

**TOR VERGATA**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

*Corso di Laurea in Ingegneria Energetica*

**Analisi exergoeconomica di un impianto di refrigerazione  
in cascata ad assorbimento e compressione di vapore.  
Caso studio: potenze frigorifere di un supermercato.**

Relatore:  
**Ing. Ivano Petracchi**

Candidato:  
**Francesco Micaloni**

# Obiettivi della tesi

- Analisi e ottimizzazione di un impianto frigorifero in cascata non convenzionale rispetto a:

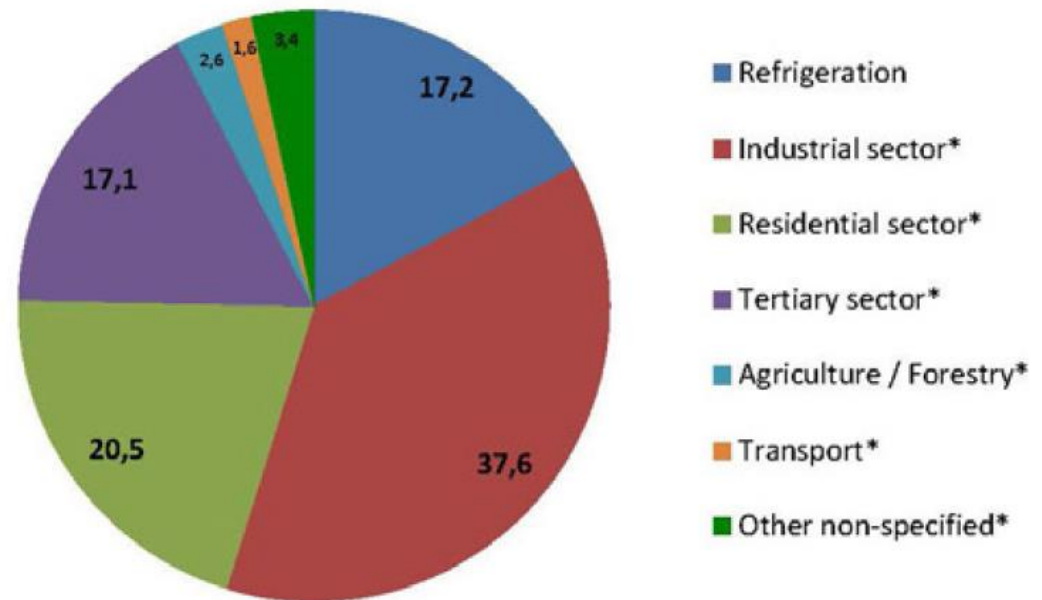
1. Coefficiente di prestazione
2. Exergia distrutta nel sistema
3. Costi totali dell'impianto
4. Costi ambientali



- Dimensionamento degli scambiatori di calore che influenzano i costi, l'exergia distrutta e il COP dell'impianto.
  - Confronto con un impianto convenzionale
-

# Consumo elettrico nella refrigerazione

- Richiesta di impianti frigoriferi sempre più all'avanguardia, in termini di energia elettrica spesa e di rispetto delle norme ambientali.



Comparazione del consumo di energia elettrica globale nel settore della refrigerazione rispetto agli altri settori

FONTE: NoteTech\_29 World Statistics

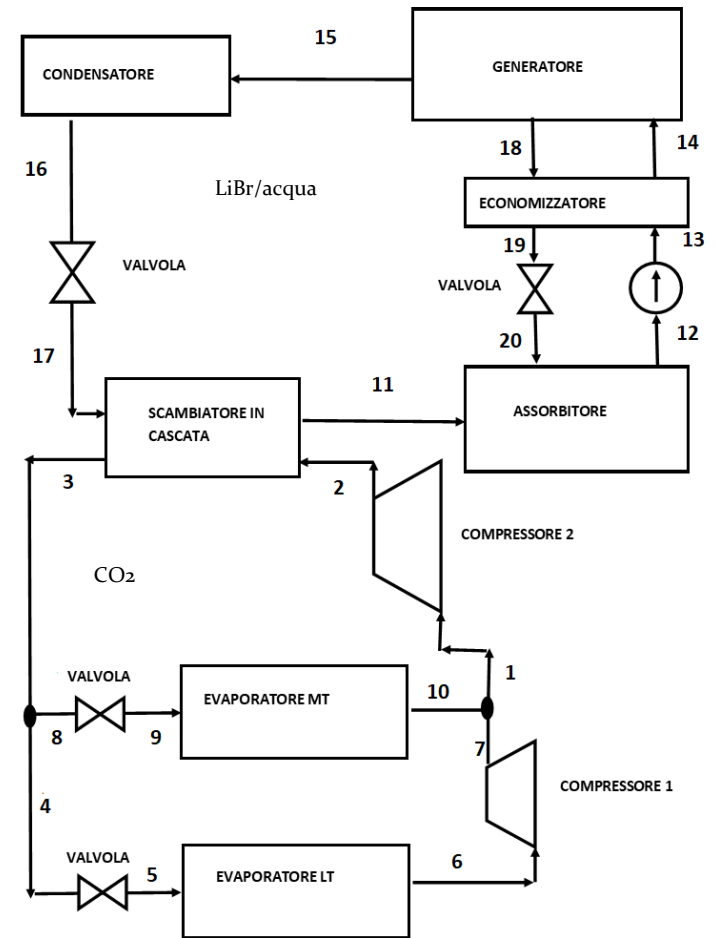
# Schema dell'impianto

## Parametri di esercizio fissi

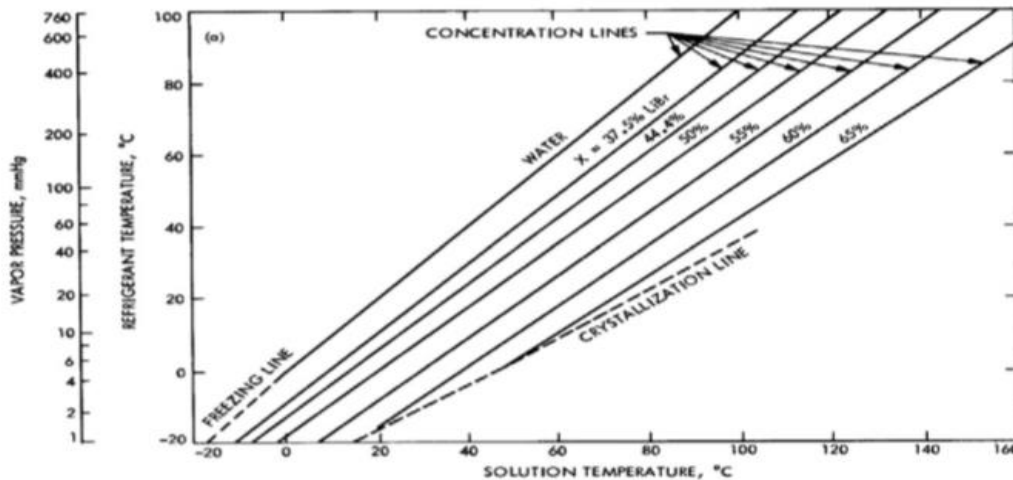
$T_{\text{ambiente}}$	20 °C
$T_{\text{congelatore}}$	-25 °C
$T_{\text{frigorifero}}$	2 °C
$Q_{\text{LT}}$	30 kW
$Q_{\text{HT}}$	100 kW

## Parametri di esercizio variabili

$\Delta T_{\text{evap.LT}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{cascata}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{evap.MT}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{cond.HT}}$	5 °C (valore base)
$T_{\text{generatore}}$	83 °C (valore base)



# Parametri di funzionamento della sezione ad assorbimento



Soluzione di bromuro di litio e acqua

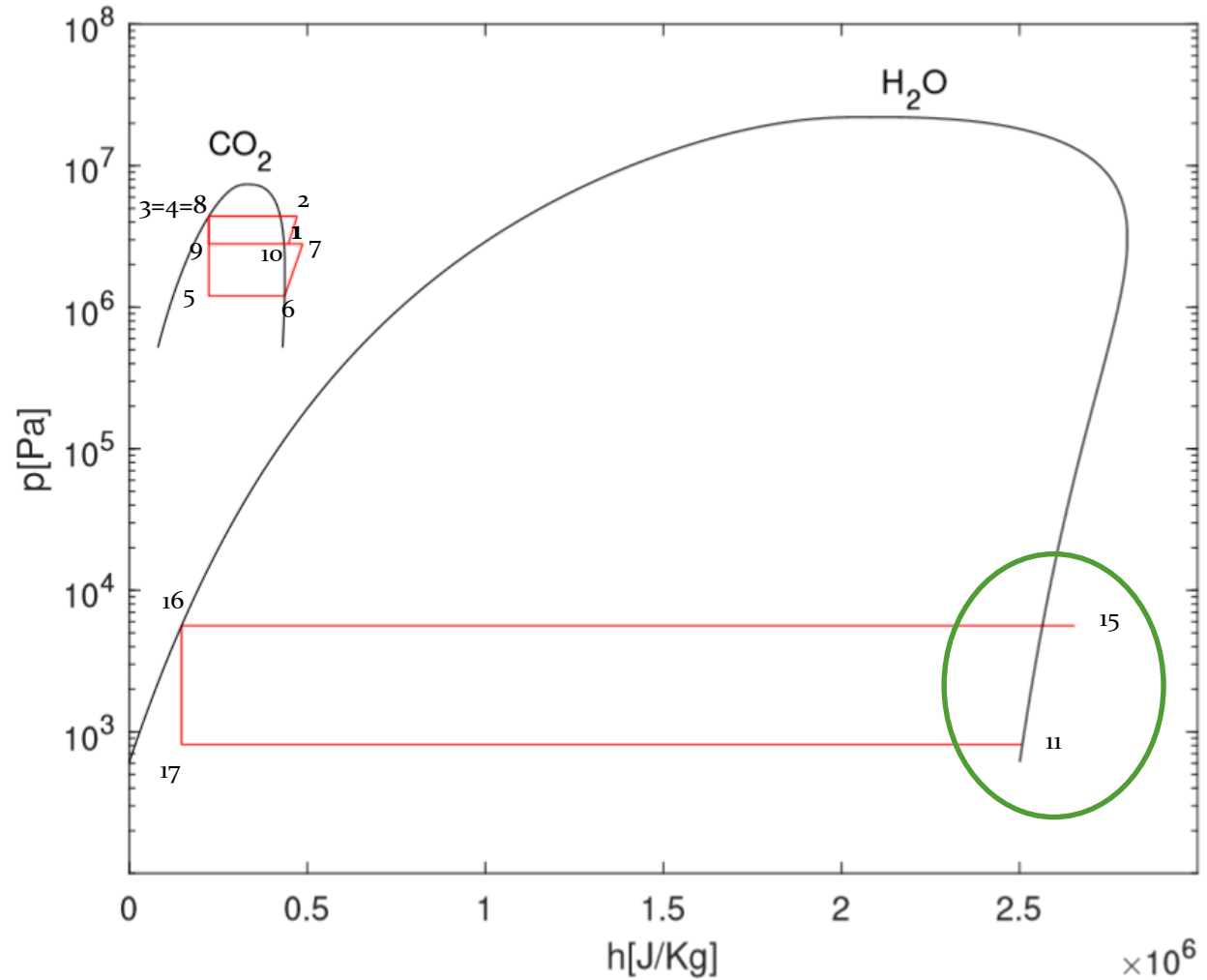
$$T_{minima,ass} > 0^{\circ}C$$

Diagramma dell'equilibrio fase liquida:

- $50\% \leq X_{12}, X_{20} \leq 65\%$  ;
- $X_{12} < X_{20}$ ;
- $32^{\circ}C \leq T_{ass} \leq 40^{\circ}C$  ;
- $76^{\circ}C \leq T_{gen} \leq 89^{\circ}C$

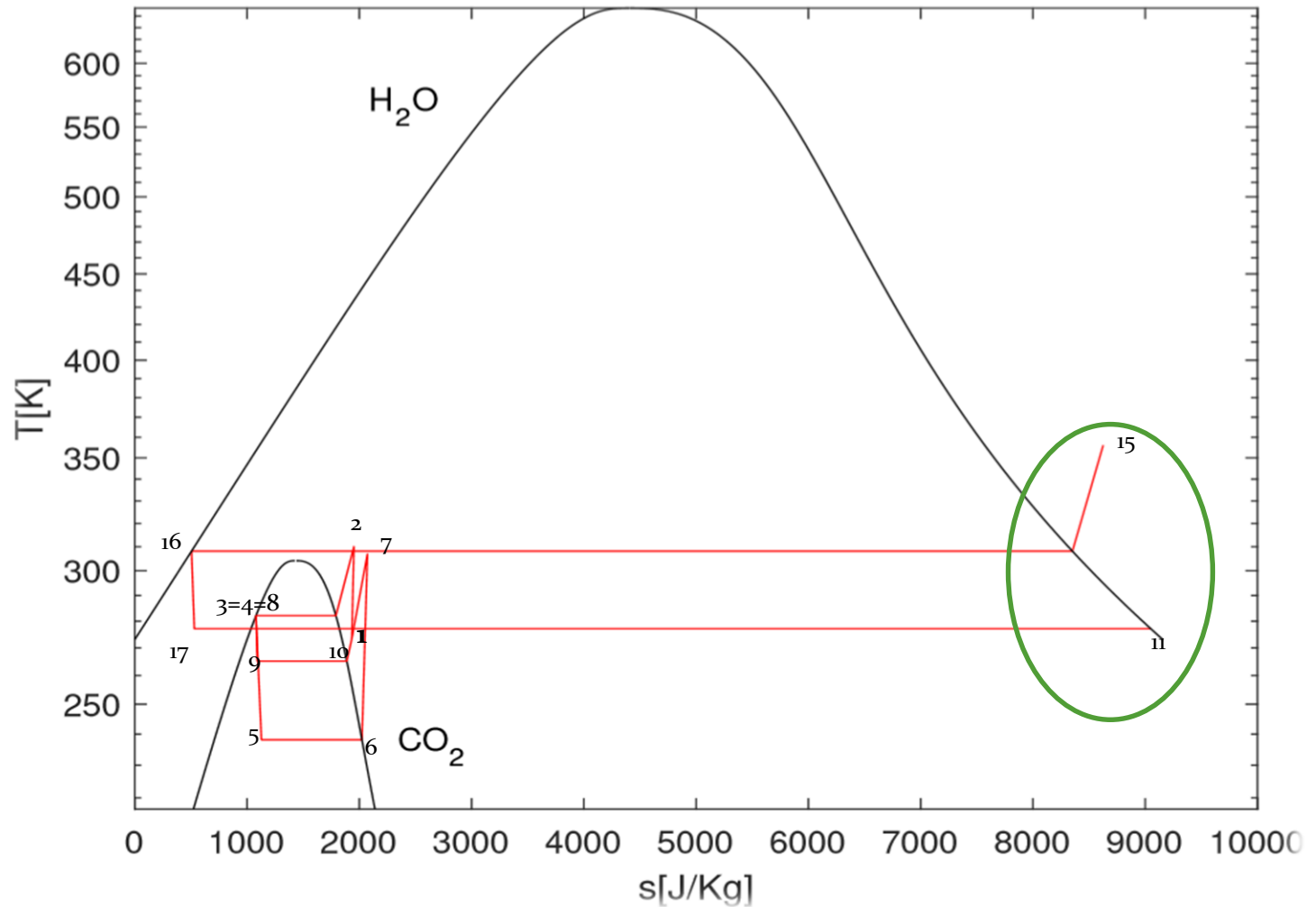
# Diagrammi Termodinamici

- $p-h$



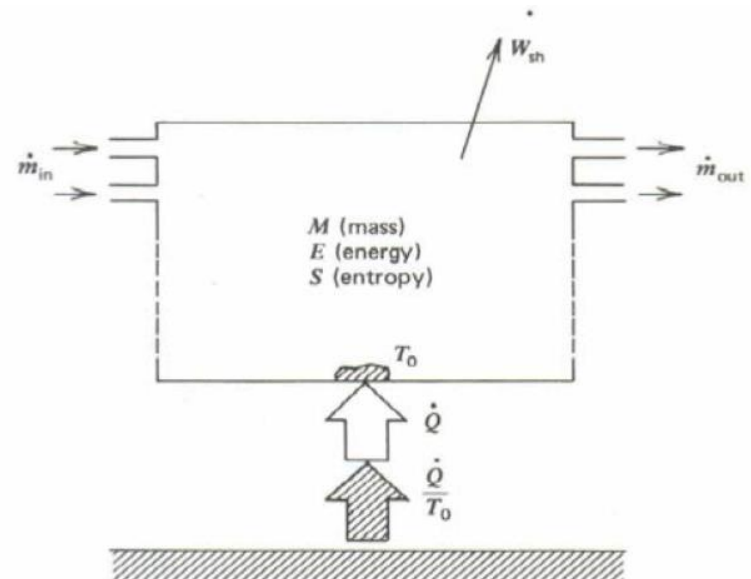
# Diagrammi Termodinamici

- $T-s$



# Qualità dell'energia: Exergia

- È definita come la massima energia di prima specie (meccanica, potenziale, cinetica ecc.) ottenibile da un sistema quando lo si porta dal suo stato iniziale a quello finale di equilibrio con l'ambiente, interagendo solo con l'ambiente stesso.
- Definisce la qualità dell'energia stessa e diminuisce nei processi irreversibili

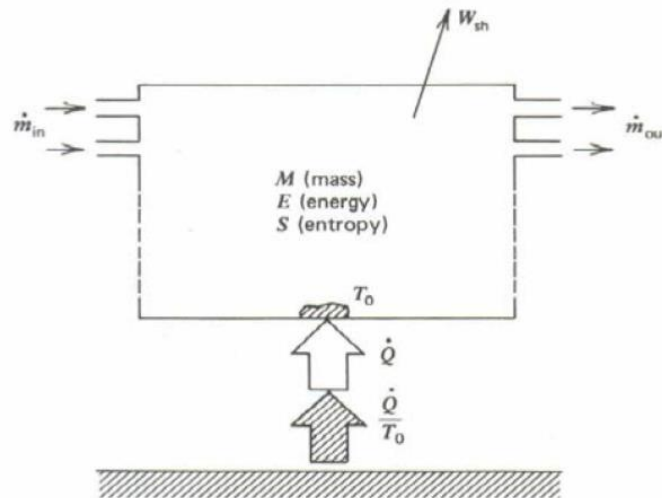




# Exergia Distrutta

- Il teorema di Gouy-Stodola, determina la legge per cui si ha perdita della capacità di eseguire un lavoro a causa dell'aumento di irreversibilità.

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{CV} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_D$$



$$ex = (h-h_0) - T_0(s-s_0)$$

# Analisi Termodinamica

- Evaporatore LT:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{LT}(h_6 - h_5)$$

$$\dot{E}_{x_{D,evapLT}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{cong}}\right) \dot{Q}_{LT} + \dot{m}_{LT}(ex_5 - ex_6) + \dot{W}_{fanLT}$$

- Compressore 1 LTC:

$$\dot{W}_{compLTC} = \dot{m}_{LT} \frac{h_7 - h_6}{\eta_m \eta_e}$$

$$\dot{E}_{x_{D,compLTC}} = \dot{m}_{LT}(ex_6 - ex_7) + \dot{W}_{compLTC}$$

- Valvola di laminazione LT:

$$h_5 = h_4$$

$$\dot{E}_{x_{D,valvLT}} = \dot{m}_{CO_2}(ex_4 - ex_5)$$

- Scambiatore in cascata:

$$\dot{Q}_{cas} = \dot{m}_{CO_2}(h_2 - h_3) = \dot{m}_W(h_{11} - h_{17})$$

$$\dot{E}_{x_{D,casc}} = \dot{m}_{CO_2}(ex_2 - ex_3) + \dot{m}_W(ex_{17} - ex_{11})$$

- Evaporatore MT:

$$\dot{Q}_{MT} = \dot{m}_{MT}(h_{10} - h_9)$$

$$\dot{E}_{x_{D,evapMT}} = \dot{m}_{MT}(ex_9 - ex_{10}) + \left(1 - \frac{T_0}{T_{frigo}}\right) \dot{Q}_{MT} + \dot{W}_{fanMT}$$

- Valvola di laminazione HTC:

$$h_{17} = h_{16}$$

$$\dot{E}_{x_{D,valvHT}} = \dot{m}_W(ex_{16} - ex_{17})$$

- Valvola di laminazione MT:

$$h_9 = h_8$$

$$\dot{E}_{x_{D,valvMT}} = \dot{m}_{MT}(ex_8 - ex_9)$$

- Compressore 2 LTC:

$$\dot{W}_{compLTC} = \dot{m}_{CO_2} \frac{h_2 - h_1}{\eta_m \eta_e}$$

$$\dot{E}_{x_{D,compLTC}} = \dot{m}_{CO_2}(ex_1 - ex_2) + \dot{W}_{compHTC}$$

- Condensatore HT:

$$\dot{Q}_{HT} = \dot{m}_W(h_{15} - h_{16})$$

$$\dot{E}_{x_{D,condHT}} = \dot{m}_W(ex_{15} - ex_{16})$$

# Analisi Termodinamica

- Assorbitore:

$$\dot{Q}_{ass} = \dot{m}_W h_{11} - \dot{m}_s h_{20} - \dot{m}_{tot} h_{12}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xD,ass} \\ = \dot{m}_W (h_{12} - T_0 s_{12}) + \dot{m}_s (h_{20} - T_0 s_{20}) + \dot{m}_{tot} (h_{12} - T_0 s_{12}) \end{aligned}$$

- Generatore:

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{m}_W h_{15} + \dot{m}_s h_{18} - \dot{m}_{tot} h_{14}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xD,gen} \\ = \dot{m}_W (h_{15} - T_0 s_{15}) + \dot{m}_s (h_{18} - T_0 s_{18}) + \dot{m}_{tot} (h_{14} - T_0 s_{14}) \\ + \left(1 - \frac{T_0}{T_{wg}}\right) \dot{Q}_{gen} \end{aligned}$$

- Economizzatore:

$$\dot{Q}_{cas} = \dot{m}_{tot} (h_{14} - h_{13}) = \dot{m}_s (h_{18} - h_{19})$$

$$\dot{E}_{xD,casc} = \dot{m}_{tot} (ex_{13} - ex_{14}) + \dot{m}_s (ex_{18} - ex_{19})$$

- Pompa:

$$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_{tot} \frac{h_{13} - h_{12}}{\eta_p \eta_e}$$

$$\dot{E}_{xD,compLTC} = \dot{m}_{tot} (ex_{12} - ex_{13}) + \dot{W}_{pompa}$$

- Valvola di laminazione SHX:

$$h_{19} = h_{20}$$

$$\dot{E}_{xD,valvshx} = \dot{m}_s (ex_{19} - ex_{20})$$

# Termoeconomia

- Costo totale del prodotto:

$$C_{tot} = \sum c_{out} \dot{E}_{x_{out}} = \sum c_i \dot{E}_{x_{in}} + \sum_m Z_m + C_{amb}$$

$$\dot{C}_{P,tot} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} + \dot{C}_{amb}$$

$$\dot{Z} = \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM}$$

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k + \dot{C}_{k,amb}$$

---

# Termoeconomia

- Costo scambiatori di calore:

$$C_{hex} = C_{R,HX} \left( \frac{A_k}{A_R} \right)^{0.6}$$

- Costo compressori:

$$C_{compressori} = C_{R,COMP} \left( \frac{\dot{W}_k}{\dot{W}_R} \right) \left( \frac{0,9 - \eta_{is}}{\eta_{is}} \right)^{0,5}$$

- Costo macchine elettriche:

$$C_{EM} = C_{R,EM} \left( \frac{\dot{W}_k}{\dot{W}_R} \right)^{0.87} \left( \frac{1 - \eta_e}{\eta_e} \right)$$

- Costo ambientale:

$$m_{CO_2} = \mu H \dot{W}_{tot}$$

$$C_{amb} = \frac{m_{CO_2}}{1000} C_{CO_2,grid}$$

- Costo pompa:

$$C_p = C_{R,p} \left( \frac{\dot{W}_k}{\dot{W}_R} \right)^{0.26} \left( \frac{1 - \eta_p}{\eta_p} \right)^{0,5}$$

- Costo valvole:

$$C_{valvole} = C_R = 470\text{€}$$

$$\eta_{is} = 0.00476R_p^2 - 0.09238R_p + 0.89810$$

- CEPCI:

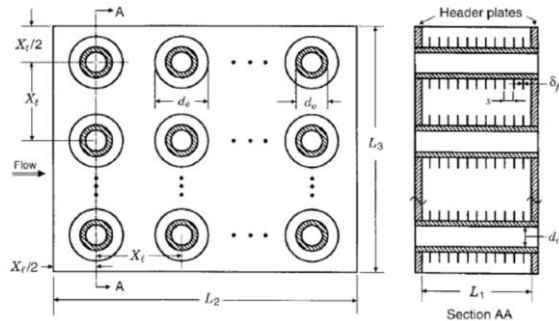
$$C_{R,2018} = C_{R,2012} \left( \frac{CEPCI_{2018}}{CEPCI_{2012}} \right)$$

# Termoeconomia

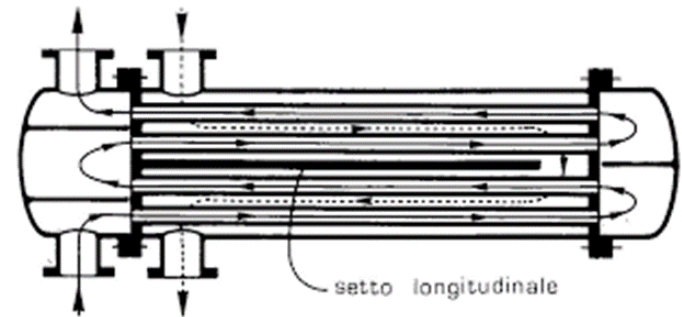
- $$C_{tot} = \sum c_{out} \dot{E}_{x_{out}} = \sum c_i \dot{E}_{x_{in}} + \sum_m Z_m = \frac{\dot{m}_{steam} H c_{steam}}{1000} + c_{el} H [\dot{W}_{comp1LTC} + \dot{W}_{comp2LTC} + \dot{W}_{fanLT} + \dot{W}_{fanMT}] + CRF [C_{comp1LTC} + C_{comp2LTC} + C_{evapLT} + C_{evapMT} + C_{casc} + C_{cond} + C_{gen} + C_{ass} + C_{eco} + C_{valvole} + C_{pompa} + C_{EM}] + C_{amb}$$
- $$COP = \frac{\dot{Q}_{LT} + \dot{Q}_{MT}}{\dot{W}_{comp1LTC} + \dot{W}_{comp2LTC} + \dot{W}_{fanLT} + \dot{W}_{fanMT} + \dot{W}_{pompa} + \dot{Q}_{gen}}$$
- $$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{x_{out}}}{\dot{E}_{x_{in}}} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{D,tot}}}{\dot{E}_{x_{in}}}$$
- $$\dot{E}_{x_{D,tot}} = \dot{E}_{x_{in}} - \dot{E}_{x_{out}}$$
- $$CRF = \frac{i_{eff}(1+i_{eff})^{n-1}}{(1+i_{eff})^n - 1}$$
- $n = 15 \text{ anni}$
- $i_{eff} = 0,08$

# Scambiatori di Calore

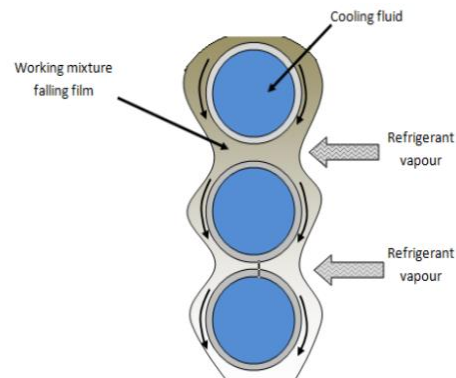
- Evaporatori LT ed MT



- Altri scambiatori



- Assorbitore



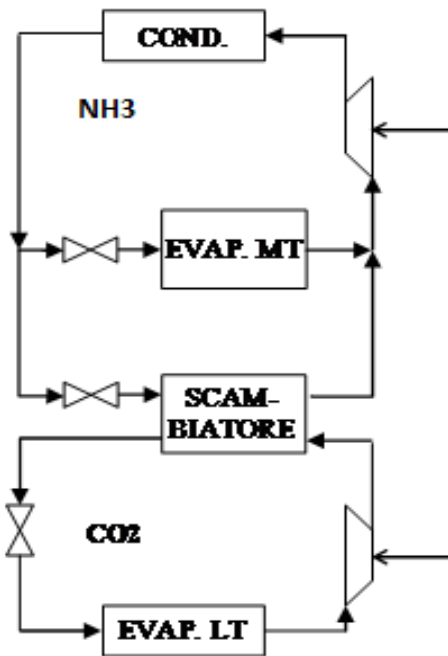
# Generatore

Varie tipologie:

- Solare termico:
    1. Ad acqua
    2. Ad olio diatermico
  - Combustione di biomasse
  - Gas
  - Cogenerazione
  - Vapore industriale
  - Sorgenti geotermiche
  - Fumi da cicli di processo
  - Teleriscaldamento
-

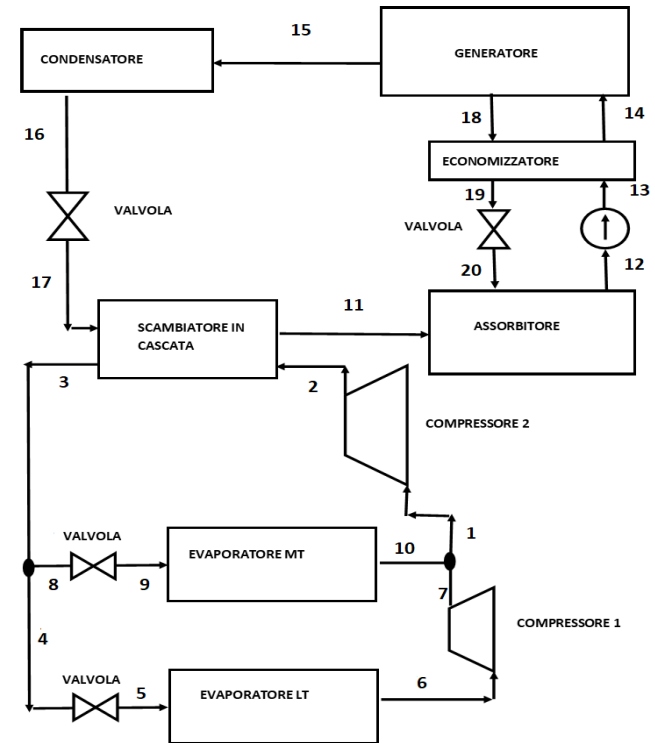


# Confronto tra impianto convenzionale e impianto non convenzionale



## Parametri di esercizio variabili

$\Delta T_{\text{evap.LT}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{cascata}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{evap.MT}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{cond.HT}}$	5 °C (valore base)
$T_{\text{generatore}}$	83 °C (valore base)
$\varepsilon$	0,6

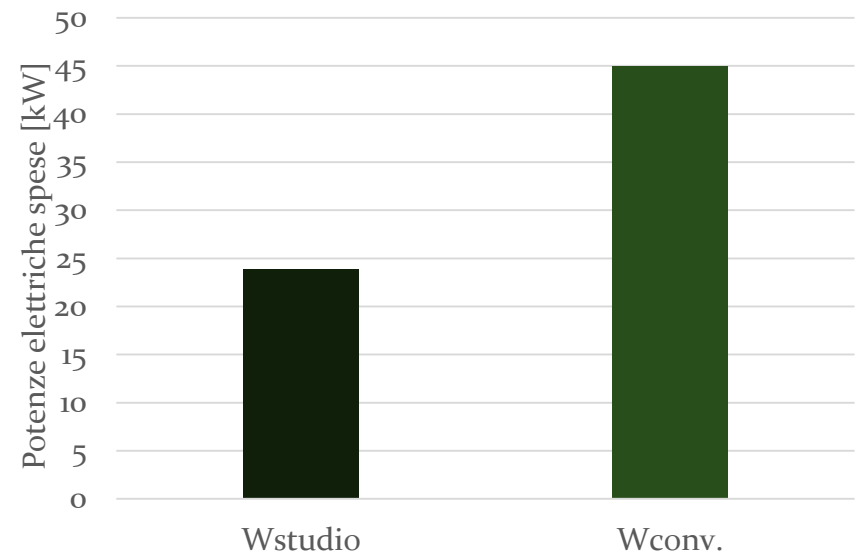
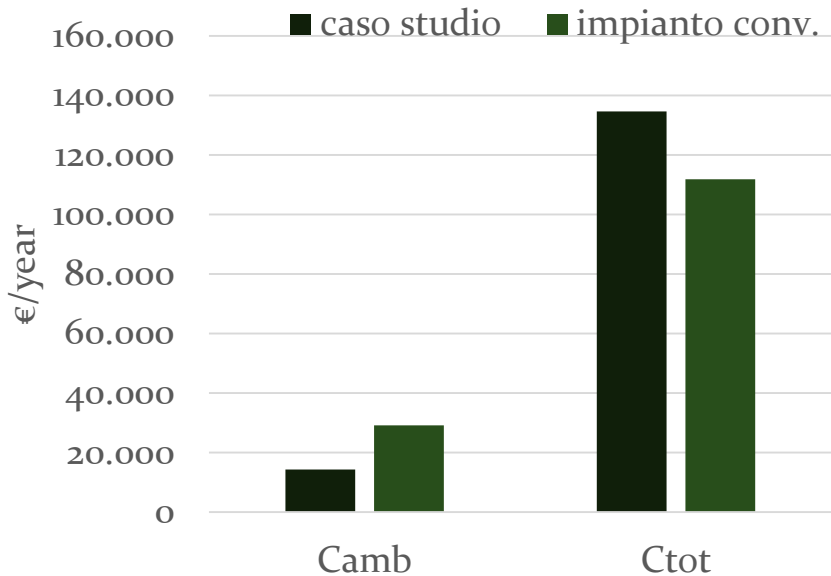


- Impianto convenzionale

- Impianto non convenzionale

# Confronto tra impianto convenzionale e impianto non convenzionale

- Confronto tra i costi e il lavoro speso nei due impianti:



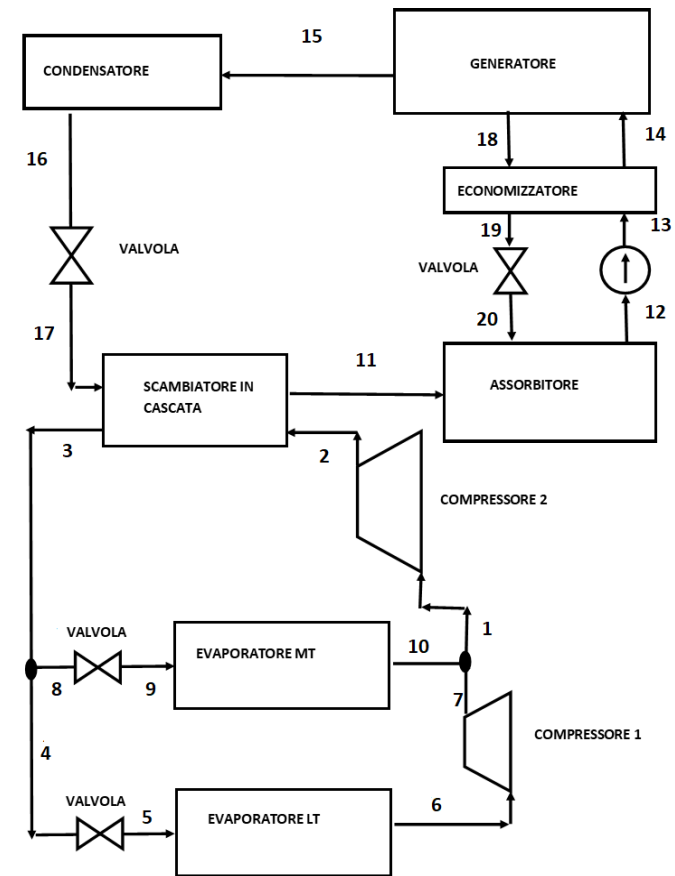
# Impianto ottimizzato

## Parametri di esercizio fissi

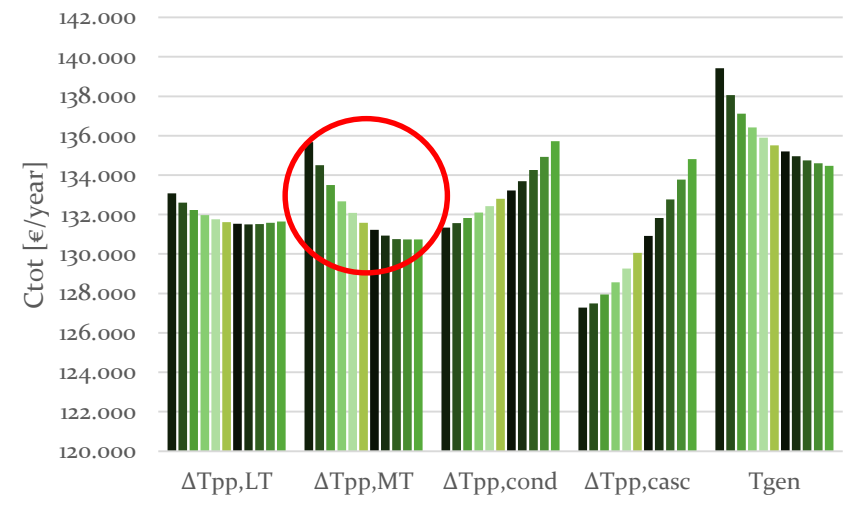
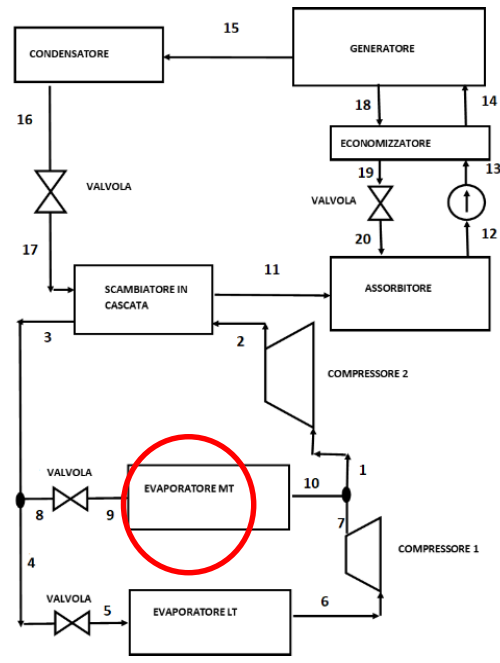
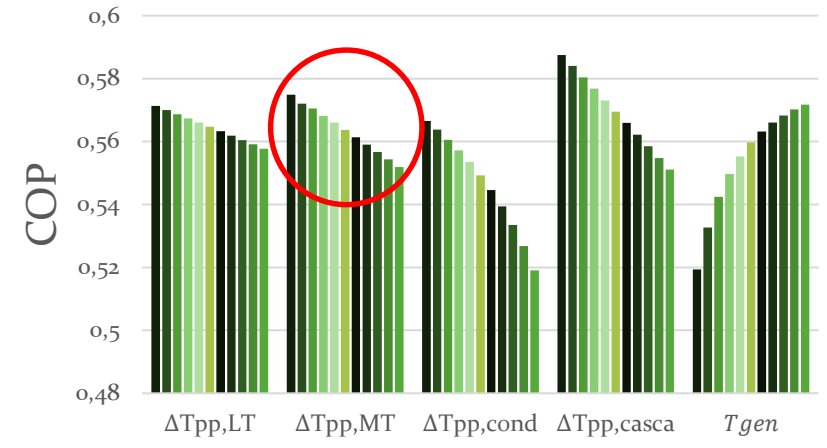
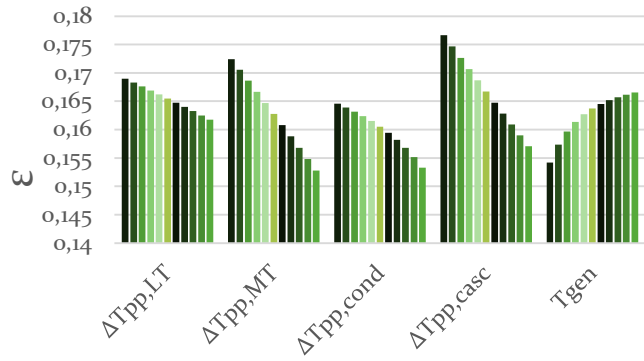
$T_{\text{ambiente}}$	20 °C
$T_{\text{congelatore}}$	-25 °C
$T_{\text{frigorifero}}$	2 °C
$Q_{\text{LT}}$	30 kW
$Q_{\text{HT}}$	100 kW

## Parametri di esercizio variabili

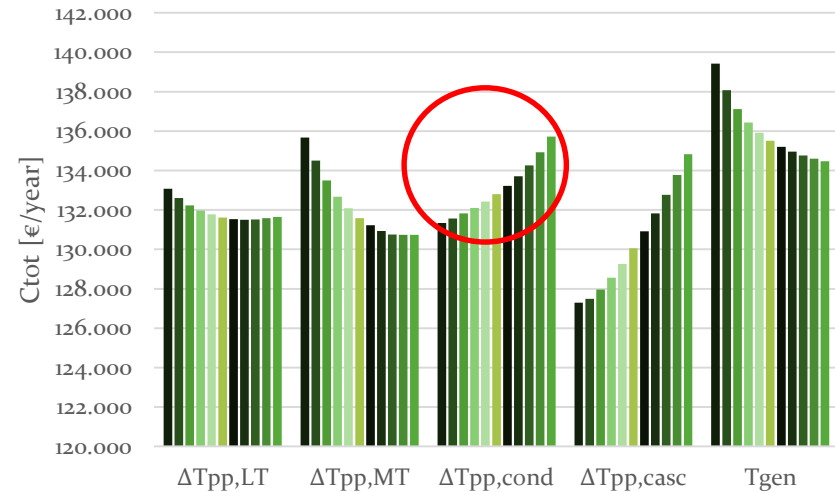
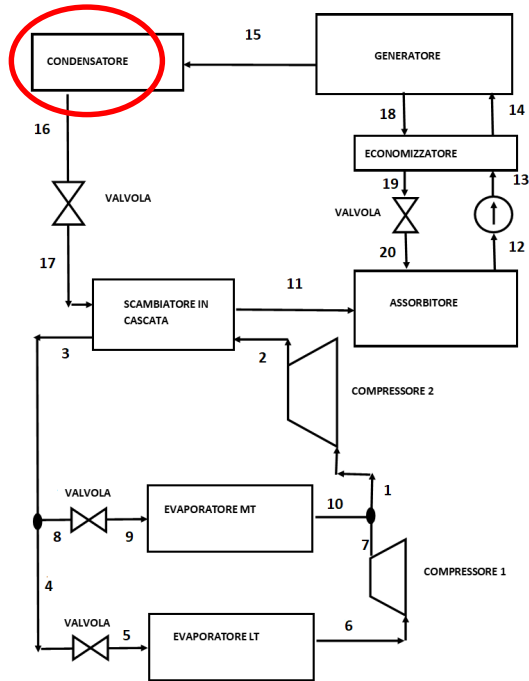
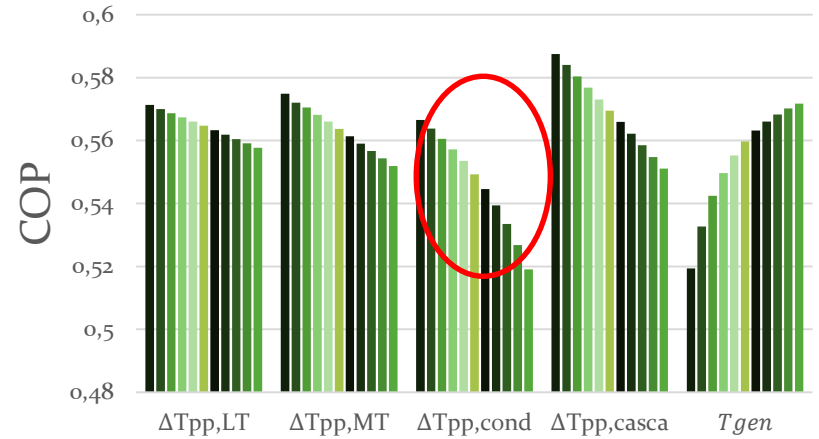
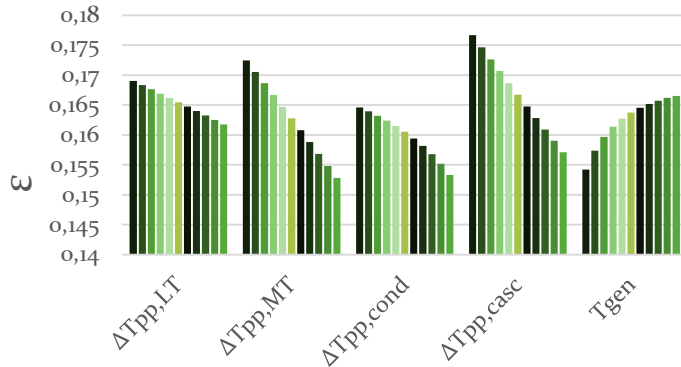
$\Delta T_{\text{evap.LT}}$	3-8 °C
$\Delta T_{\text{cascata}}$	2-8 °C
$\Delta T_{\text{evap.MT}}$	3-8 °C
$\Delta T_{\text{cond.HT}}$	5-10 °C
$T_{\text{generatore}}$	76-89 °C



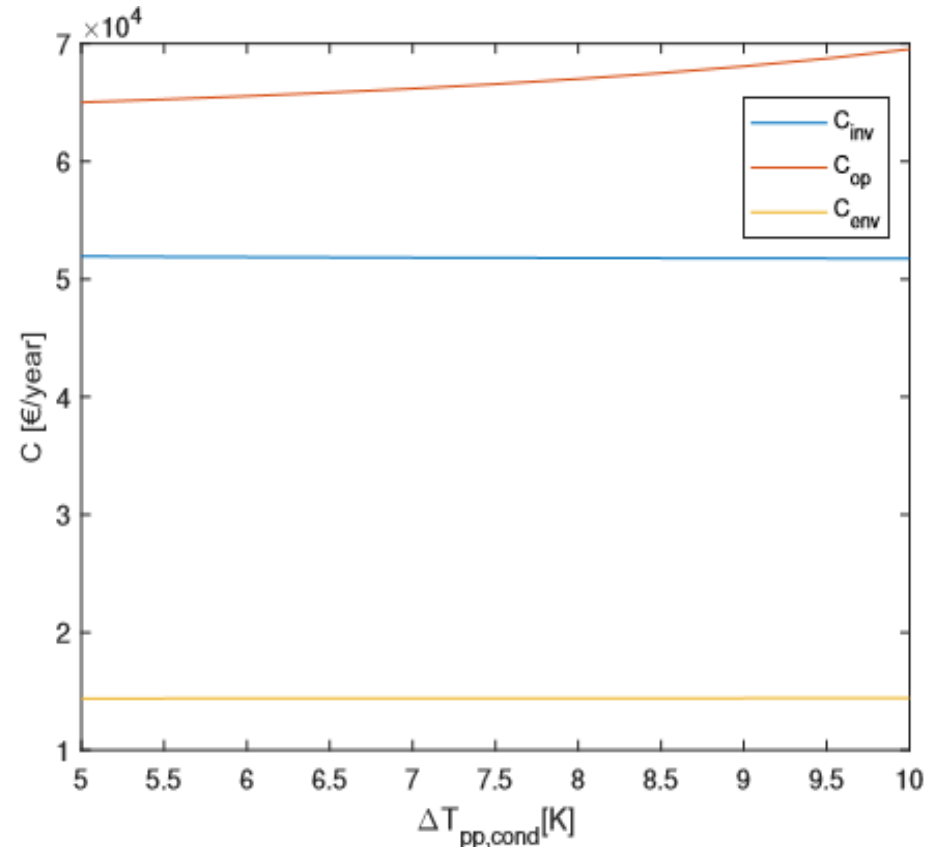
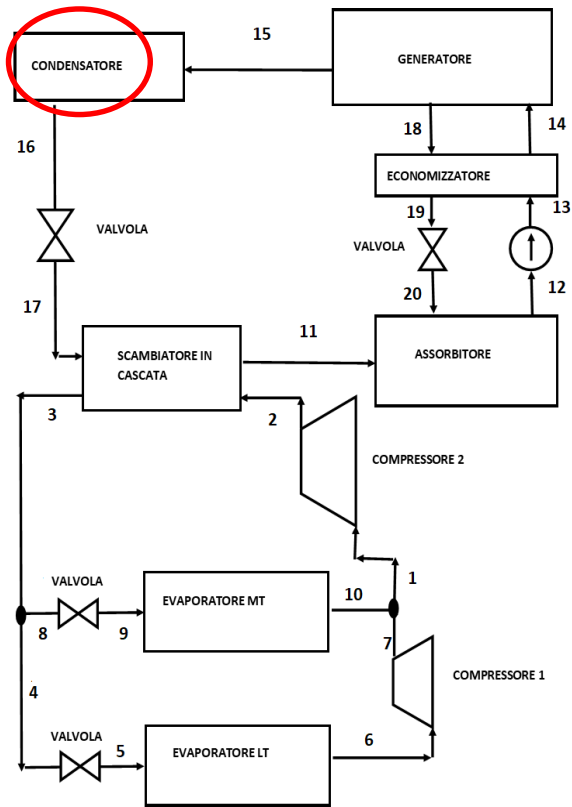
# Impianto ottimizzato



# Impianto ottimizzato

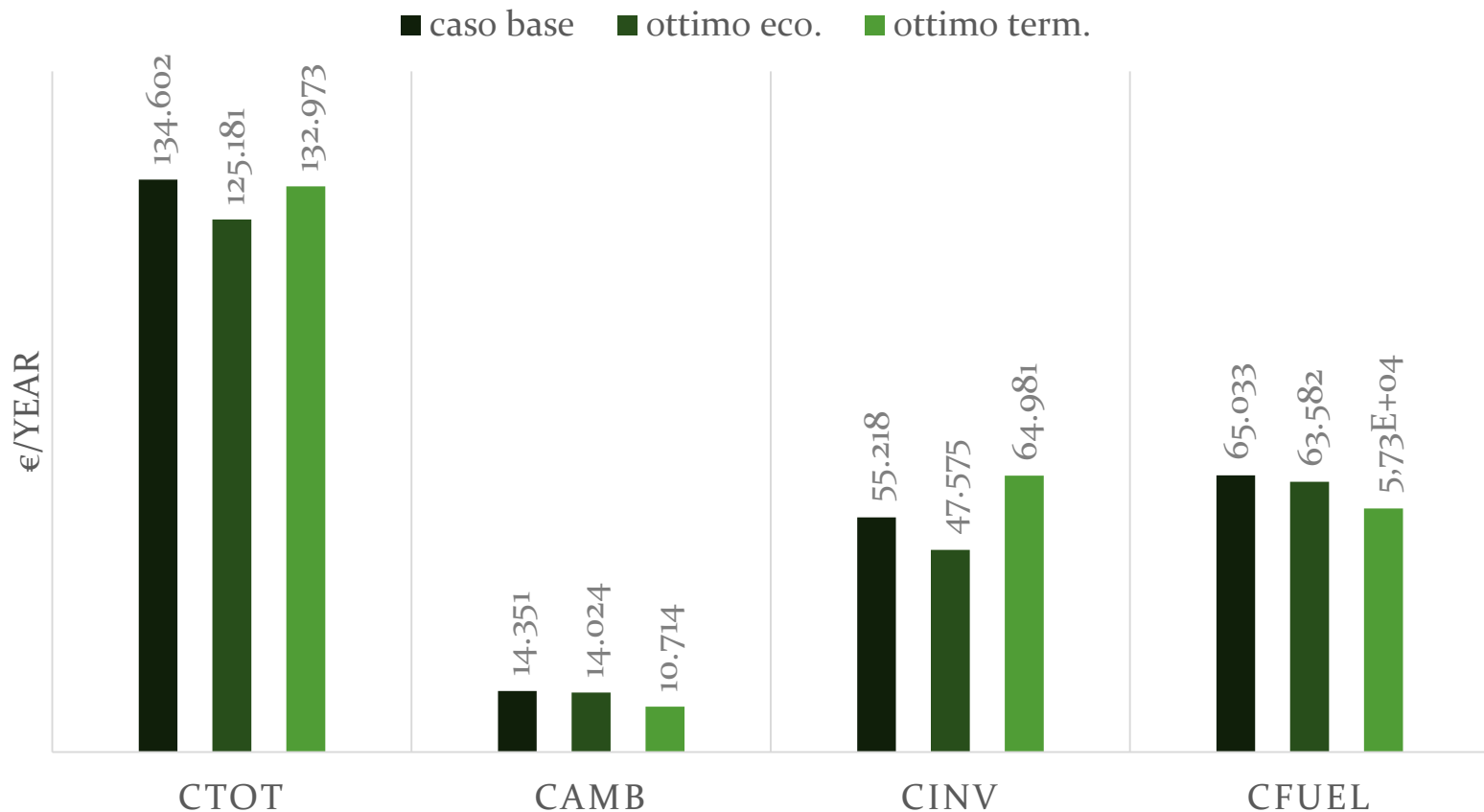


# Impianto ottimizzato



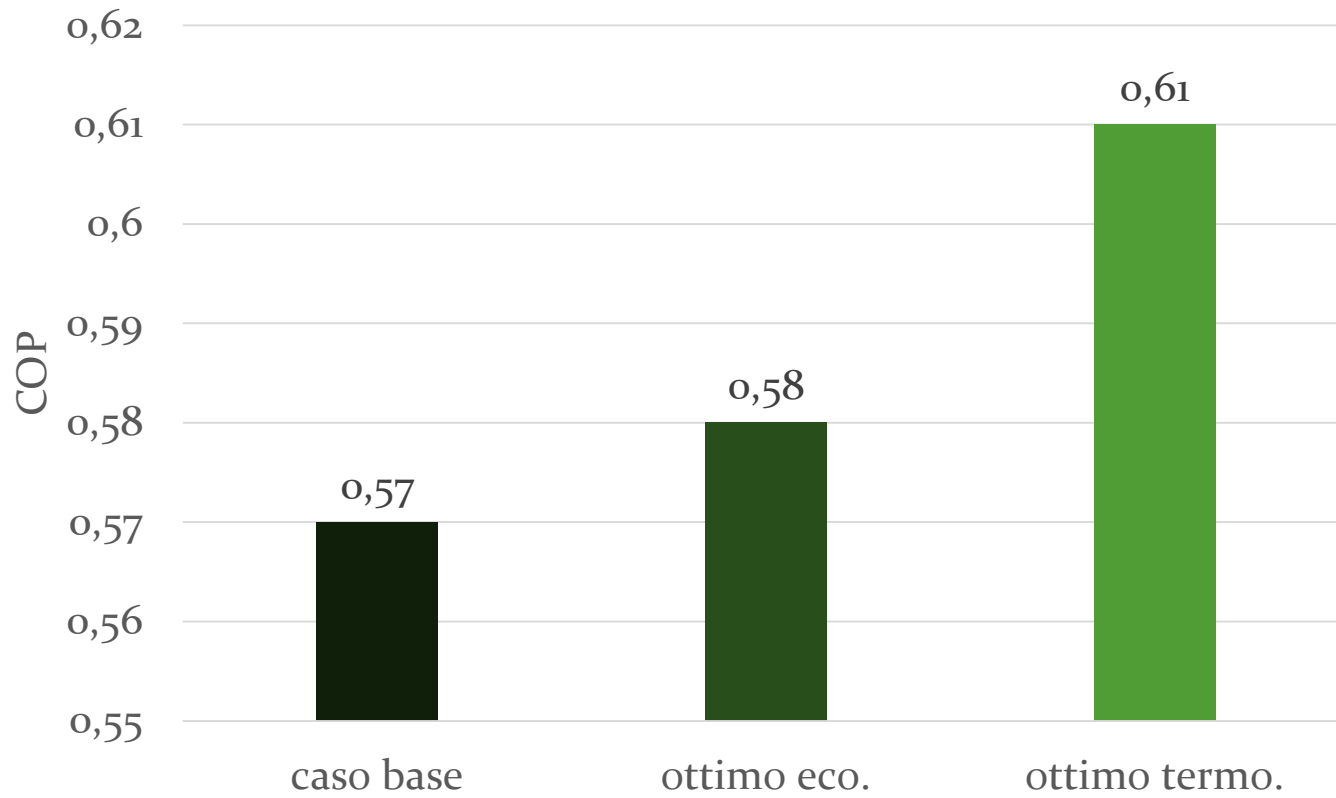
# Impianto ottimizzato

- Ricerca del minimo costo totale e del massimo COP dalle singole variazioni.
- Confronto tra i costi e il COP nei casi di ottimo termodinamico, economico e caso base:



# Impianto ottimizzato

- Confronto tra i costi e il COP nei casi di ottimo termodinamico, economico e caso base:





# Conclusioni

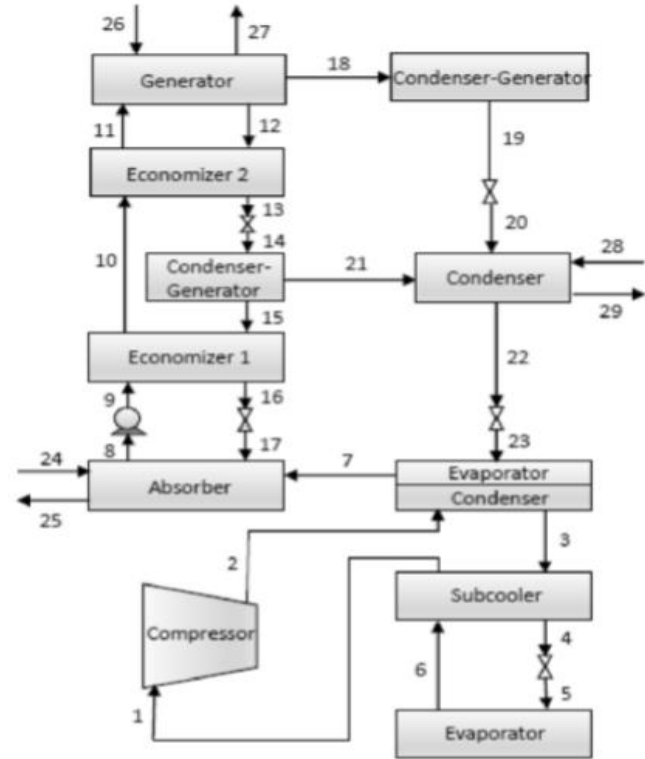
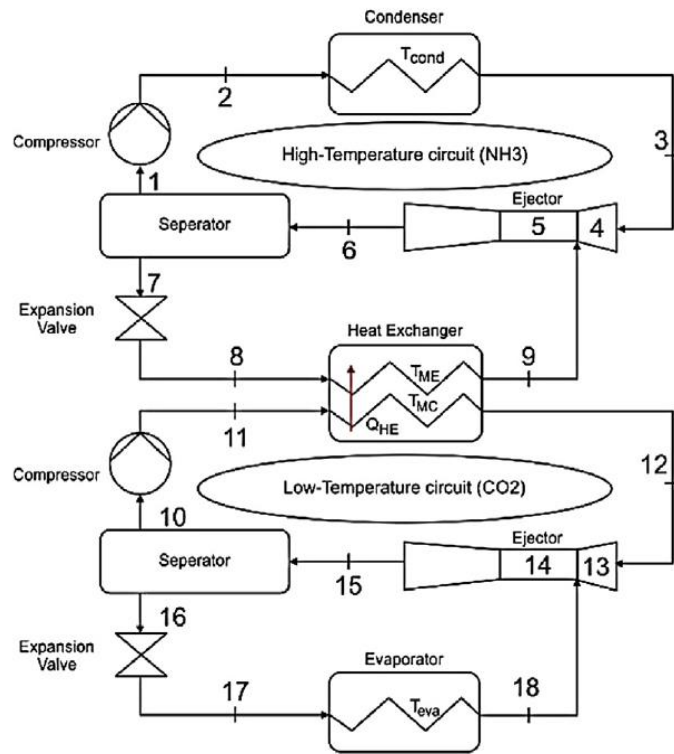
Parametri	Impianto base	Ottimo economico	Ottimo termodinam.	Impianto convenzion.
COP	0,57	0,58	0,61	2,55
$\varepsilon$	0,16	0,16	0,19	0,24
$C_{TOTALE} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right]$	134891	125181	132973	111879
$C_{ambientali} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right]$	14351	14024	10714	29183
$C_{investimento} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right]$	55507	47575	64981	43547
$C_{fuel} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right]$	65033	63582	57278	39149
$\dot{W}_{speso} \text{ [kW]}$	23,9	23,1	17,9	50,9
$\dot{Q}_{gen} \text{ [kW]}$	205,2	200,7	194,3	-
$A_{evap,LT} \text{ [m}^2\text{]}$	1678,8	1074,4	1678,8	858,2
$A_{evap,MT} \text{ [m}^2\text{]}$	4329,5	2841,5	6260,8	1531,5
$A_{cascata} \text{ [m}^2\text{]}$	208,3	528,4	510,9	60,1

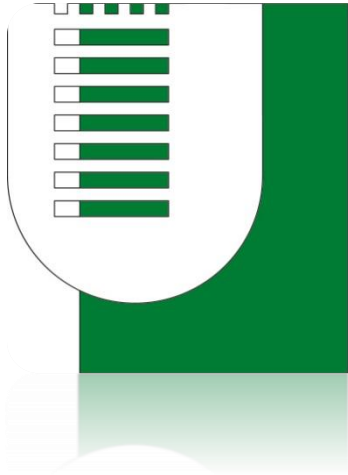
# Conclusioni

- Risparmio del 50% di energia elettrica consumata
  - Risparmio del 50% sui costi ambientali
  - Aumento dei costi totali d'impianto
  - Fluidi di processo a basso impatto ambientale
  - Sorgenti di calore al generatore anche non convenzionali e «pulite»
  - Poca differenza tra i COP nelle due situazioni di ottimo
  - Una variazione sui costi totali di circa 10.000 €/anno tra i casi di ottimo
-

# Sviluppi futuri

- Costi di manutenzione.
- Costo della torre di raffreddamento e dei pannelli solari.
- Eventuali incentivi economici (conto termico).
- Altre tipologie di impianto.





**TOR VERGATA**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

*Corso di Laurea in Ingegneria Energetica*

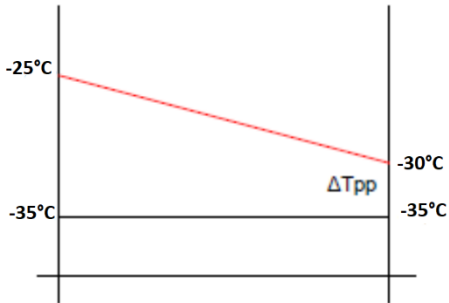
**Analisi exergoeconomica di un impianto di refrigerazione  
in cascata ad assorbimento e compressione di vapore.  
Caso studio: potenze frigorifere di un supermercato.**

Relatore:  
**Ing. Ivano Petracchi**

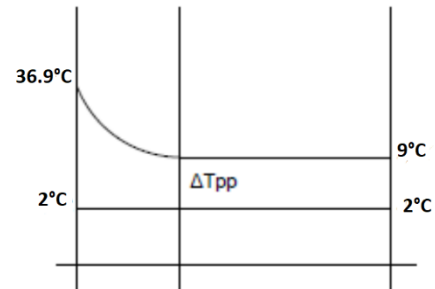
Candidato:  
**Francesco Micaloni**

# Profili di Temperatura

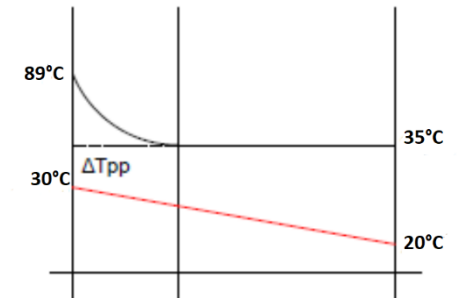
## Evaporatore LT



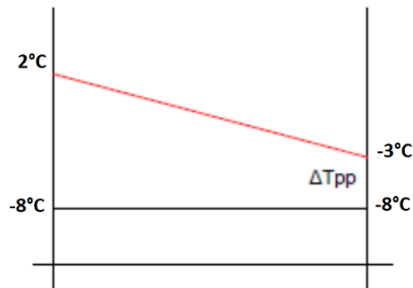
## Cascata



## Condensatore



## Evaporatore MT



## Parametri di esercizio variabili

$\Delta T_{\text{evap.LT}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{cascata}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{evap.MT}}$	5 °C (valore base)
$\Delta T_{\text{cond.HT}}$	5 °C (valore base)
$T_{\text{generatore}}$	89 °C (valore base)
$\epsilon$	0,6

# Coefficienti di scambio convettivo

- Fluido in evaporazione:

Per  $Re < 3600$

$$h_b = F(1-x)^{0.8} Nu_l \frac{\lambda_l}{d_i}$$

$$Nu_l = 1.86 \left( \frac{Re_l Pr_l d_i}{L_1} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_m}{\mu_s} \right)^{0.14}$$

$$F = 2.35 \left( \frac{1}{X_{tt}} + 0.213 \right)^{0.736}$$

$$X_{tt} = \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1-x_g}{x_g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- Fluido in condensazione con cambiamento di fase:

Per  $Re > 350$

$$h_c = 0.023 \frac{\lambda_l}{d_i} Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} \left[ (1-x)^{0.8} + \frac{3.8x^{0.76}(1-x)^{0.04}}{\left( \frac{p_{sat}}{p_{cr}} \right)^{0.38}} \right]$$

- Fluido in fase singola (Gnielinski):

Per  $2600 < Re < 1000000$

$$h = \frac{\left( \frac{f}{8} \right) (Re - 1000) Pr}{K1 + K2 \left( \frac{f}{8} \right)^{0.5} \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}$$

# Coefficienti di scambio convettivo

- Assorbitore:

$$h = \frac{\lambda}{\delta} (0,029 Re^{0,53} Pr^{0,344})$$

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3\mu\Gamma}{\rho^2 g}}$$

$$\Gamma_{ass} = \frac{\dot{m}_s}{n^{\circ} tubi L_{tubi}}$$

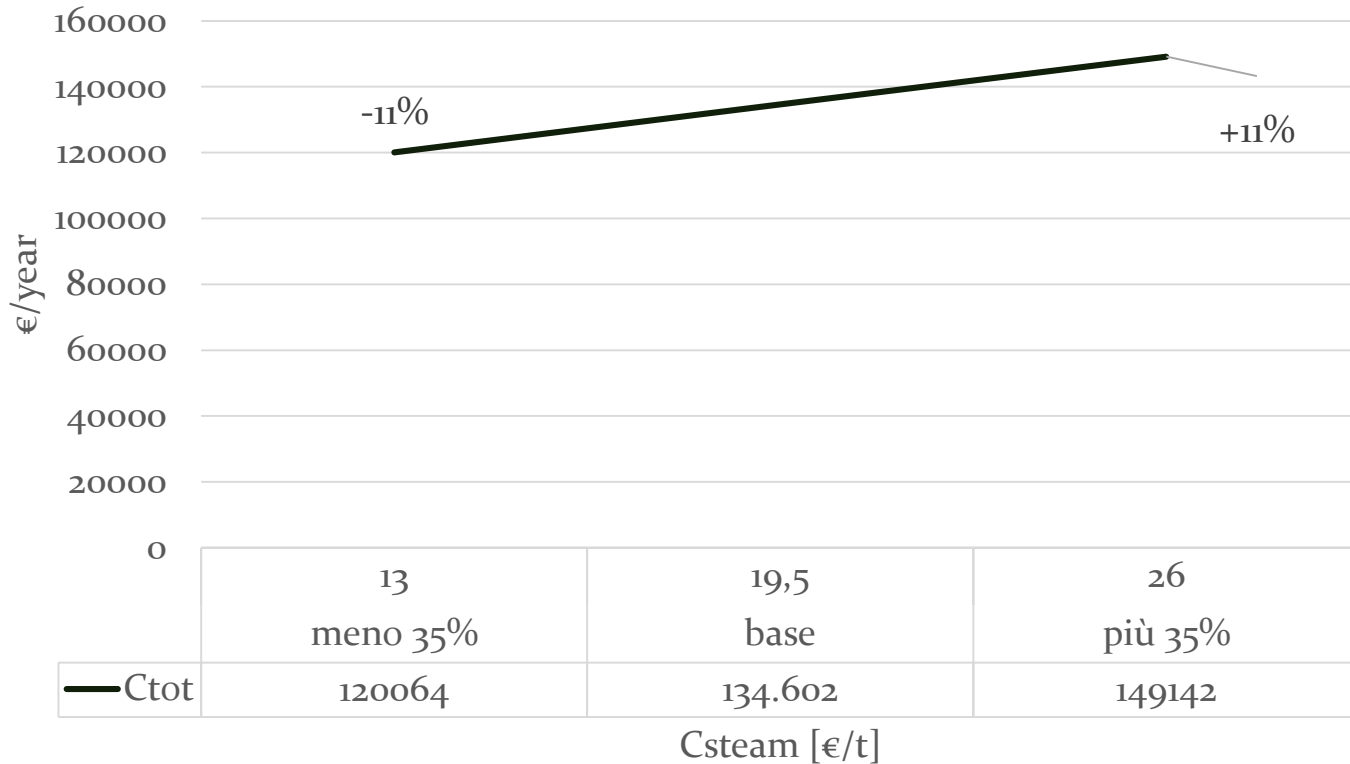
- Generatore:

$$h = 5554,3 \Gamma^{0,236}$$

$$\Gamma_{gen} = \frac{\dot{m}_{tot}}{2 n^{\circ} tubi L_{tubi}}$$

---

# Analisi di sensitività sul costo di produzione del vapore





# Coefficiente di scambio convettivo e analisi di sensitività

