soddisfatta dai cogeneratori e dalle caldaie ausiliarie;
  - La domanda elettrica deve essere soddisfatta dai cogeneratori e dall'integrazione con la rete;
  - I nodi termici devono essere bilanciati e tutti i rami presentano una perdita proporzionale alla loro lunghezza.

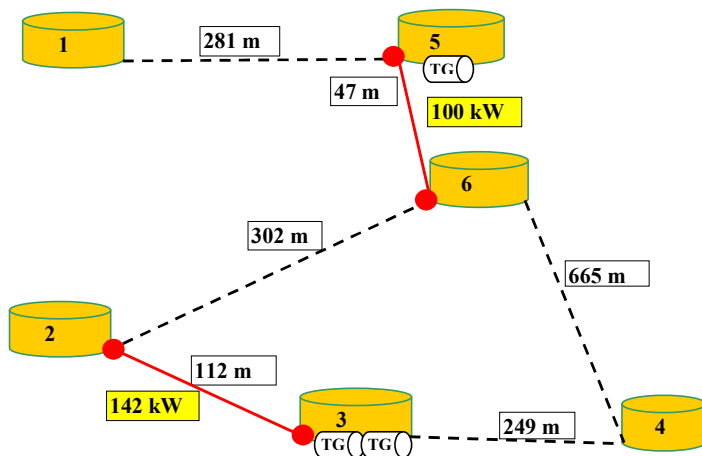


# Sintesi di sistemi di cogenerazione distribuita e teleriscaldamento

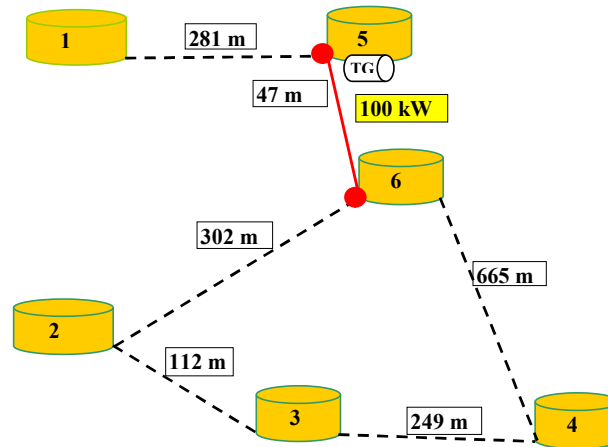
case a



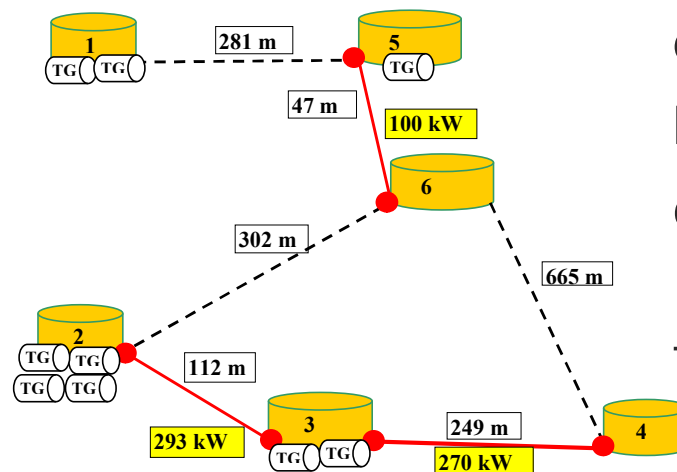
case c



case b



case d



Configurazioni ottimali al variare delle condizioni economiche al contorno:

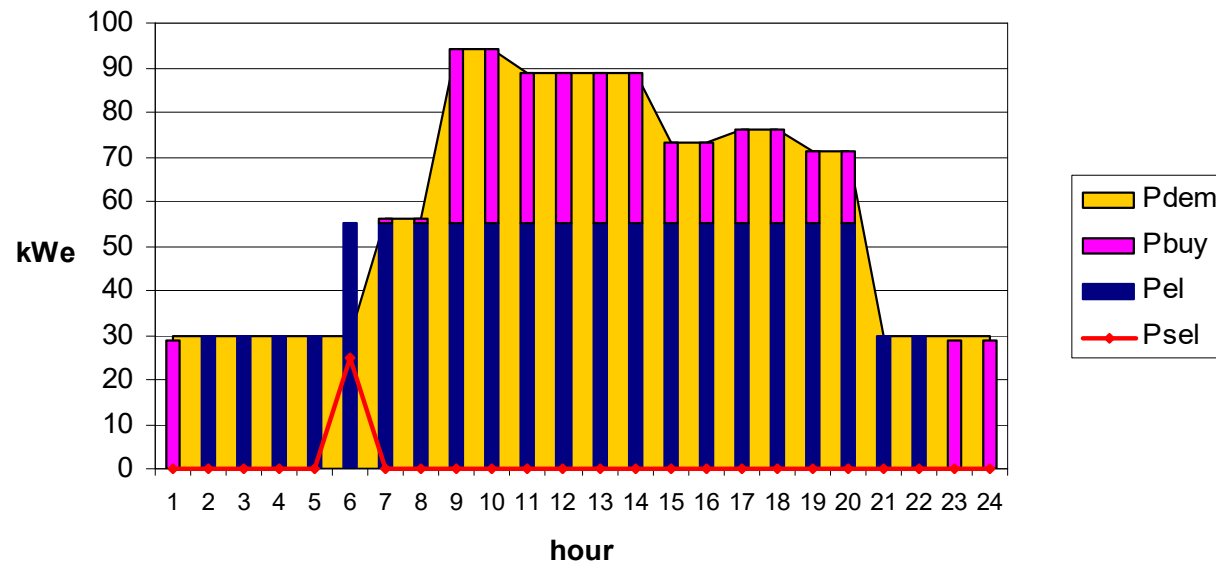
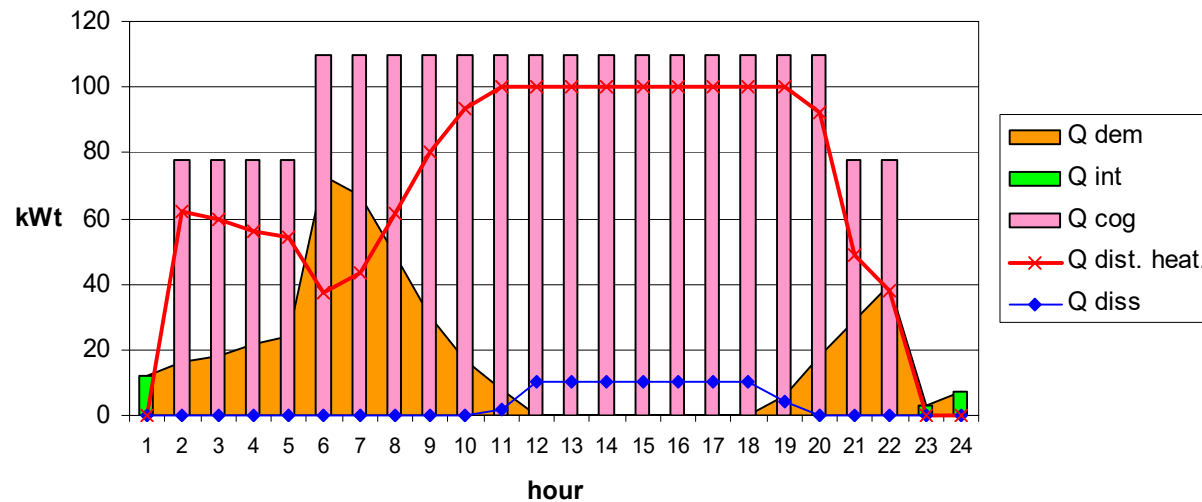
a+c) vita utile delle macchine e della rete stimate di 13/26 anni;

b) di 4,5/9 anni;

c) di 8/16 anni;

Risparmi variabili tra 1 – 8%.

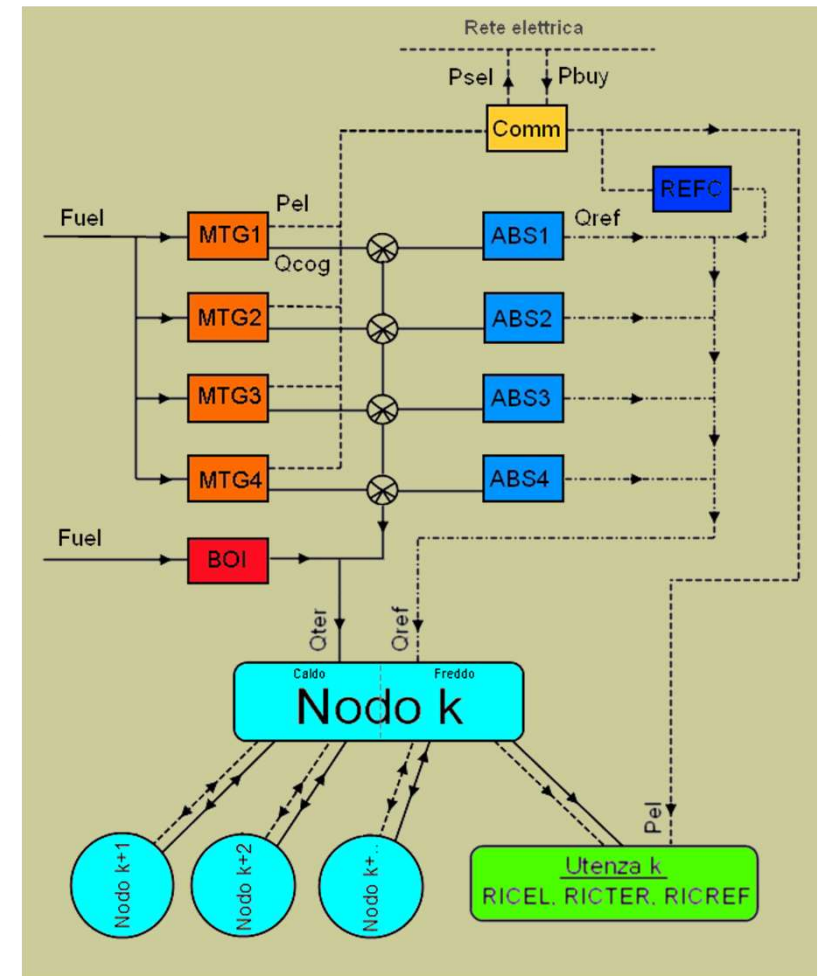
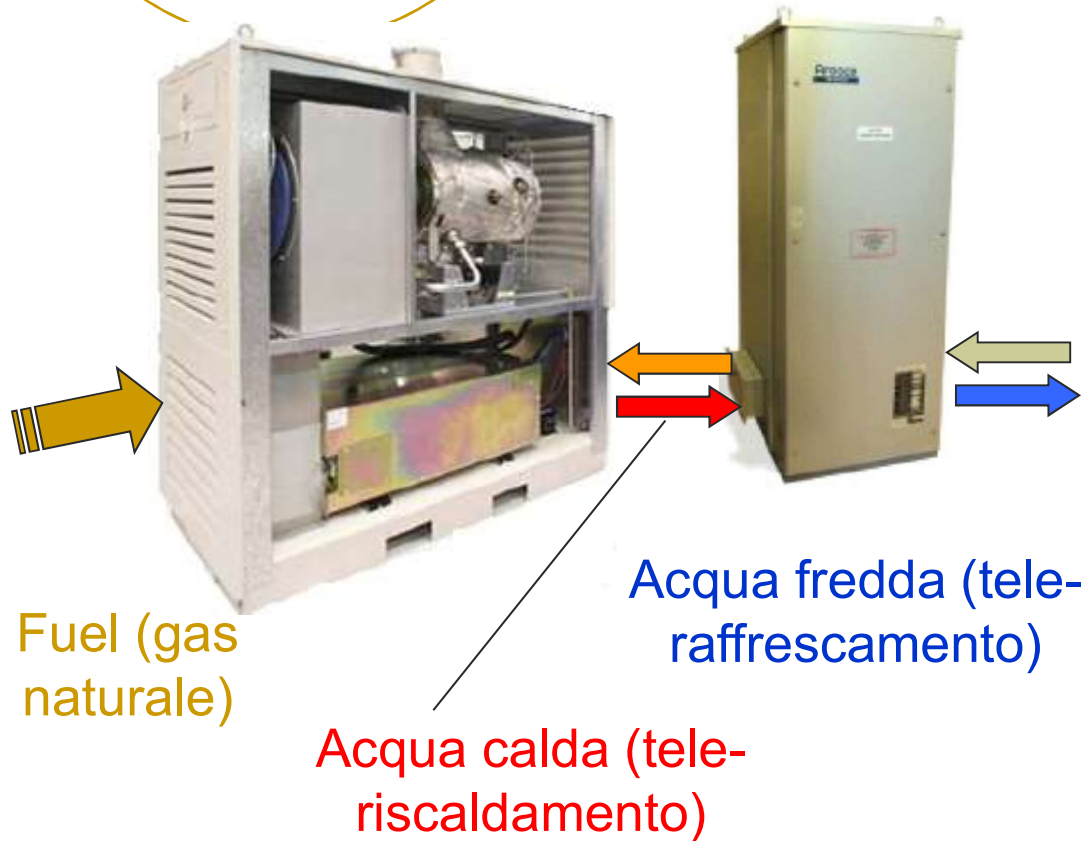
# Sintesi di sistemi di cogenerazione distribuita e teleriscaldamento



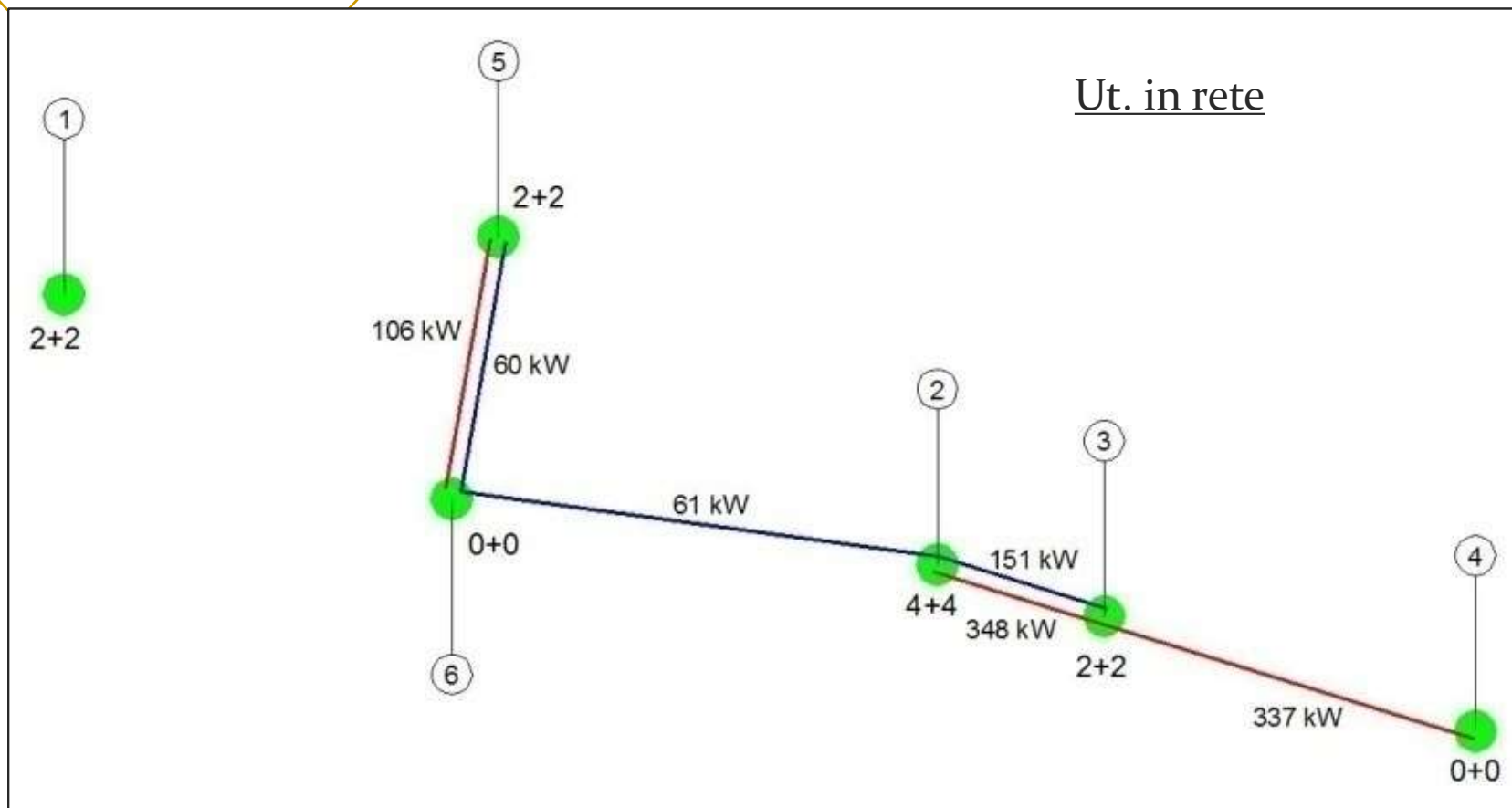
Esempio di gestione ottima per la sola  $\mu$ TG presente nella configurazione b:

L'inseguimento termico NON è la soluzione ottimale (nemmeno quello elettrico).

# Integrazione di CHP con macchine ad assorbimento e reti di tele-raffrescamento



# Integrazione di CHP con macchine ad assorbimento e reti di tele-raffrescamento



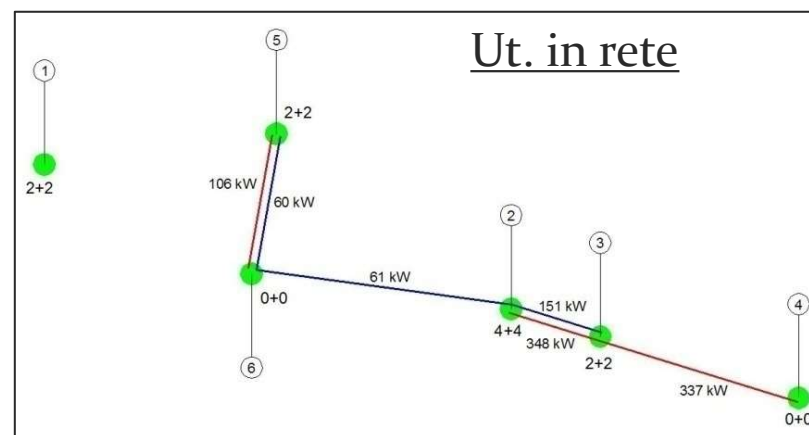
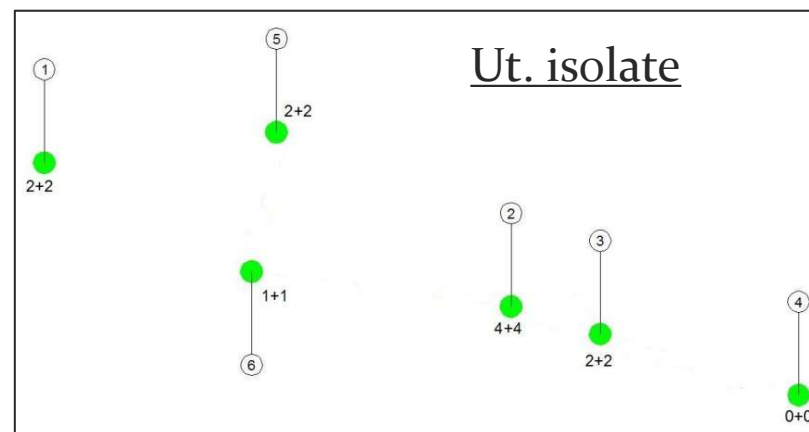
Anni di ammortamento capitale:  
10 per le macchine, 20 per la rete

# Integrazione di CHP con macchine ad assorbimento e reti di tele-raffrescamento

## TRIGENERAZIONE APPLICATA AD UTENZE ISOLATE E AD UTENZE COLLEGATE IN RETE

	Ut. Isolate	Ut. In rete
n° $\mu$ TG	11	10
n° mAS	11	10
Investimento [€]	1.368.750	1.482.505
Costo operativo [€/anno]	685.332	632.858
Costo annuo [€/anno]	862.591	812.041
Indice di risparmio	26,87%	31,15%
IRE	9,73%	12,70%
TEP risparmiate	93	132
Pay Back Period [mesi]	33	32

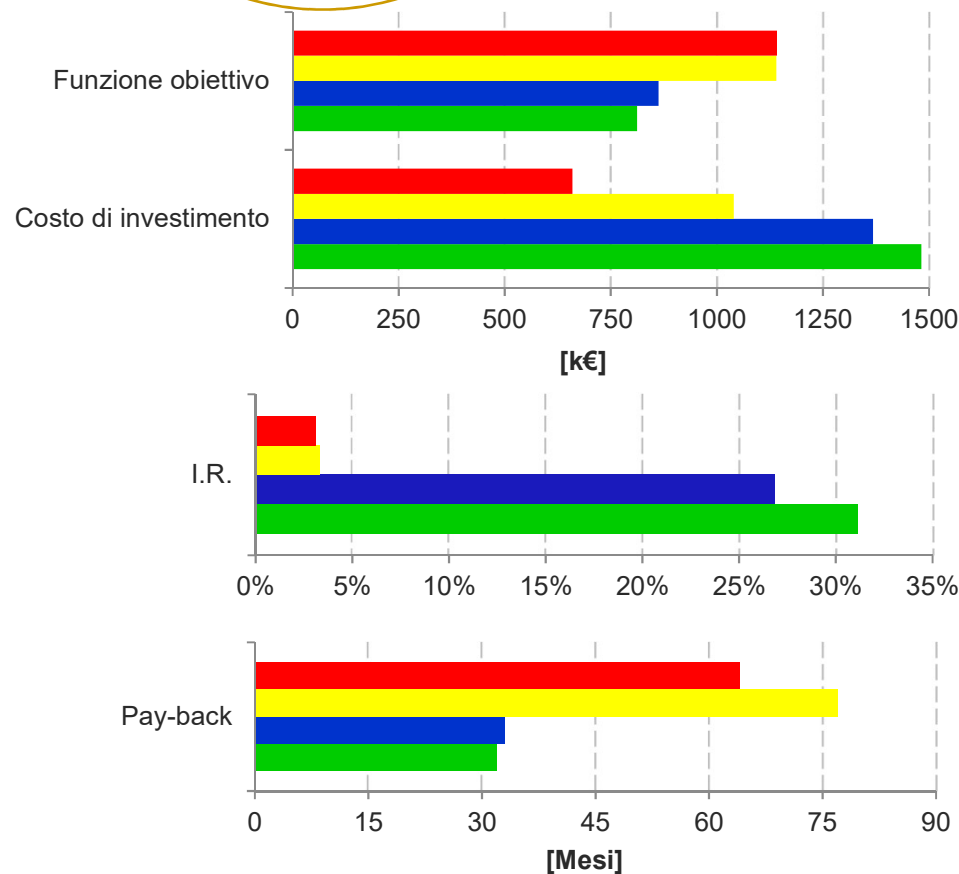
Anni di ammortamento capitale:  
10 per le macchine, 20 per la rete



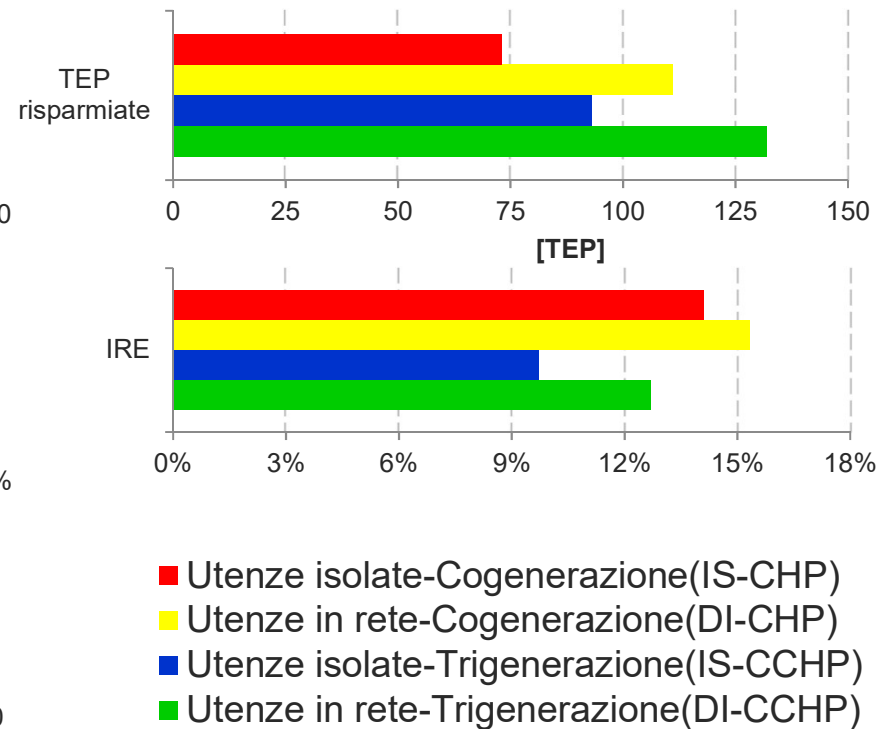
# Integrazione di CHP con macchine ad assorbimento e reti di tele-raffrescamento

## COGENERAZIONE VS TRIGENERAZIONE

### Parametri economici



### Parametri ambientali



- UtENZE isolate-Cogenerazione (IS-CHP)
- UtENZE in rete-Cogenerazione (DI-CHP)
- UtENZE isolate-Trigenerazione (IS-CCHP)
- UtENZE in rete-Trigenerazione (DI-CCHP)

# Cogenerazione e trigenerazione

***GRAZIE PER L'ATTENZIONE!***



prof. Mauro REINI

docente di sistemi per l'energia e l'ambiente

Università di Trieste – Polo di Pordenone