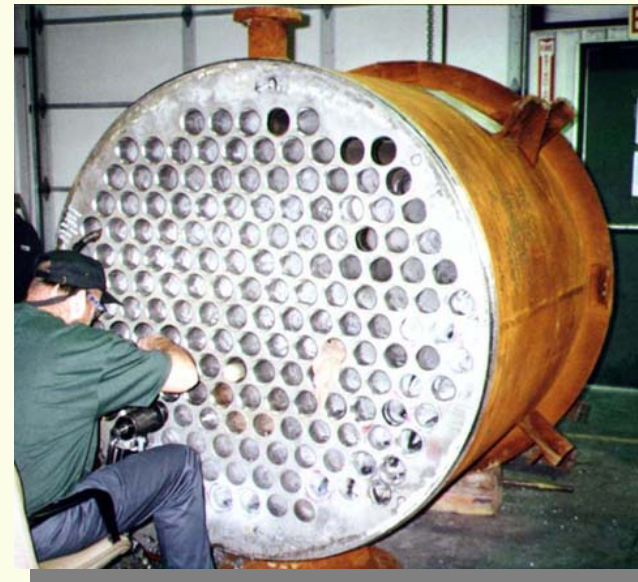


Reti di scambio termico



Reti di scambio termico

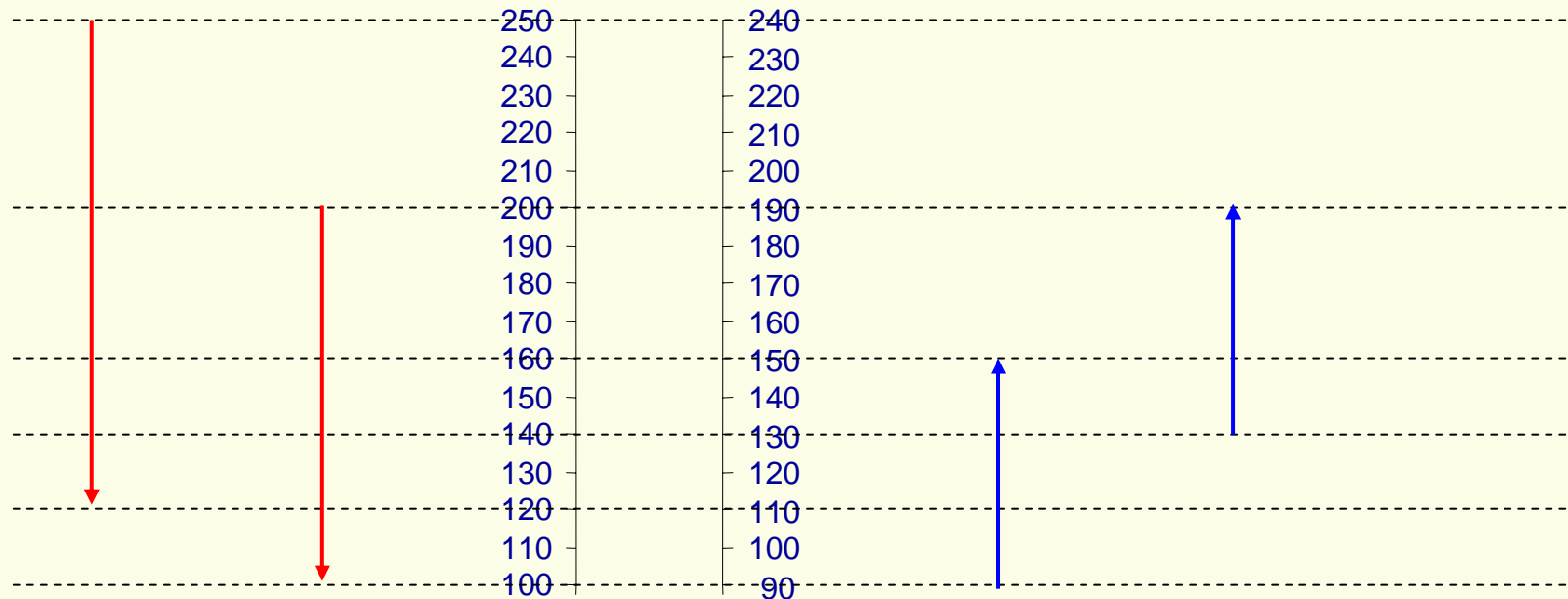
Heat Exchange Networks

Corrente	Condizione	F Cp [kcal/h °C]	T _{in}	T _{out}	Q disponibile 1.E3 kcal/h
1	Calda	1,000	250	120	130
2	Calda	4,000	200	100	400
3	Fredda	3,000	90	150	-180
4	Fredda	6,000	130	190	-360
				TOTALE	-10

$$Q_i = F_i \cdot C_{p,i} \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad i = 1, \dots, N_{\text{correnti}}$$



Correnti CALDE



Correnti FREDDE

Hohmann (1971)

Umeda, Itoh e Shiroko (1978)

Linnhoff e Flower (1978)

Linnhoff e Hindmarsh (1983)

Townsend e Linnhoff (1983)

Linnhoff, Dunford e Smith (1985)

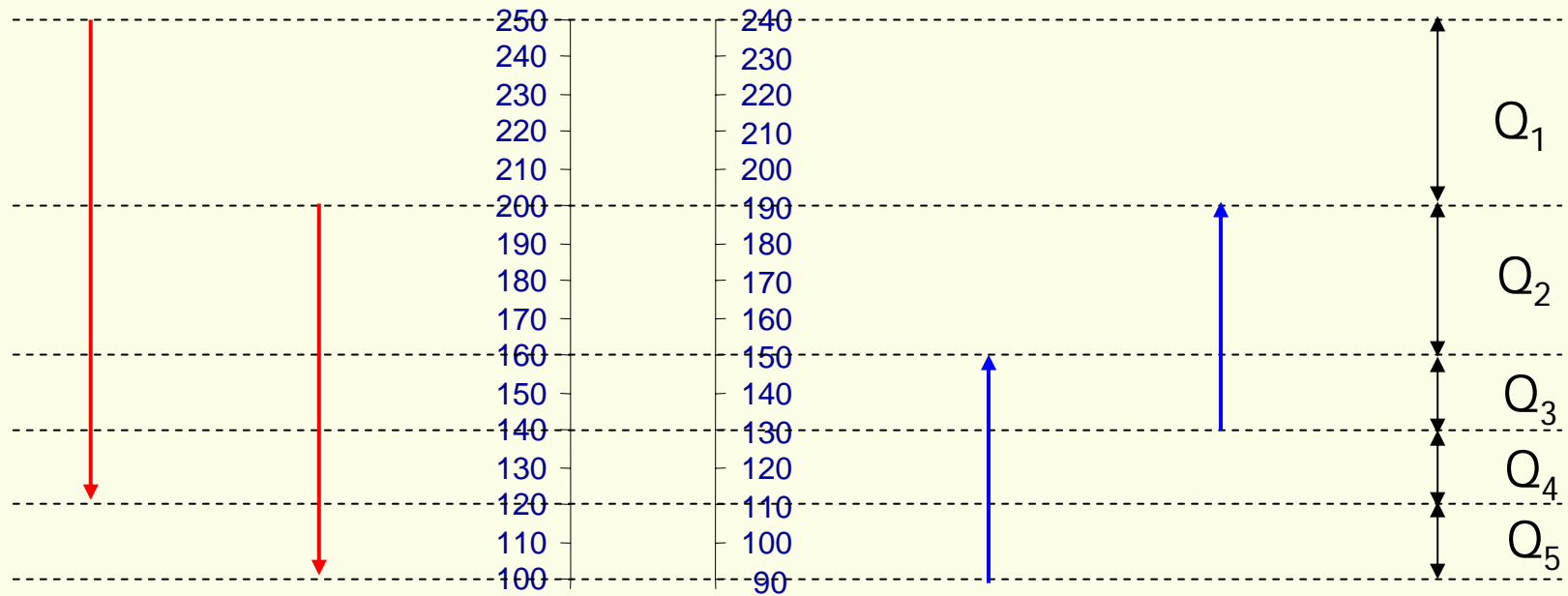


$F_1 c_{p1} = 1,000$

4,000

3,000

6,000



$$Q_i = \left[\sum_i (F \cdot C_p)_{HOT,i} - \sum_i (F \cdot C_p)_{COLD,i} \right] \cdot \Delta T_i \quad i = 1, \dots, N_{\text{intervalli}}$$



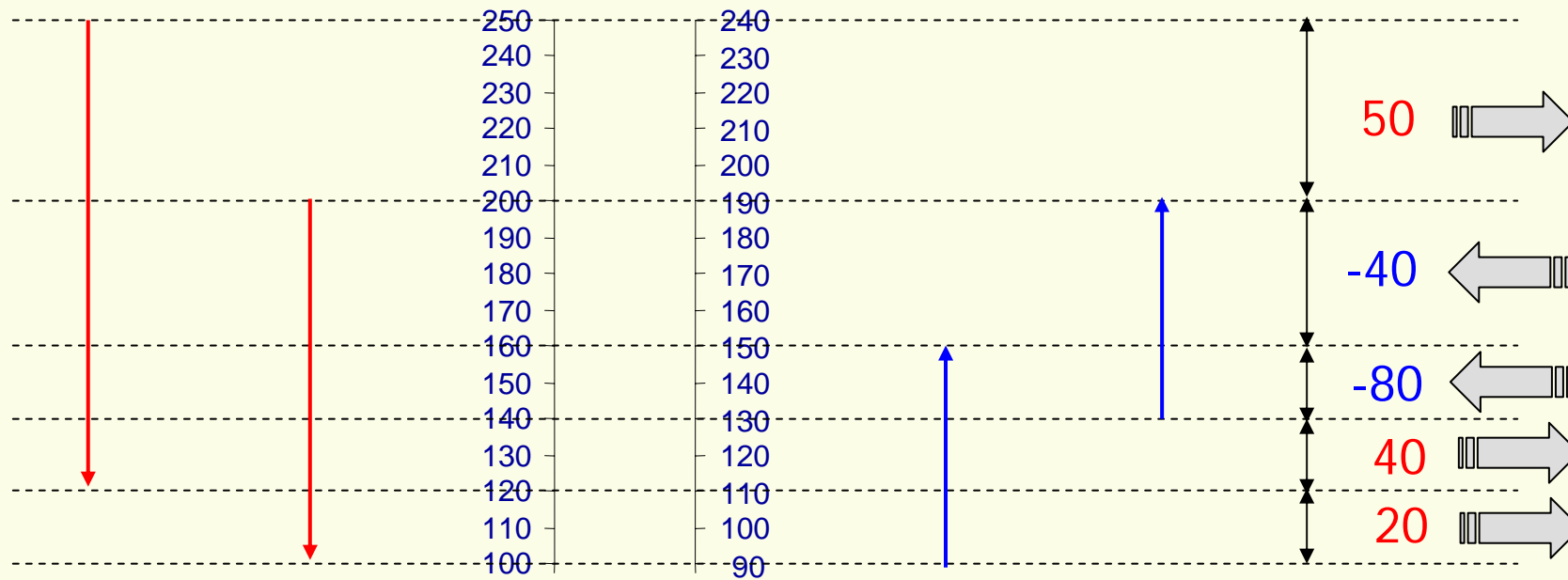
$F_1 c_{p1} = 1,000$

4,000

3,000

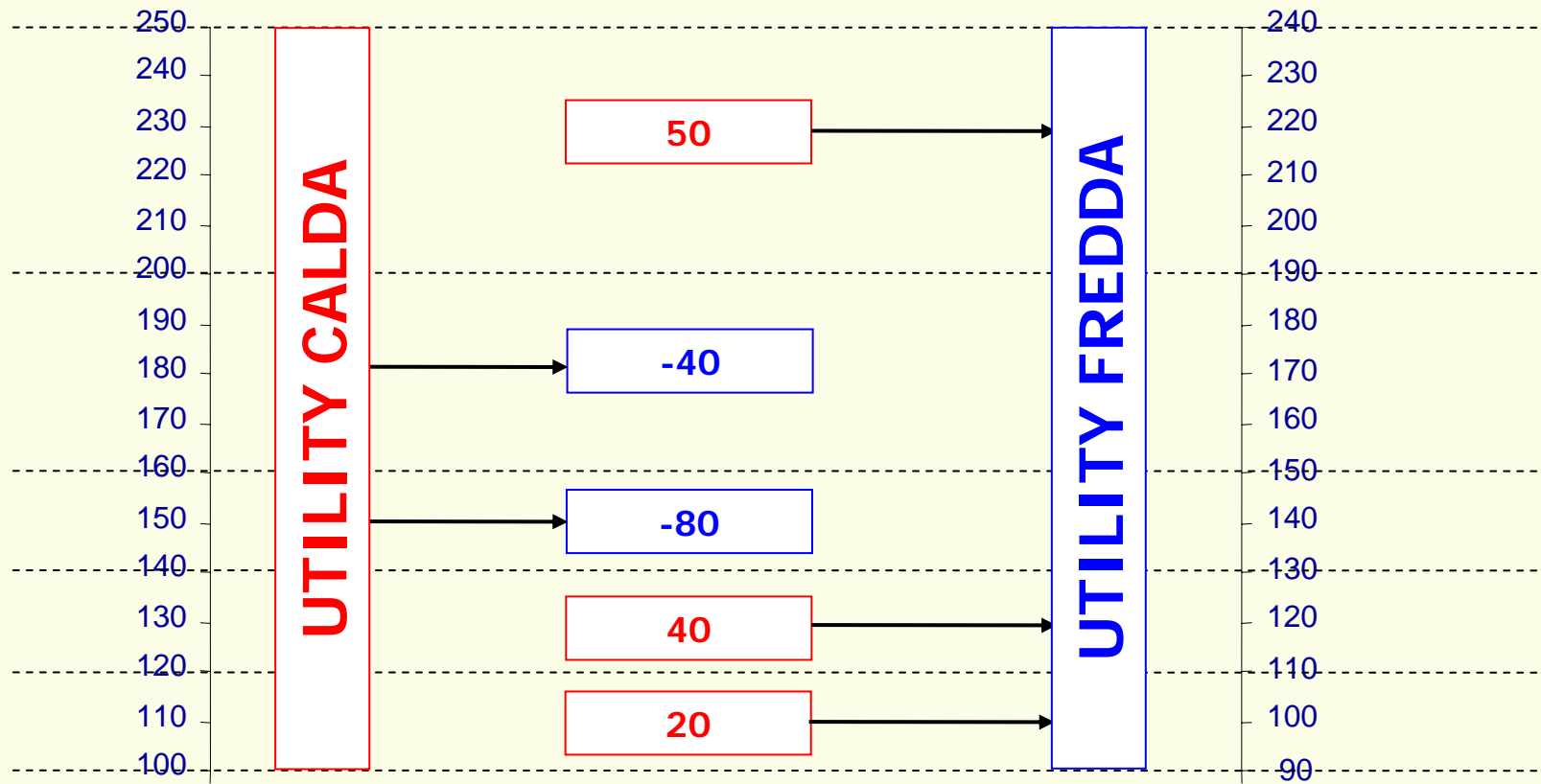
6,000

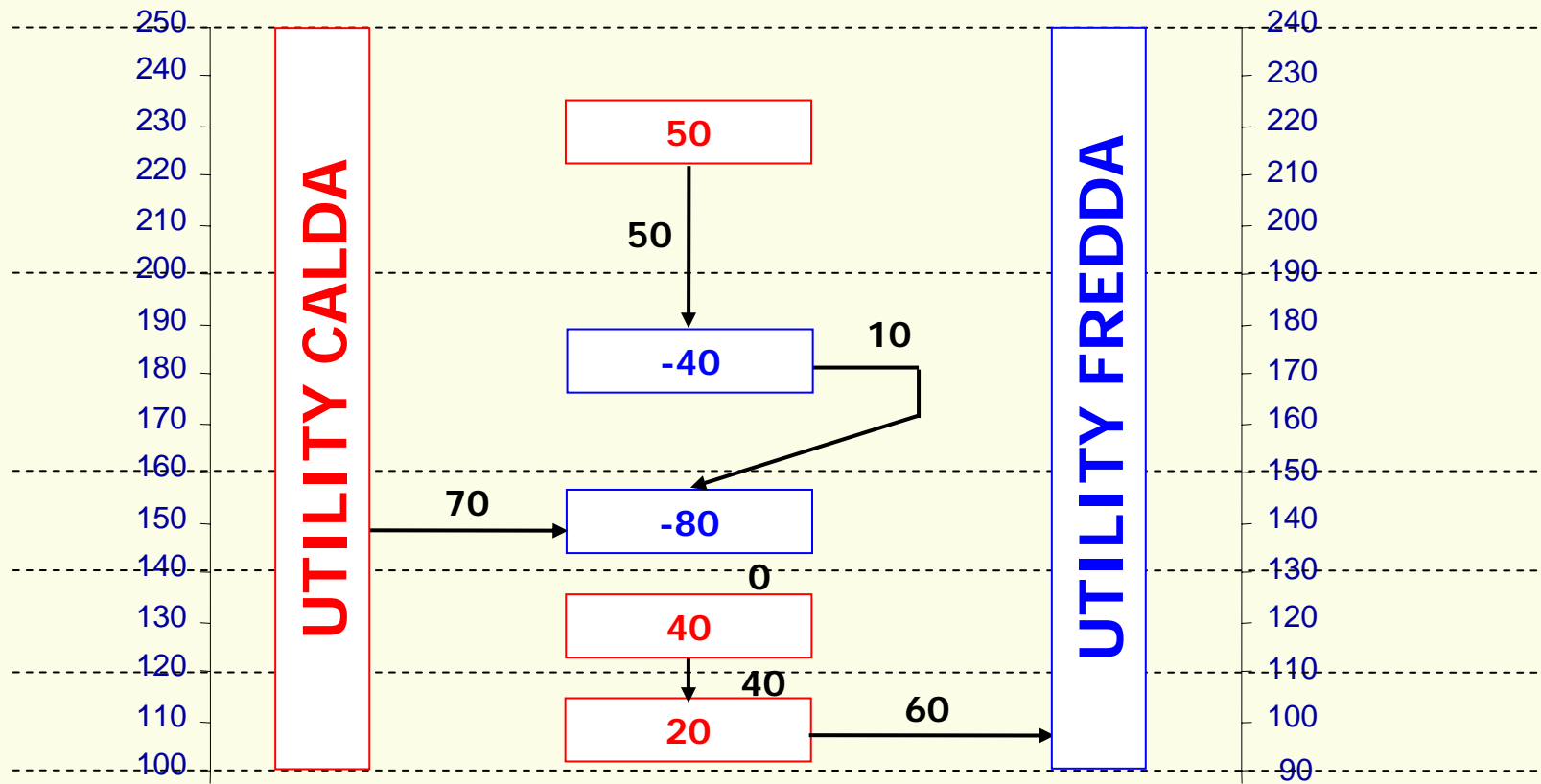
1,000 Q

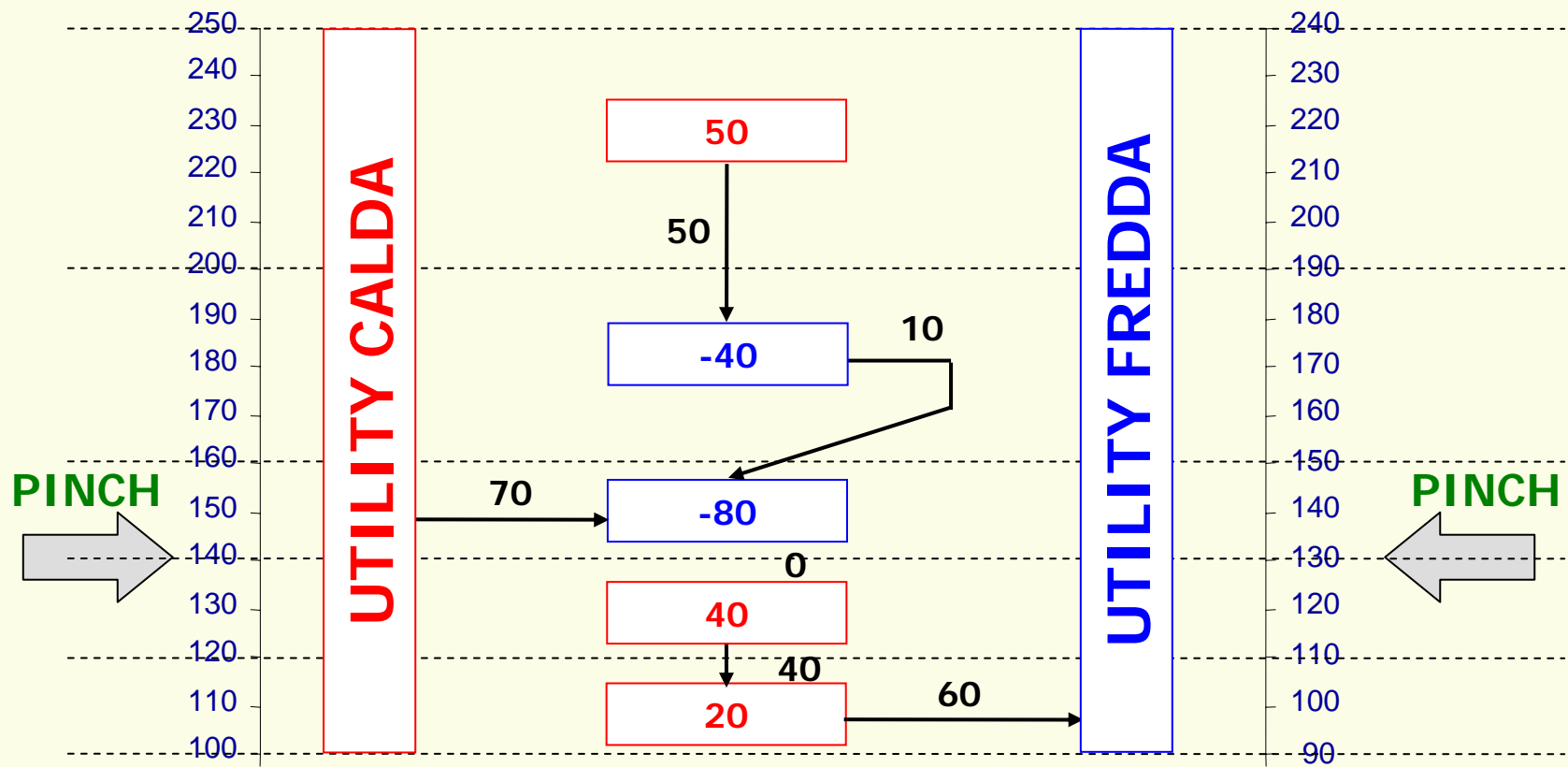


TOTALE = -10









Diagrammi Temperatura – Entalpia

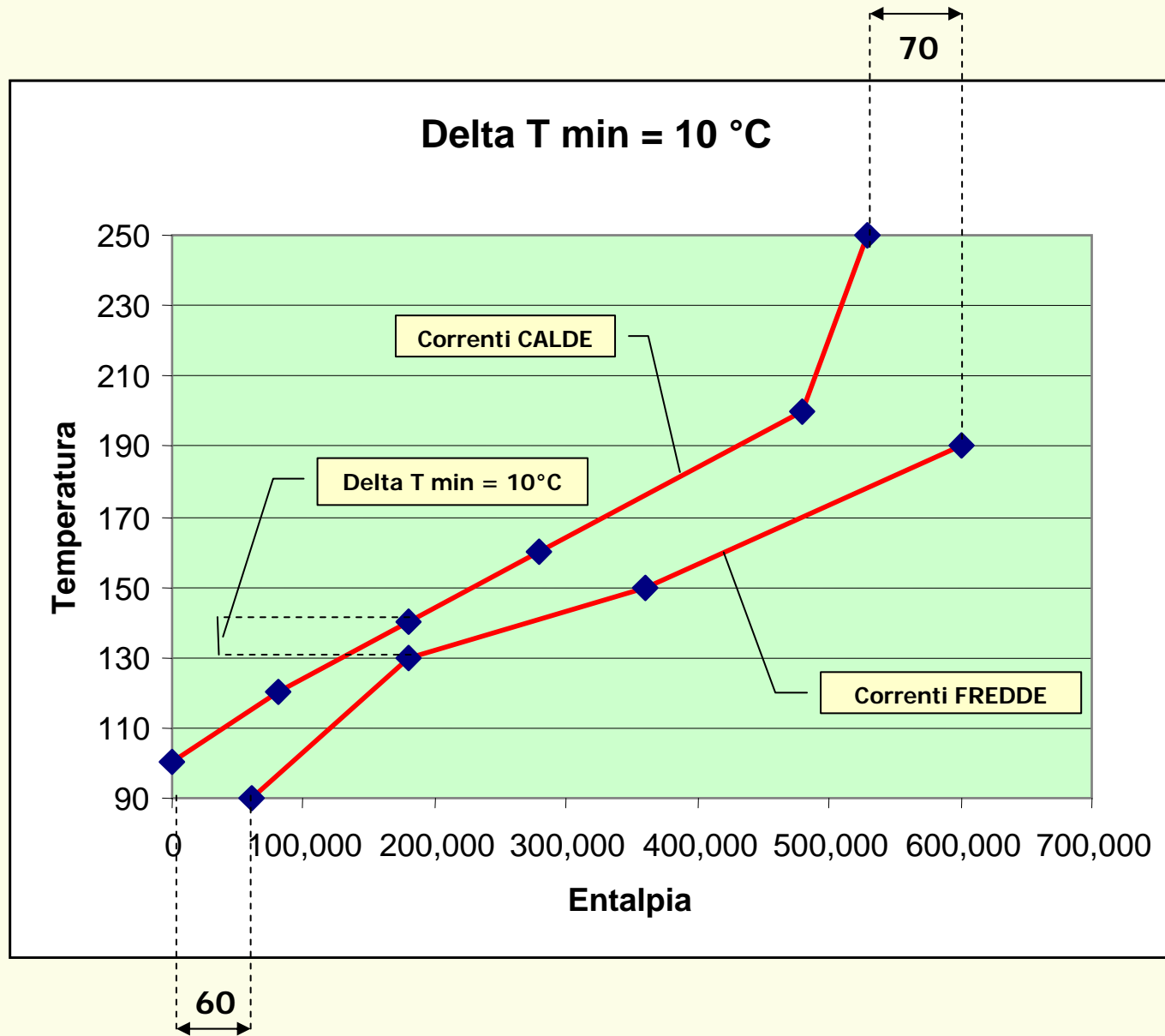
Alla MINIMA temperatura delle correnti CALDE si introduce l'entalpia di riferimento NULLA.

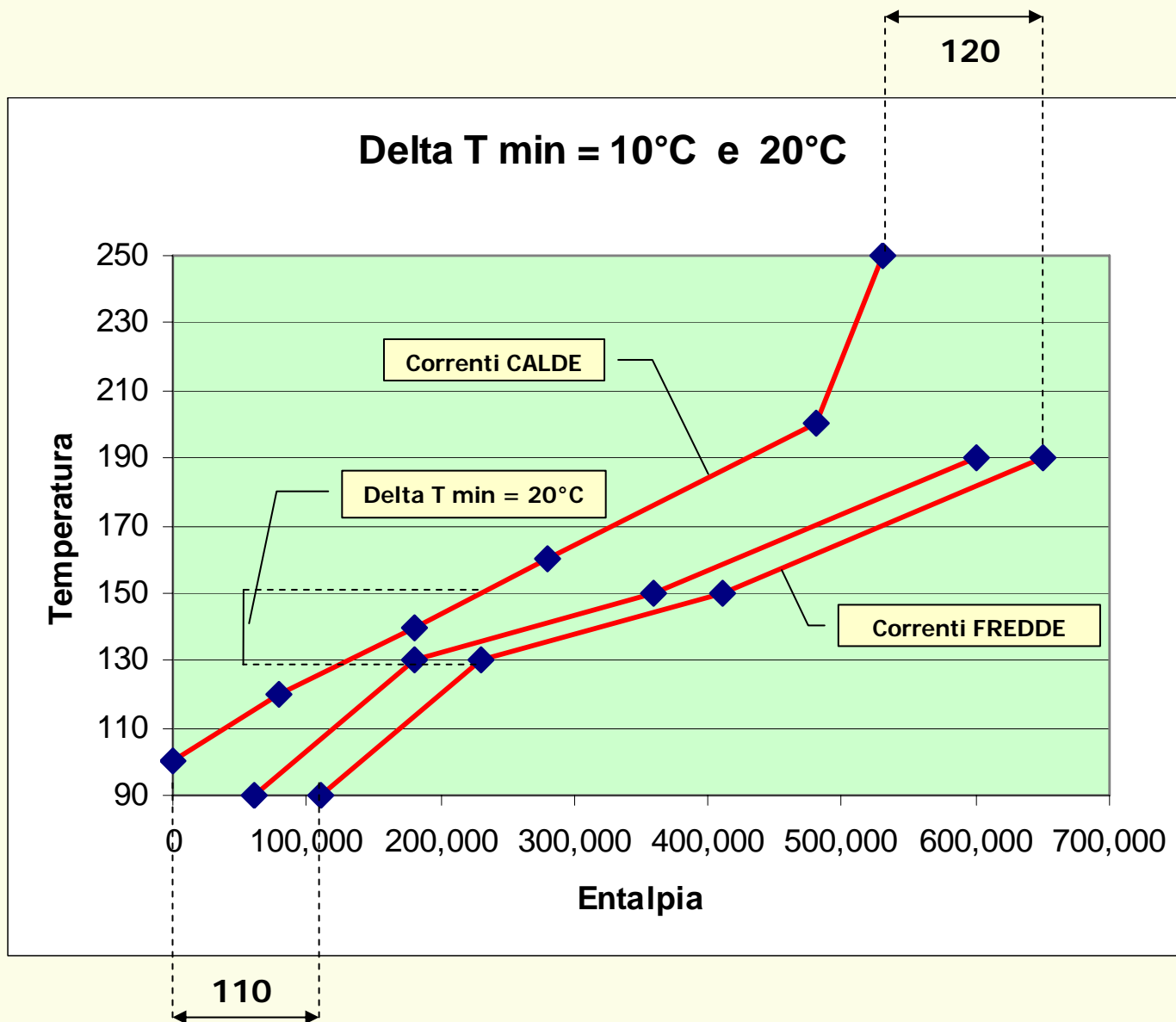
Correnti Calde					
T	F Cp1	F Cp2	(F Cp)tot	H	H cumulativa
100				0	0
120		4,000	4,000	80,000	80,000
140	1,000	4,000	5,000	100,000	180,000
160	1,000	4,000	5,000	100,000	280,000
200	1,000	4,000	5,000	200,000	480,000
250	1,000		1,000	50,000	530,000

Noto il QcMin, ovvero il minimo calore da sottrarre da parte di una utility, lo si sceglie come entalpia di riferimento per le correnti FREDDE alla loro MINIMA temperatura.

Correnti Fredde					
T	F Cp3	F Cp4	(F Cp)tot	H	H cumulativa
90				60,000	60,000
130	3,000		3,000	120,000	180,000
150	3,000	6,000	9,000	180,000	360,000
190		6,000	6,000	240,000	600,000







Determinazione Gran curva composta

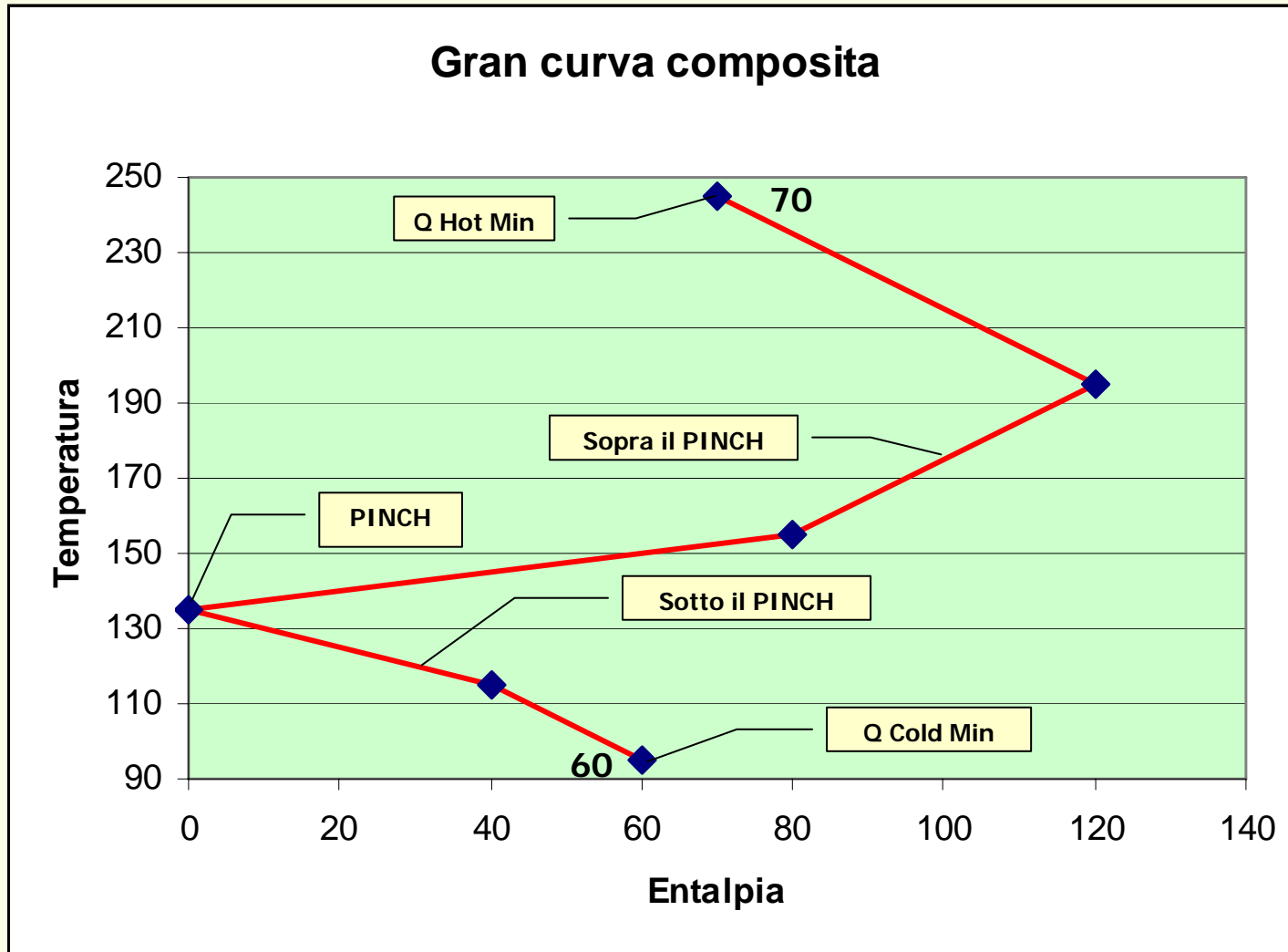
Valori cumulativi a partire simmetricamente dalla condizione di pinch.

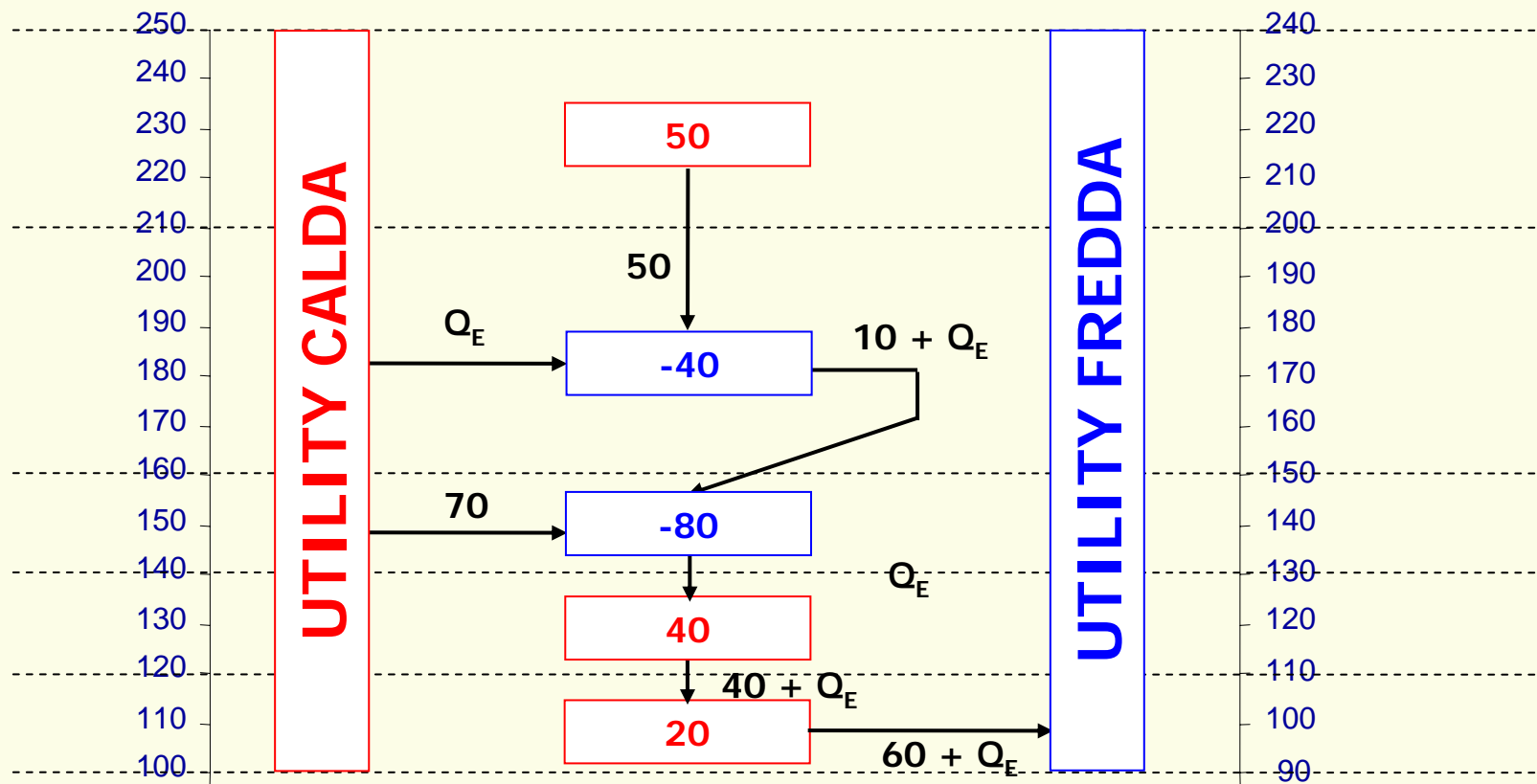
Dal diagramma in cascata utilizzando i valori delle entalpie relative alle correnti calde e fredde

T Hot	T Cold	T Med	H	H cumulativa
100	90	95	20	60
120	110	115	40	40
140	130	135	0	0
160	150	155	80	80
200	190	195	40	120
250	240	245	-50	70



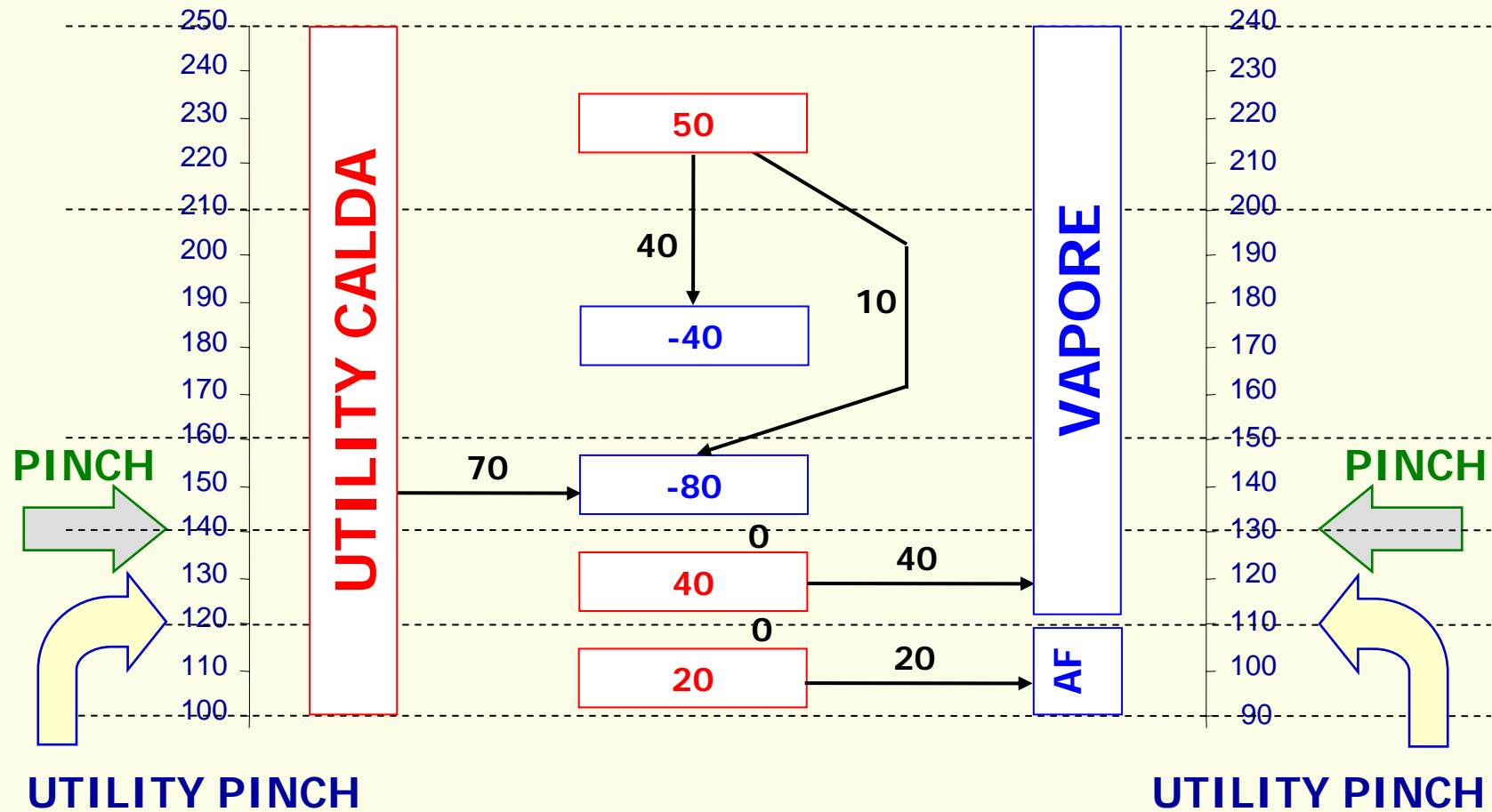
Gran curva composta





- NON trasferire calore a CAVALLO del PINCH
- Aggiungere calore solo SOPRA il PINCH
- Sottrarre calore solo SOTTO il PINCH

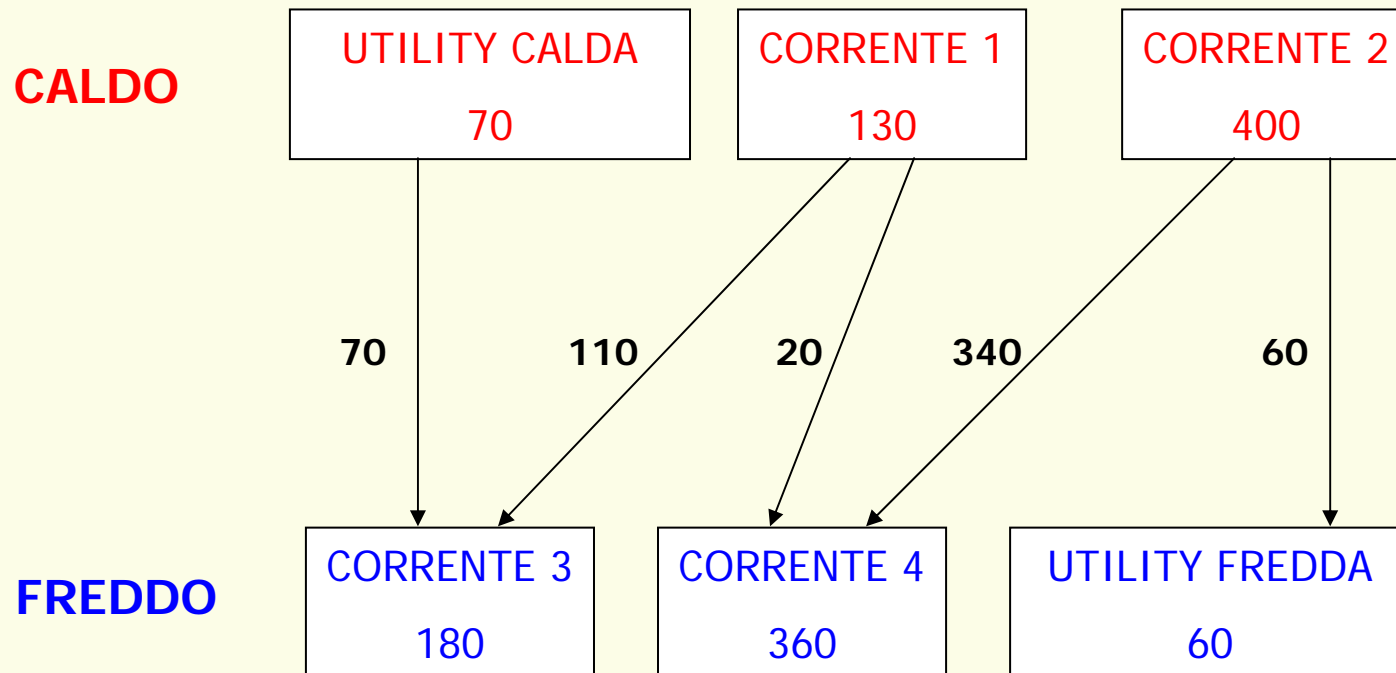




AF = Acqua Fredda

- Aggiungere calore alla T più bassa possibile rispetto al PINCH
- Sottrarre calore alla T più alta possibile rispetto al PINCH

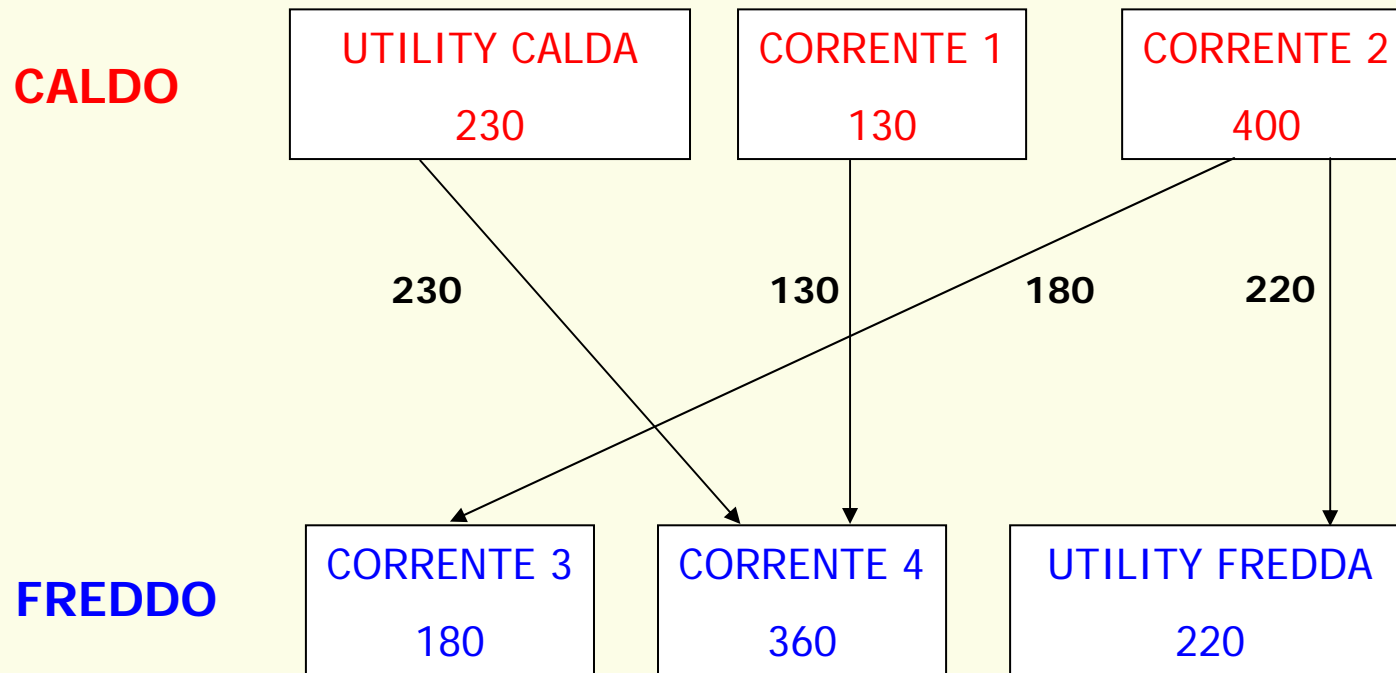




Numero scambiatori = (Numero correnti) + (Numero utilities) - 1 = 4 + 2 - 1 = 5

Questa espressione **non** sempre è corretta e valida...





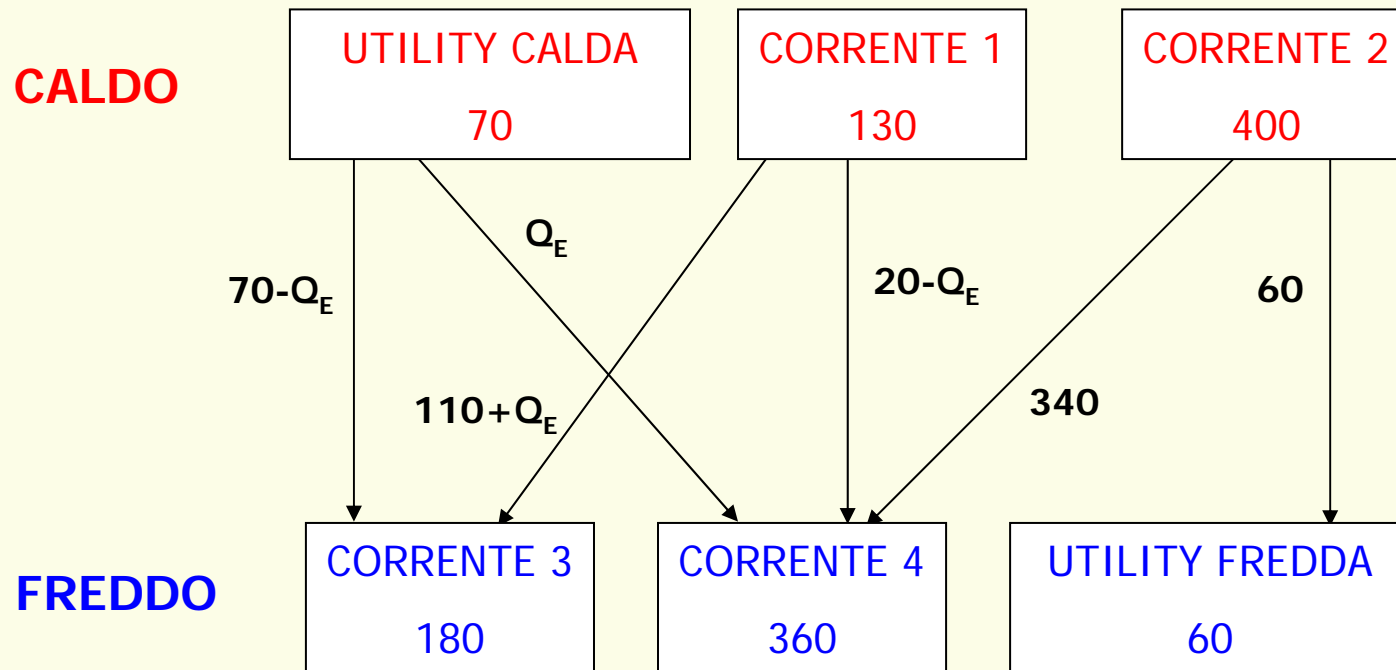
Numero scambiatori = (N. correnti) + (N. utilities) – (N. problemi indipendenti)

I problemi indipendenti di questo esempio sono 2.

Infatti individuo i raggruppamenti: (2 + 3 + Ut. Fredda) e (Ut. Calda + 1 + 4)

→ Numero scambiatori = 4 + 2 – 2 = 4





$N. \text{ scambiatori} = (N. \text{ correnti}) + (N. \text{ utilities}) + (N. \text{ loops}) - (N. \text{ problemi indipendenti})$

In questo caso esiste un solo problema indipendente (l'esempio complessivo).

Individuo un loop: Ut. Calda \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow Ut. Calda

\rightarrow Numero scambiatori = $4 + 2 + 1 - 1 = 6$



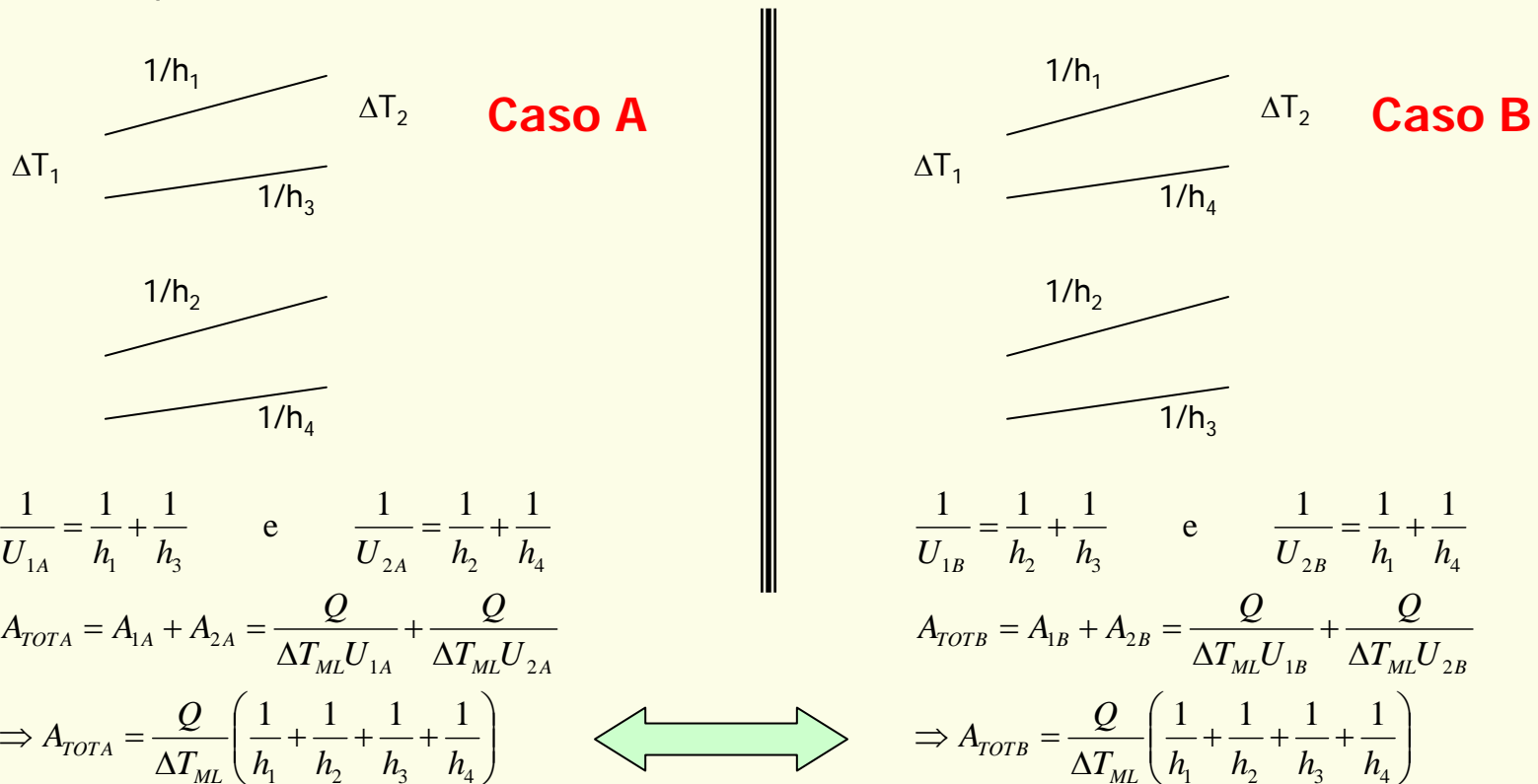
Stima delle aree

Considero all'interno di ogni intervallo del diagramma T-H le relative correnti.
Un intervallo è caratterizzato da rette di uguale pendenza.

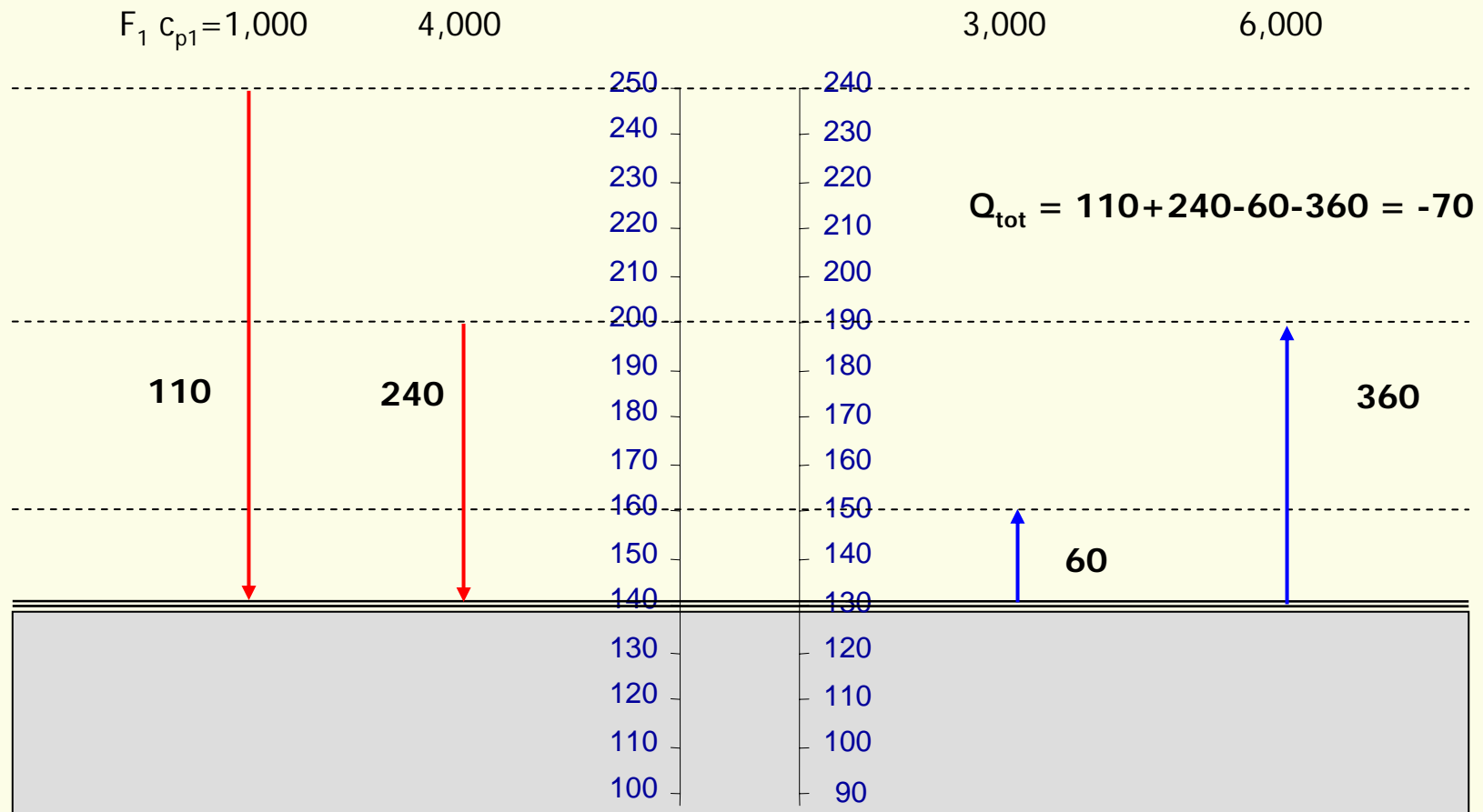
In genere: $1/U = 1/h_{\text{hot}} + 1/h_{\text{cold}} \rightarrow A = Q/(U \Delta T_{ML})$

Nel caso ci siano più correnti nell'intervallo debbo considerare i possibili accoppiamenti.

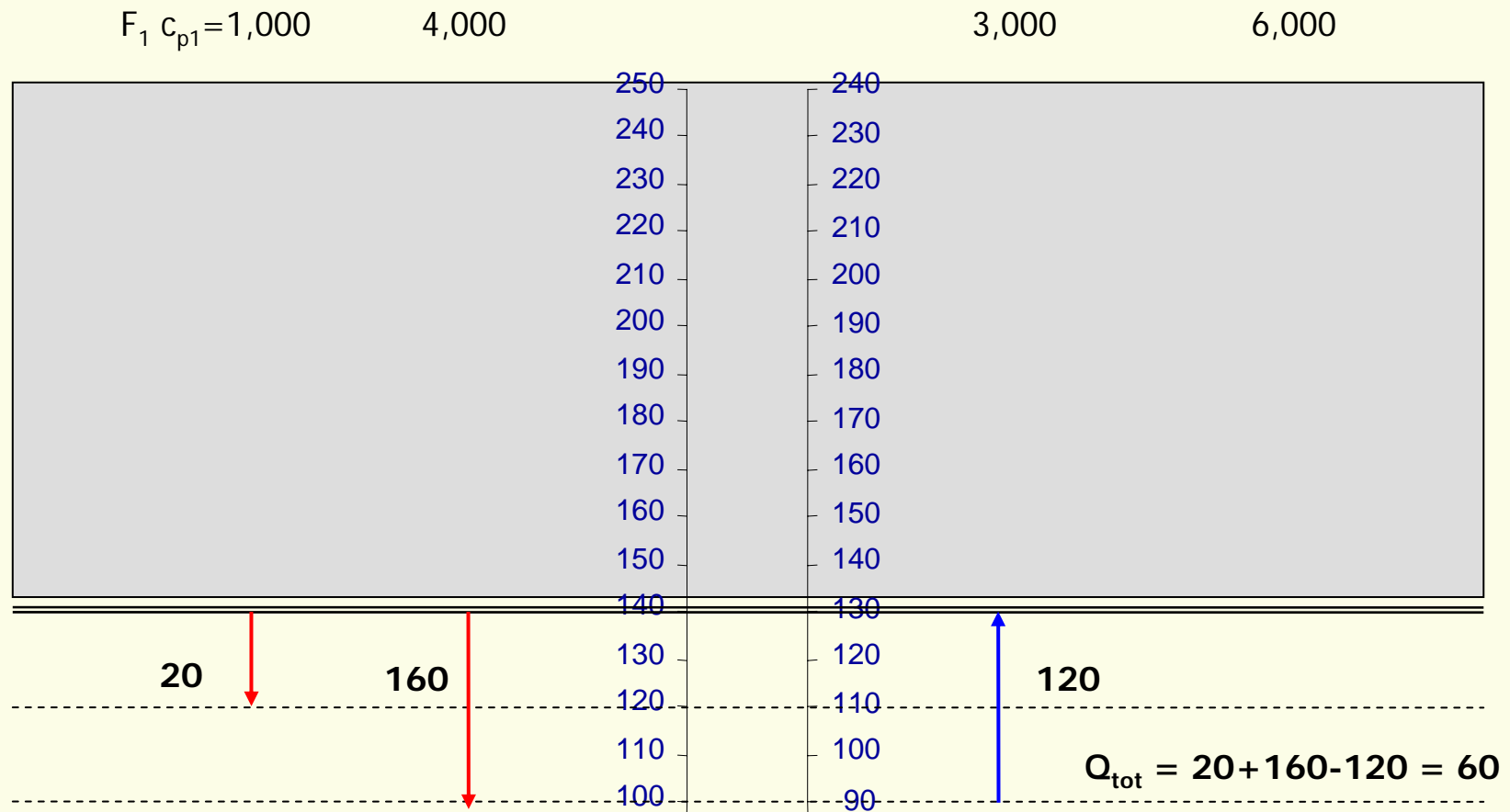
Ad esempio con due correnti calde (1), (2) e due correnti fredde (3), (4) si ha:



Sopra il PINCH

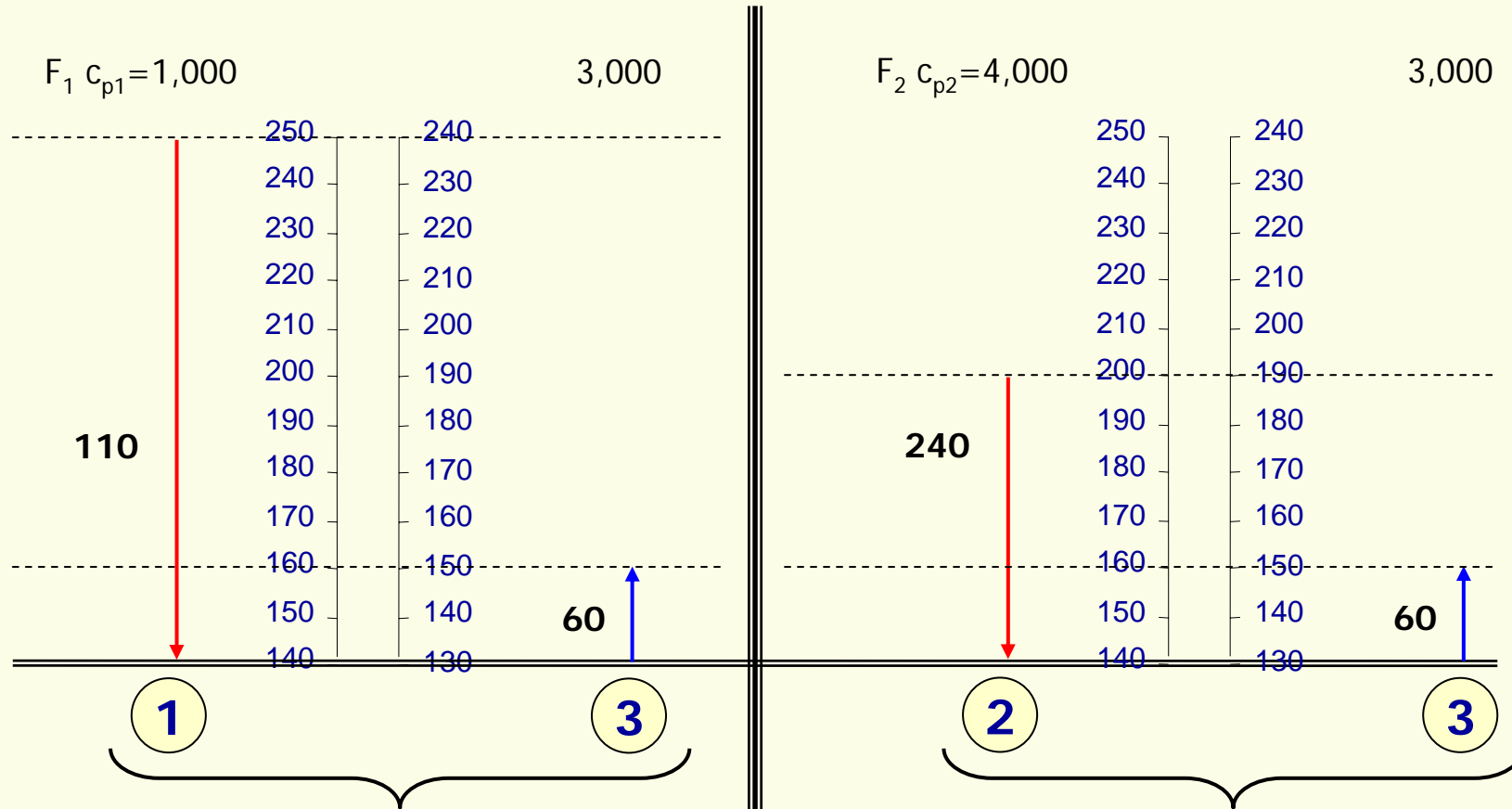


Sotto il PINCH



Accoppiamento tra le correnti sopra il PINCH

$$F_H C_{pH} \leq F_C C_{pC}$$



$$Q = 60,000 = 1,000(T_{1in} - 140)$$

$$\rightarrow T_{1in} = 200 > T_{3out} + 10 = 150 + 10 = 160$$

L'accoppiamento è **FATTIBILE**

$$Q = 60,000 = 4,000(T_{2in} - 140)$$

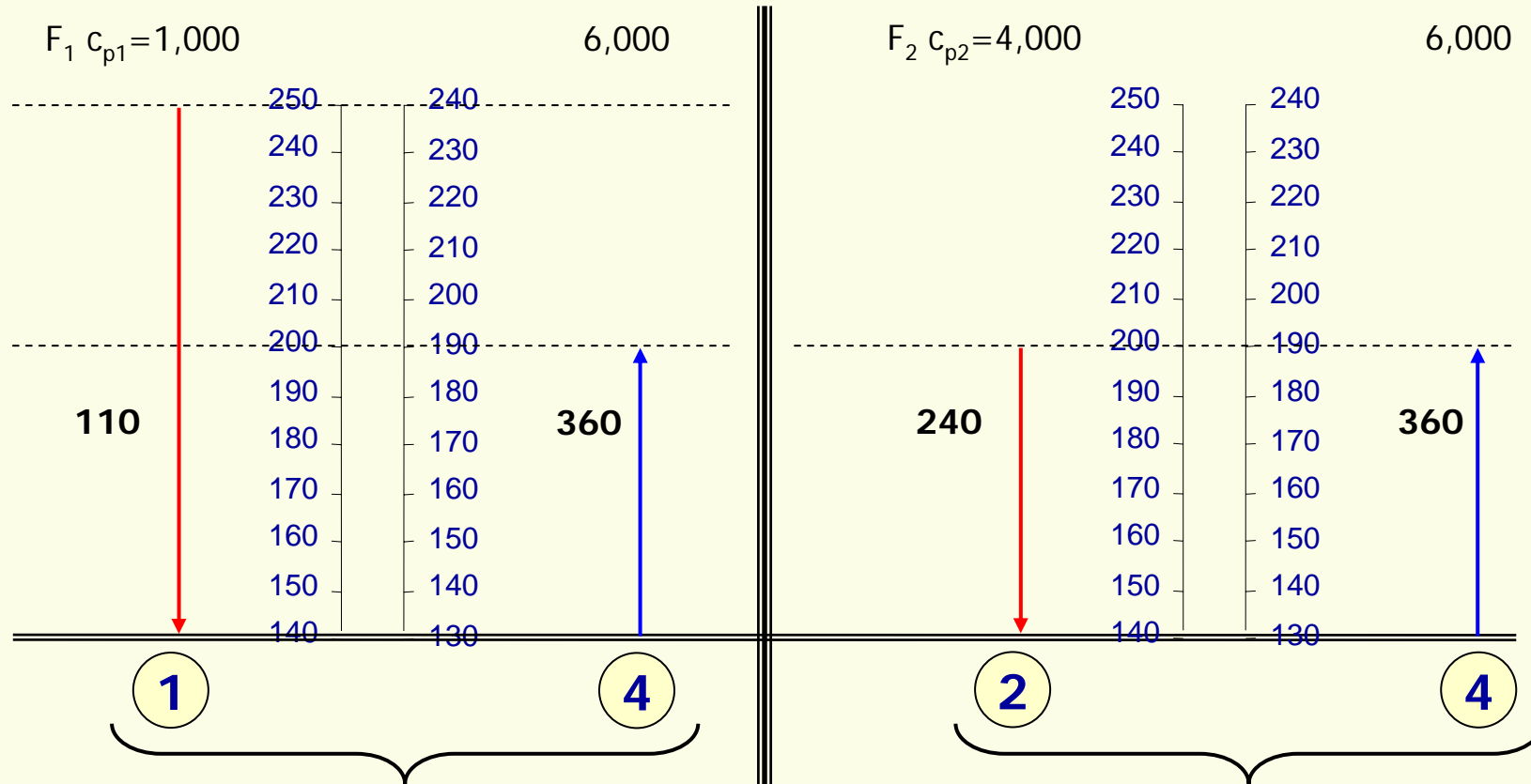
$$\rightarrow T_{2in} = 155 < T_{3out} + 10 = 150 + 10 = 160$$

L'accoppiamento **NON** è **FATTIBILE**



Accoppiamento tra le correnti sopra il PINCH

$$F_H C_{pH} \leq F_C C_{pC}$$



In realtà: $Q_{\text{eff}} = 110,000 = 1,000(T_{1\text{in}} - 140)$

$T_{1\text{in}} = 250 > T_{4\text{out}} + 10$ infatti $T_{4\text{out}}$:

$$110,000 = 6,000(T_{4\text{out}} - 130) \rightarrow T_{4\text{out}} = 148.333$$

L'accoppiamento è **FATTIBILE**

In realtà: $Q_{\text{eff}} = 240,000 = 4,000(T_{2\text{in}} - 140)$

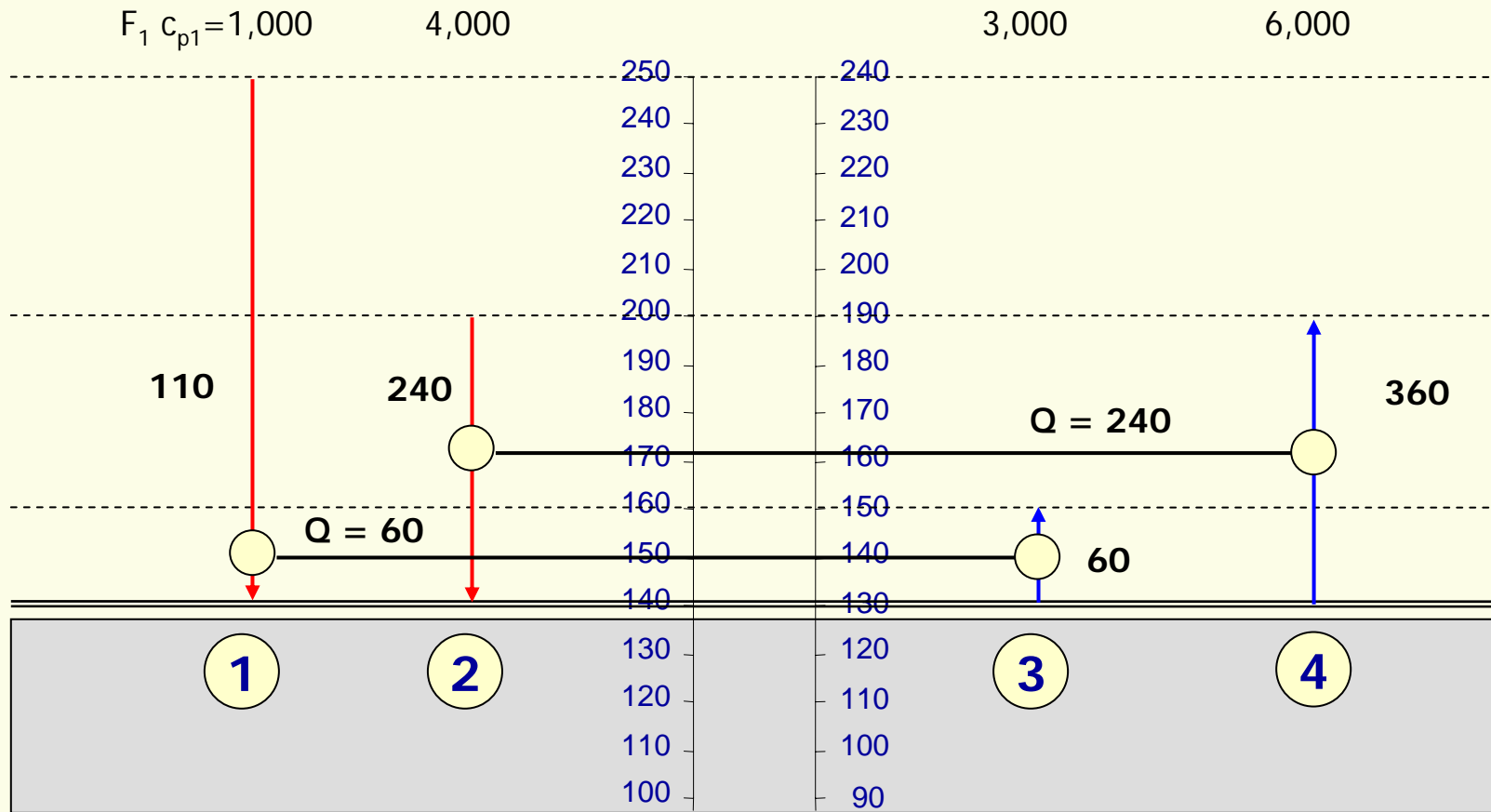
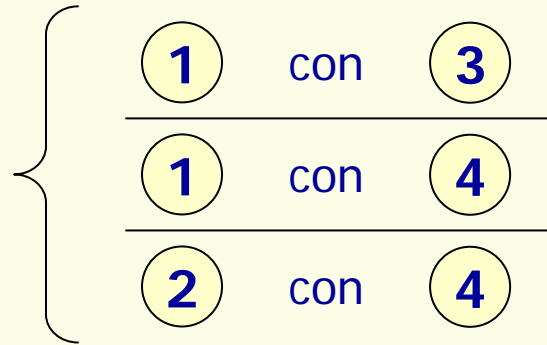
$T_{2\text{in}} = 200 > T_{4\text{out}} + 10$ infatti $T_{4\text{out}}$:

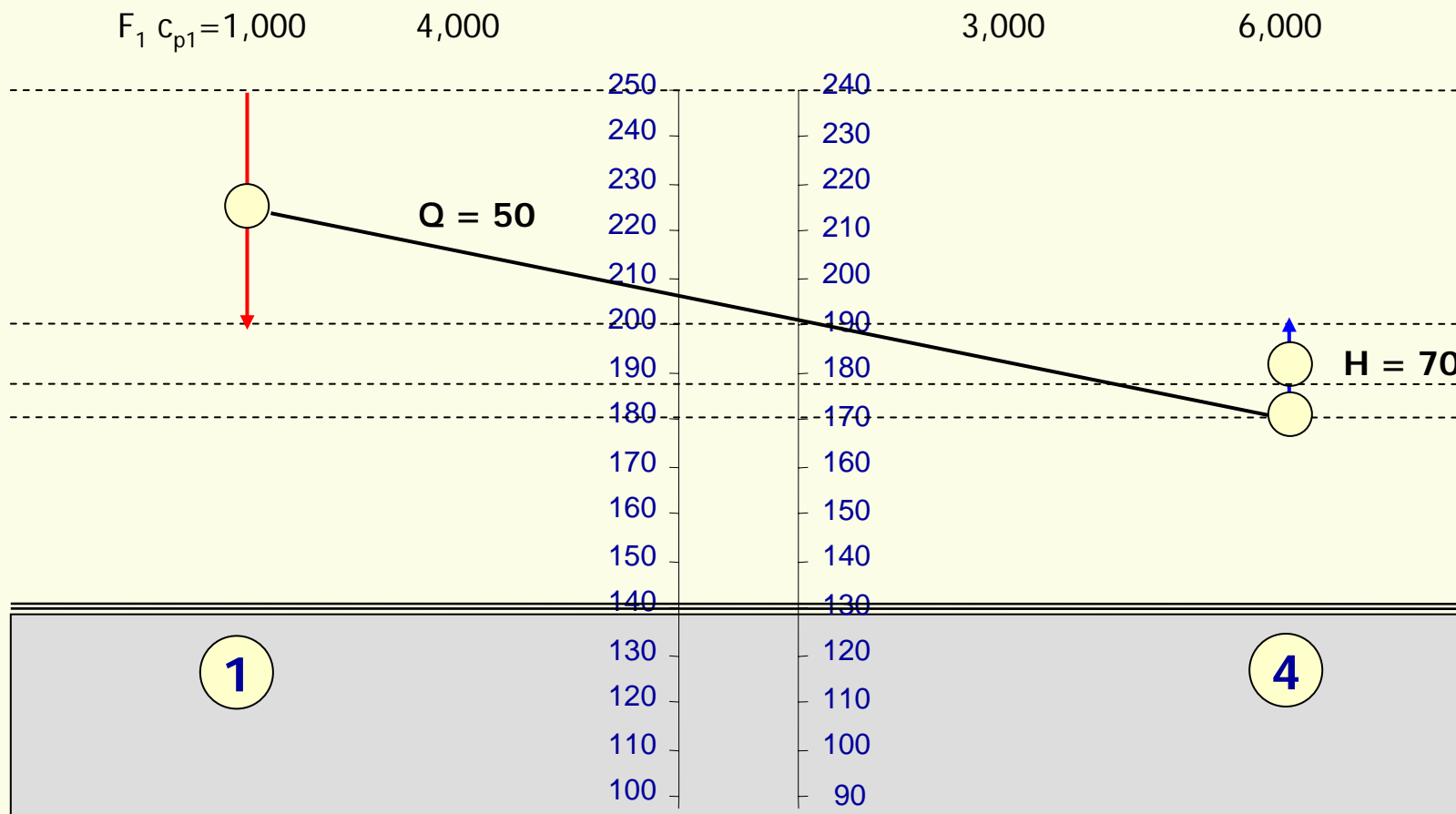
$$240,000 = 6,000(T_{4\text{out}} - 130) \rightarrow T_{4\text{out}} = 170$$

L'accoppiamento è **FATTIBILE**



Possibili accoppiamenti

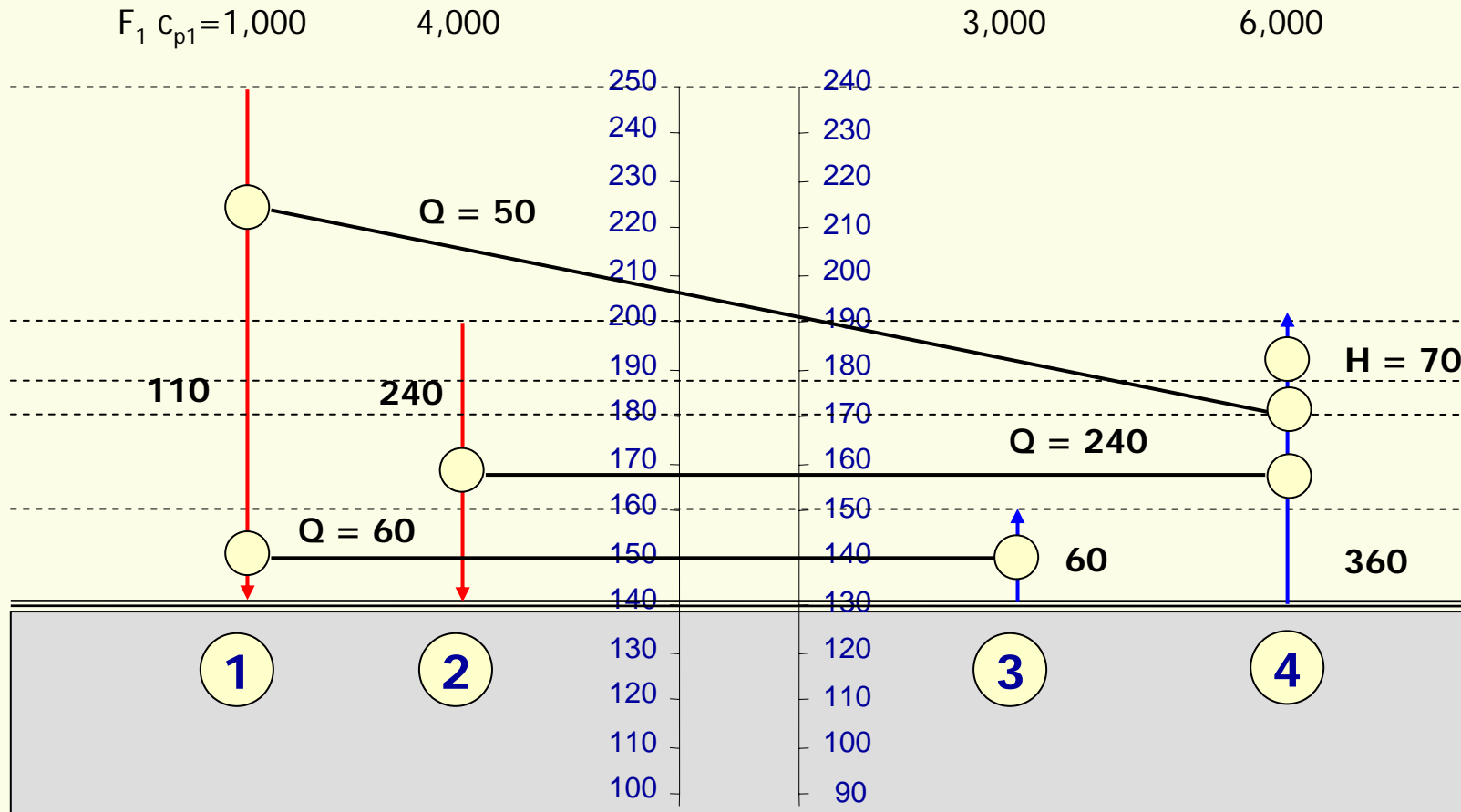




- La 1 con la 3: $Q = 60,000 = 1,000(T_{1in} - 140) \rightarrow T_{1in} = 200$ (scambiatore 1 con 3)
- Restano nella 1: $110 - 60 = 50$ $Q = 50,000 = 1,000(T_{1in} - 200) \rightarrow T_{1in} = 250$ (scambiatore 1 con 4)
- La 4 con la 2: $Q = 240,000 = 6,000(T_{4out} - 130) \rightarrow T_{4in} = 170$ (scambiatore 1 con 4)
- La 4 con la 1: $Q = 50,000 = 6,000(T_{4out} - 170) \rightarrow T_{4out} = 178.333$ (scambiatore 1 con 4)
- Alla 4 mancano ancora: $360 - 240 - 50 = 70$ da ottenere tramite utility calda



Riassumendo sopra il PINCH abbiamo:



Accoppiamento tra le correnti sotto il PINCH

$$F_H C_{pH} \geq F_C C_{pC}$$

Il massimo calore scambiabile è 20

$$Q = 20,000 = 3,000(130 - T_{3 \text{ in}})$$

$$\rightarrow T_{3 \text{ in}} = 123.333 \text{ mentre } T_{1 \text{ out}} = 120$$

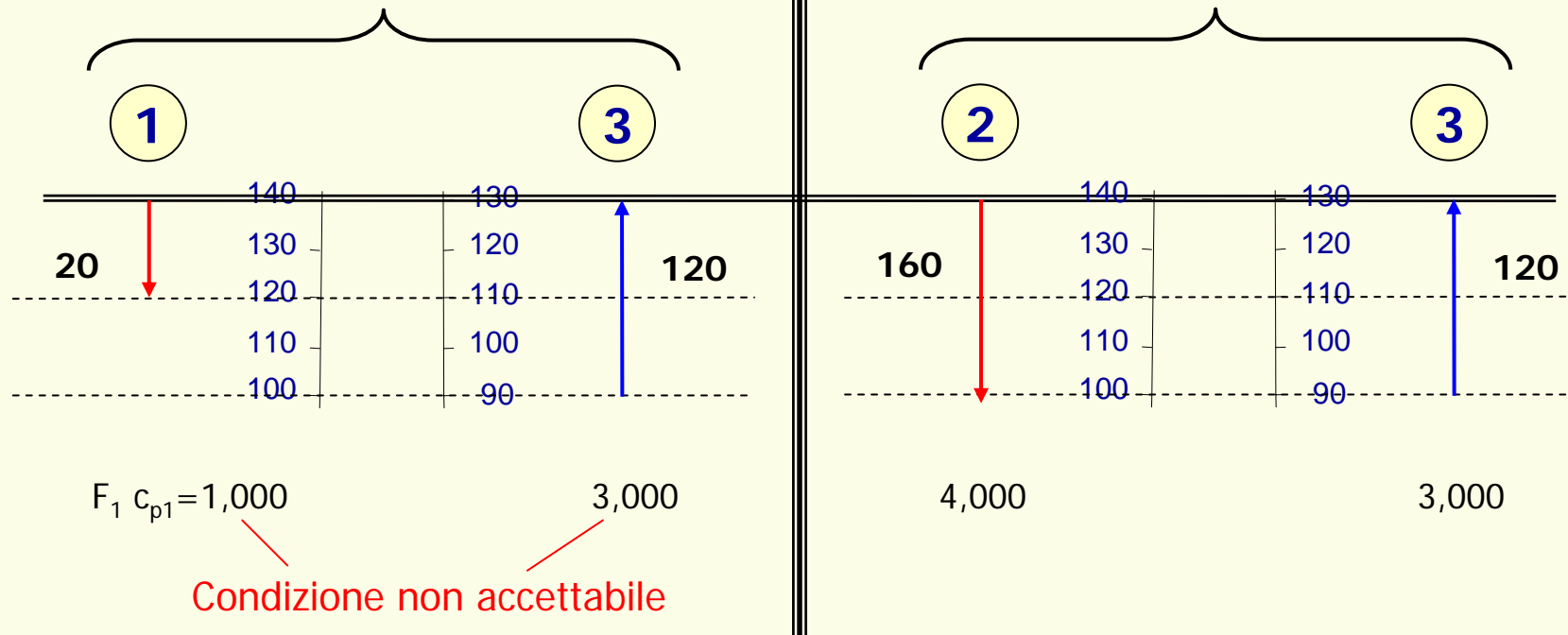
L'accoppiamento **NON** è **FATTIBILE**

Il massimo calore scambiabile è 120

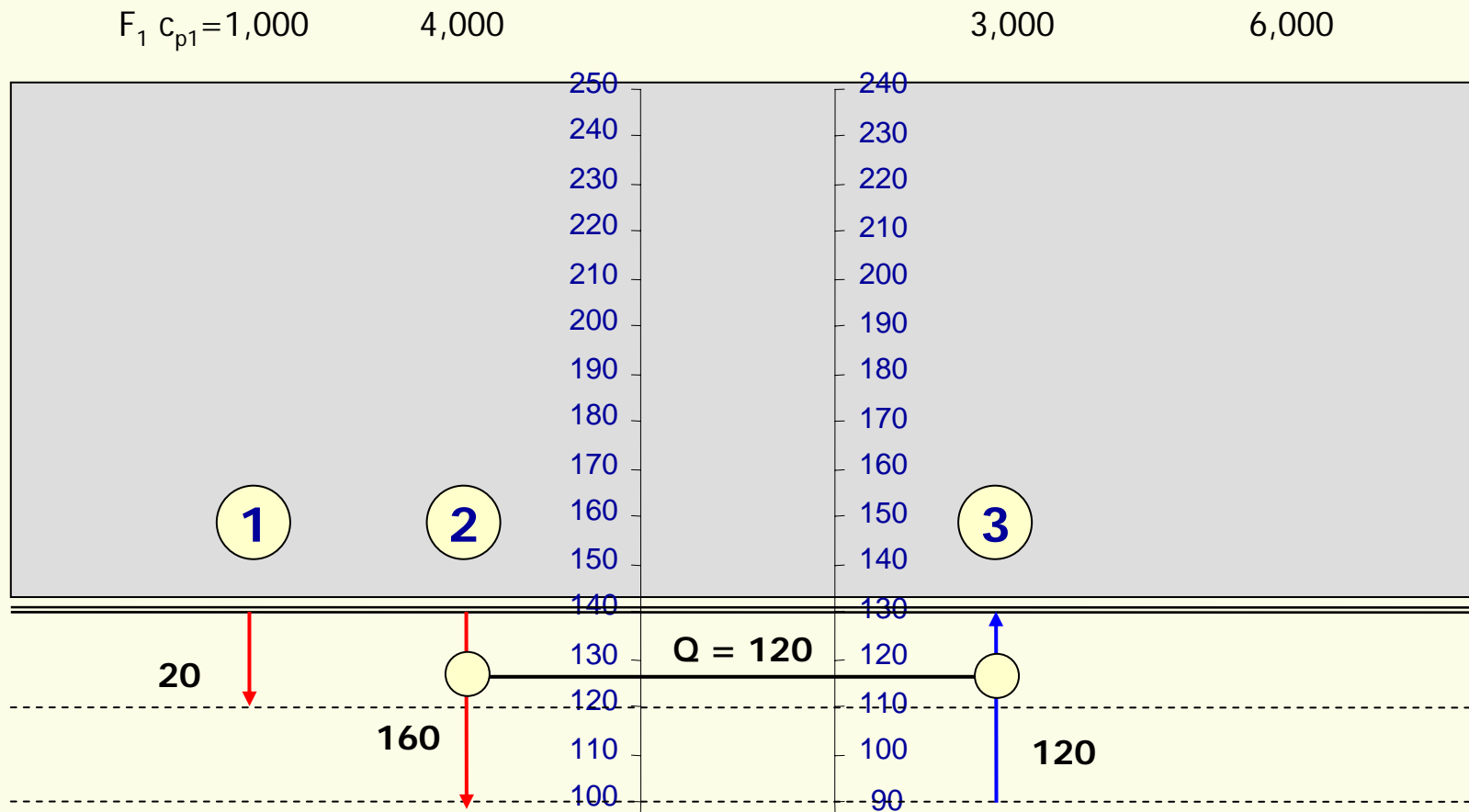
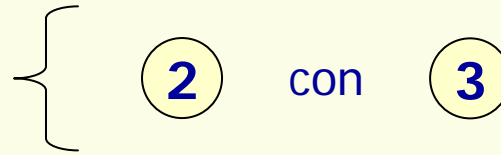
$$Q_3 = 120,000 = 3,000(130 - T_{3 \text{ in}}) \rightarrow T_{3 \text{ in}} = 90$$

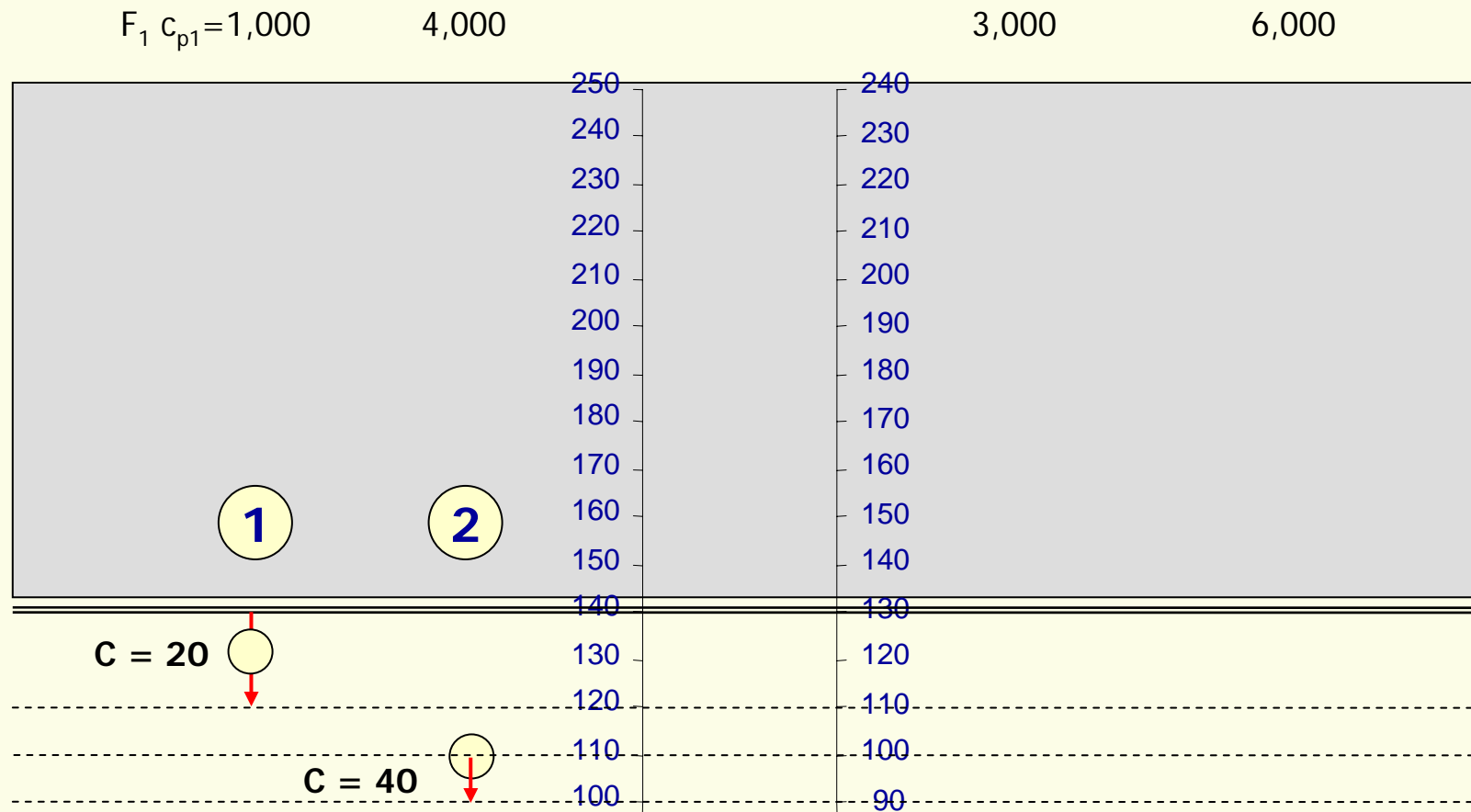
$$Q_2 = 120,000 = 4,000(140 - T_{2 \text{ out}}) \rightarrow T_{2 \text{ out}} = 110$$

L'accoppiamento è **FATTIBILE**



Possibile accoppiamento

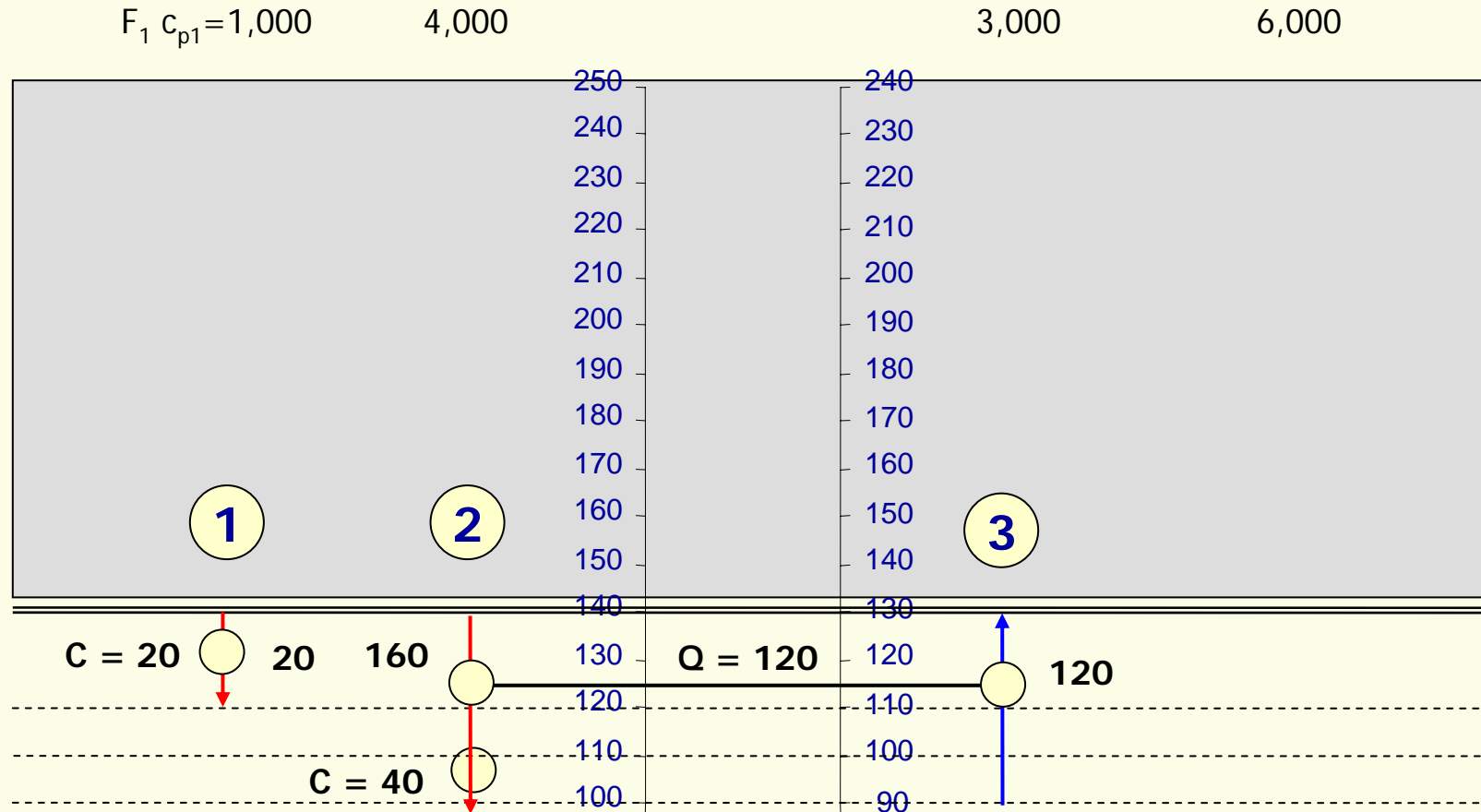




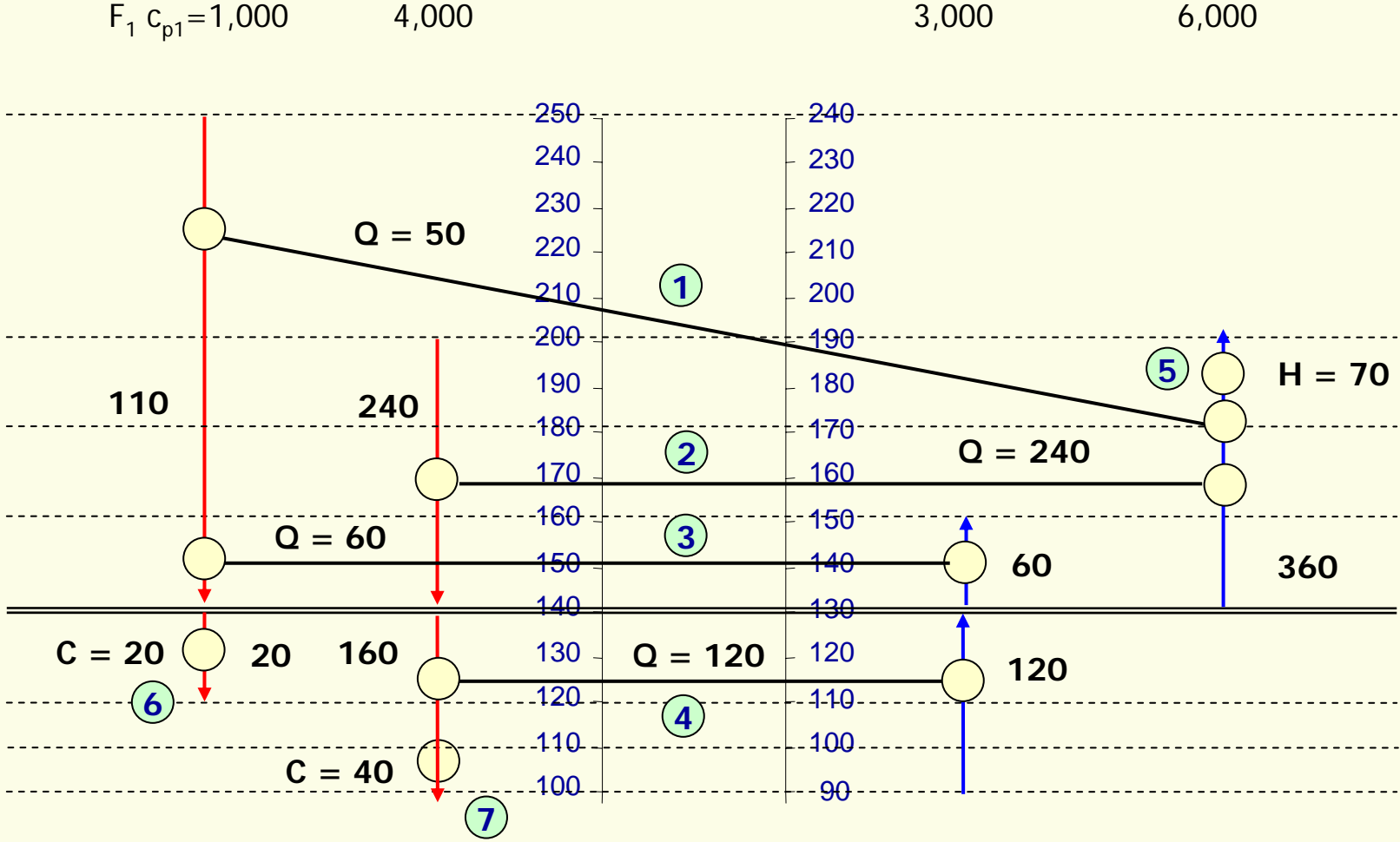
- La 2 con la 3: $Q = 120,000 = 4,000(140 - T_{2\text{ out}}) \rightarrow T_{2\text{ out}} = 110$ (scambiatore 2 con 3)
- Restano nella 2: $160 - 120 = 40$ $Q = 40,000 = 4,000(110 - T_{2\text{ out}}) \rightarrow T_{2\text{ out}} = 100$ (tramite utility fredda)
- La 1 viene raffreddata tramite utility fredda



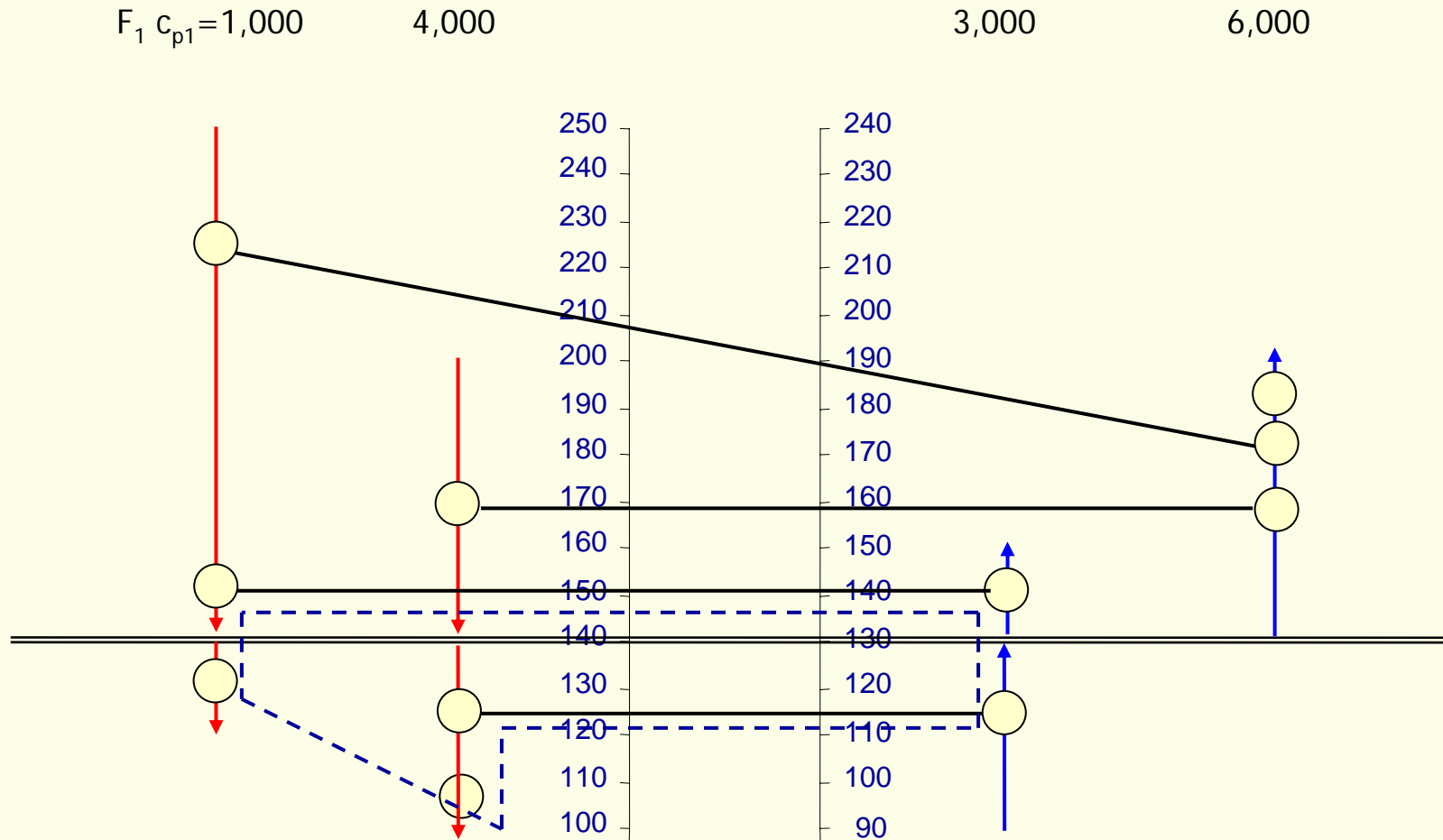
Riassumendo sotto il PINCH abbiamo:



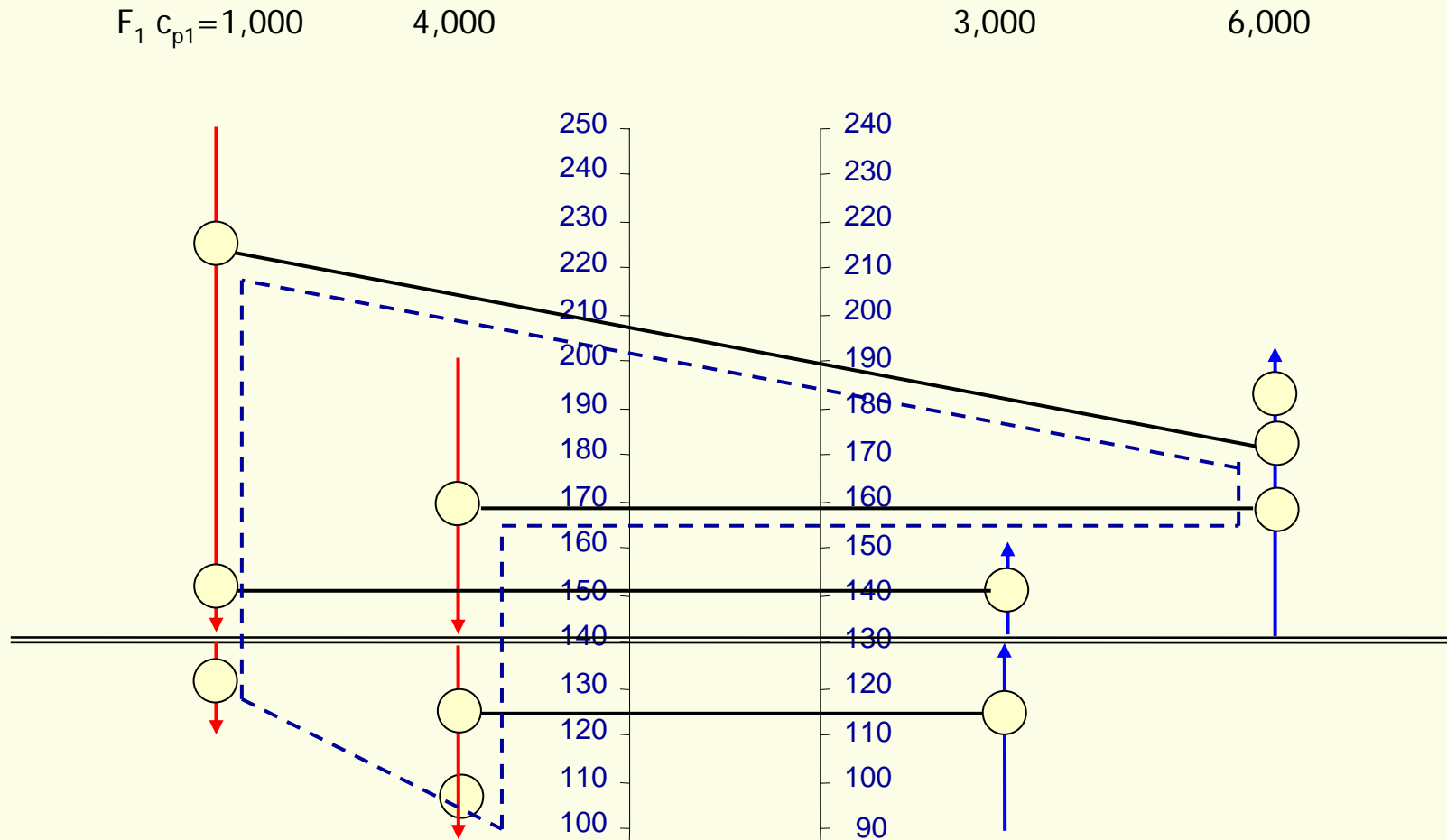
In totale il progetto con la minima richiesta di energia risulta...



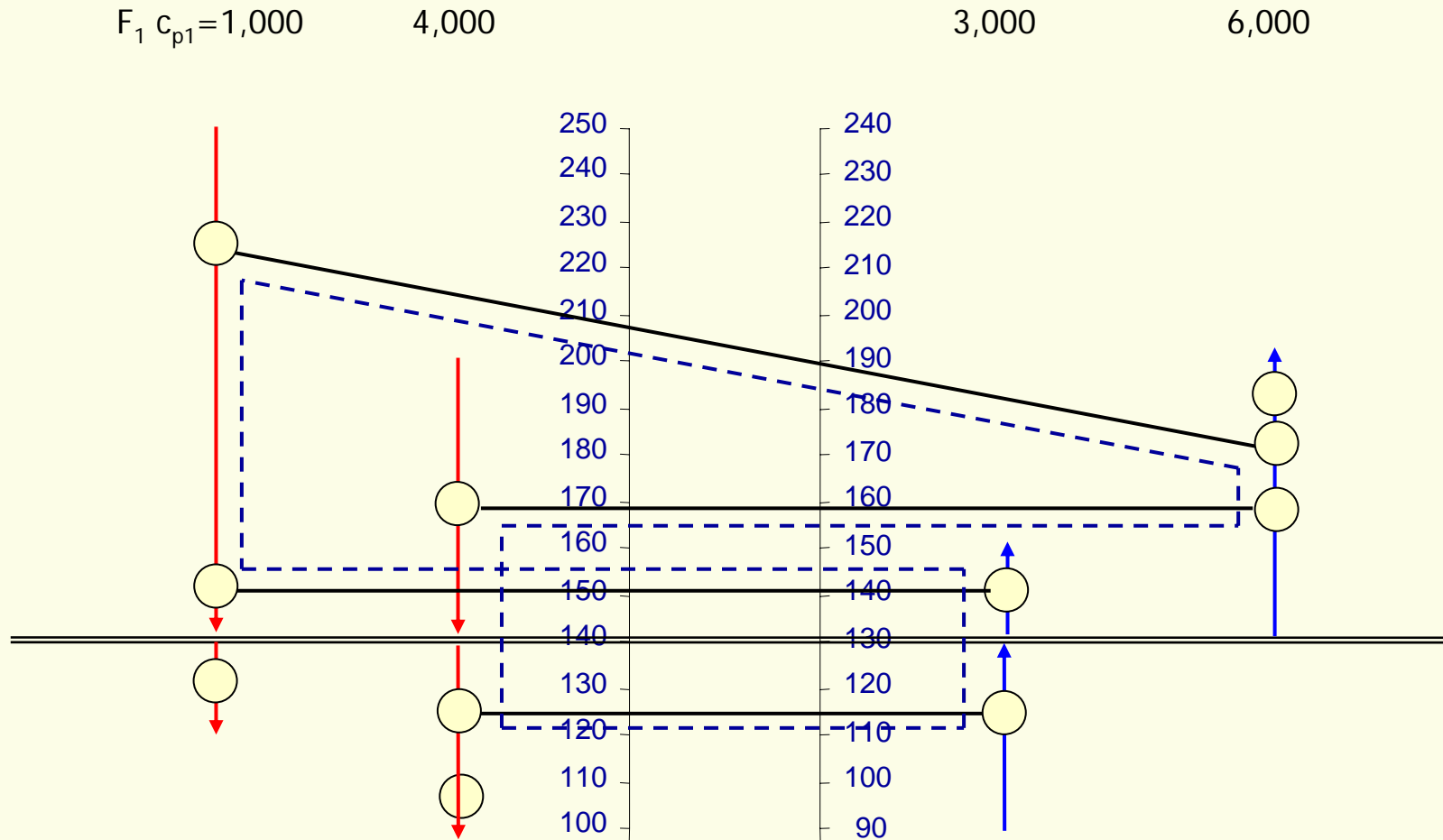
Primo loop

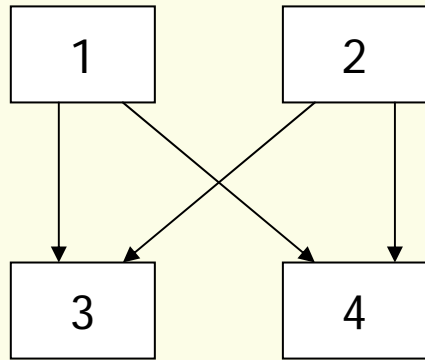


Secondo loop

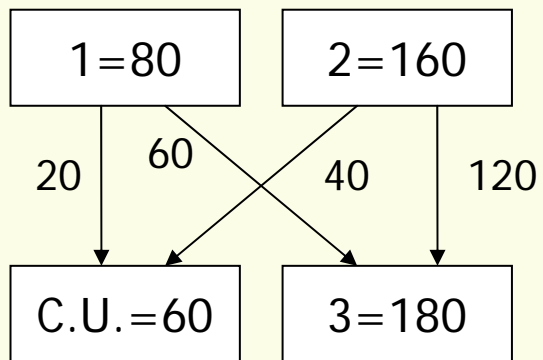
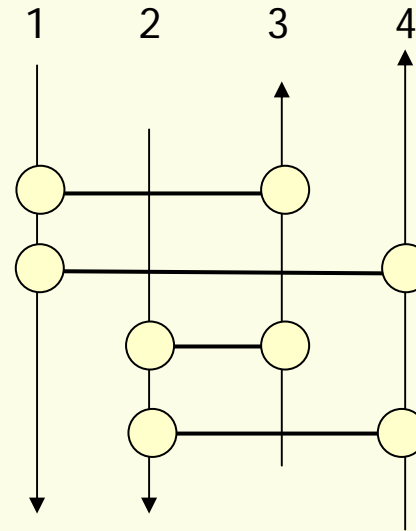
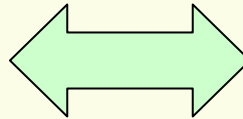


Terzo loop

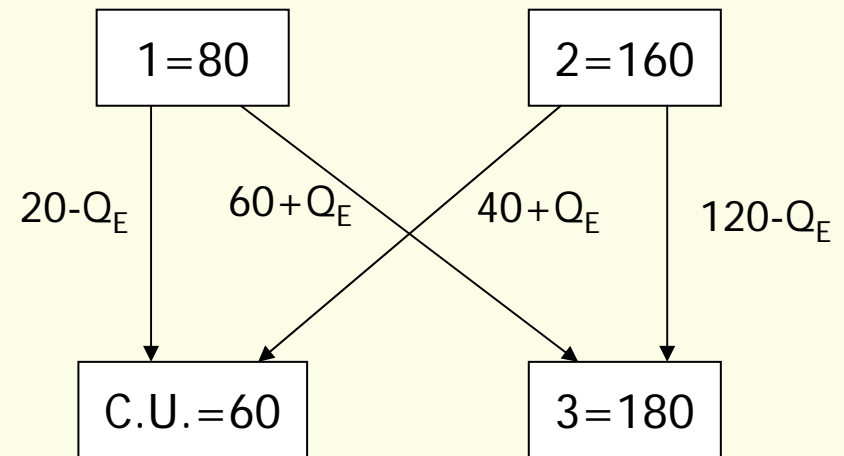
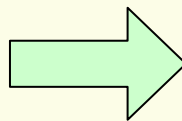


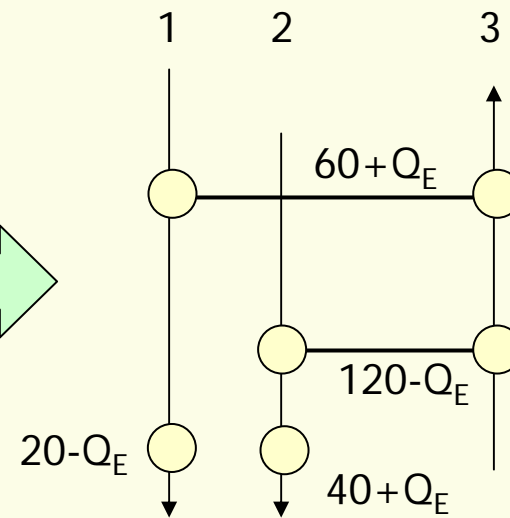
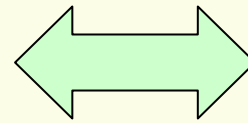
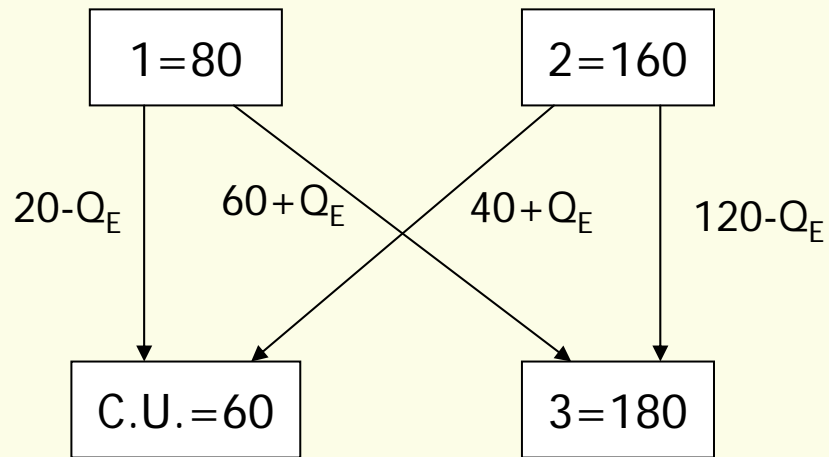


Esempio di loop

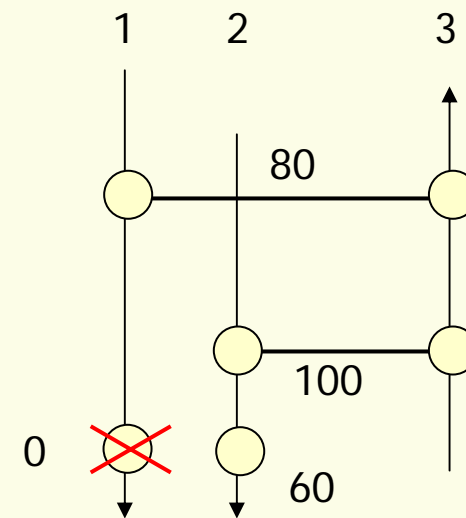
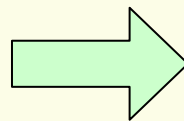


C.U. = Cold Utility

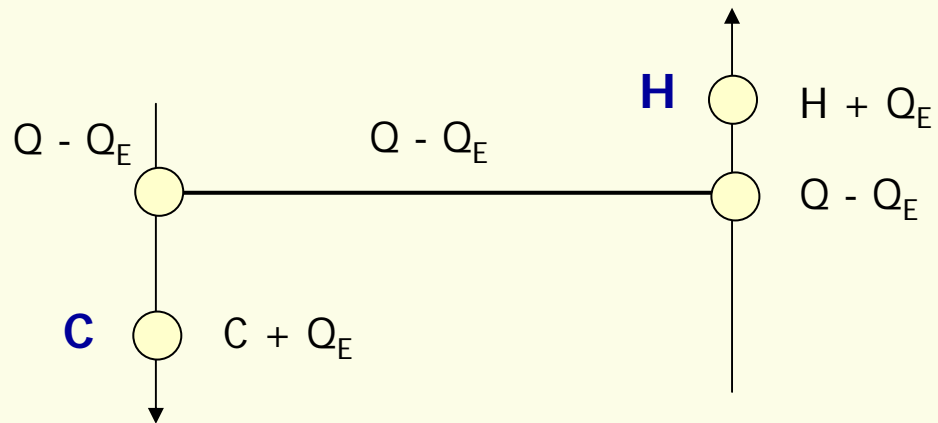
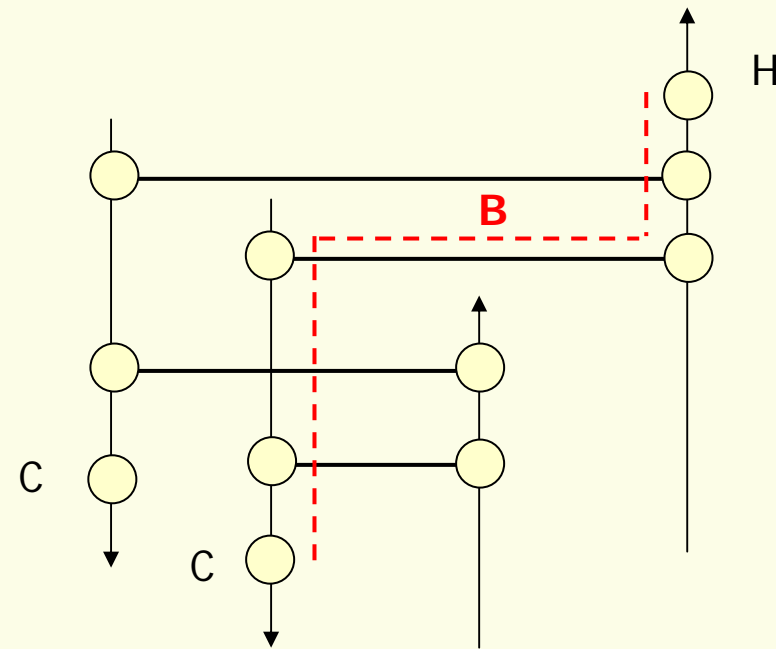
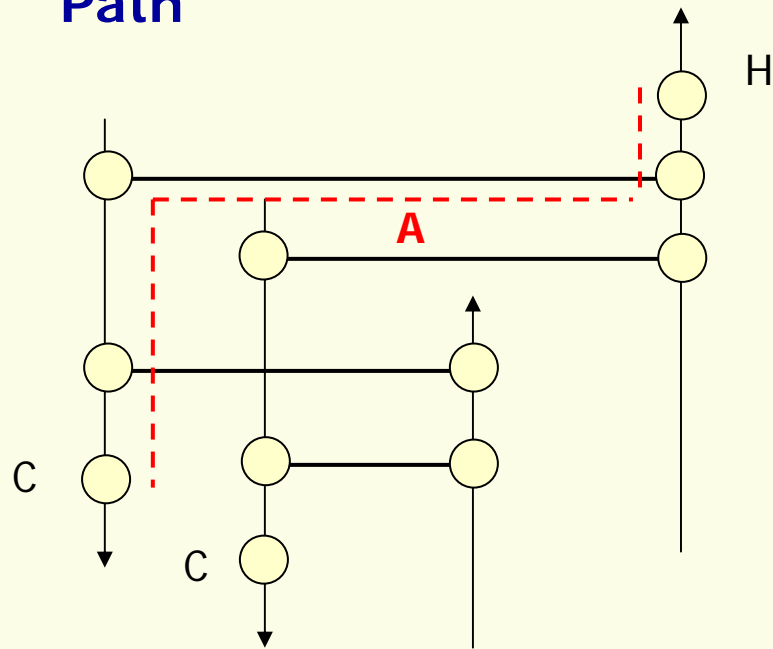




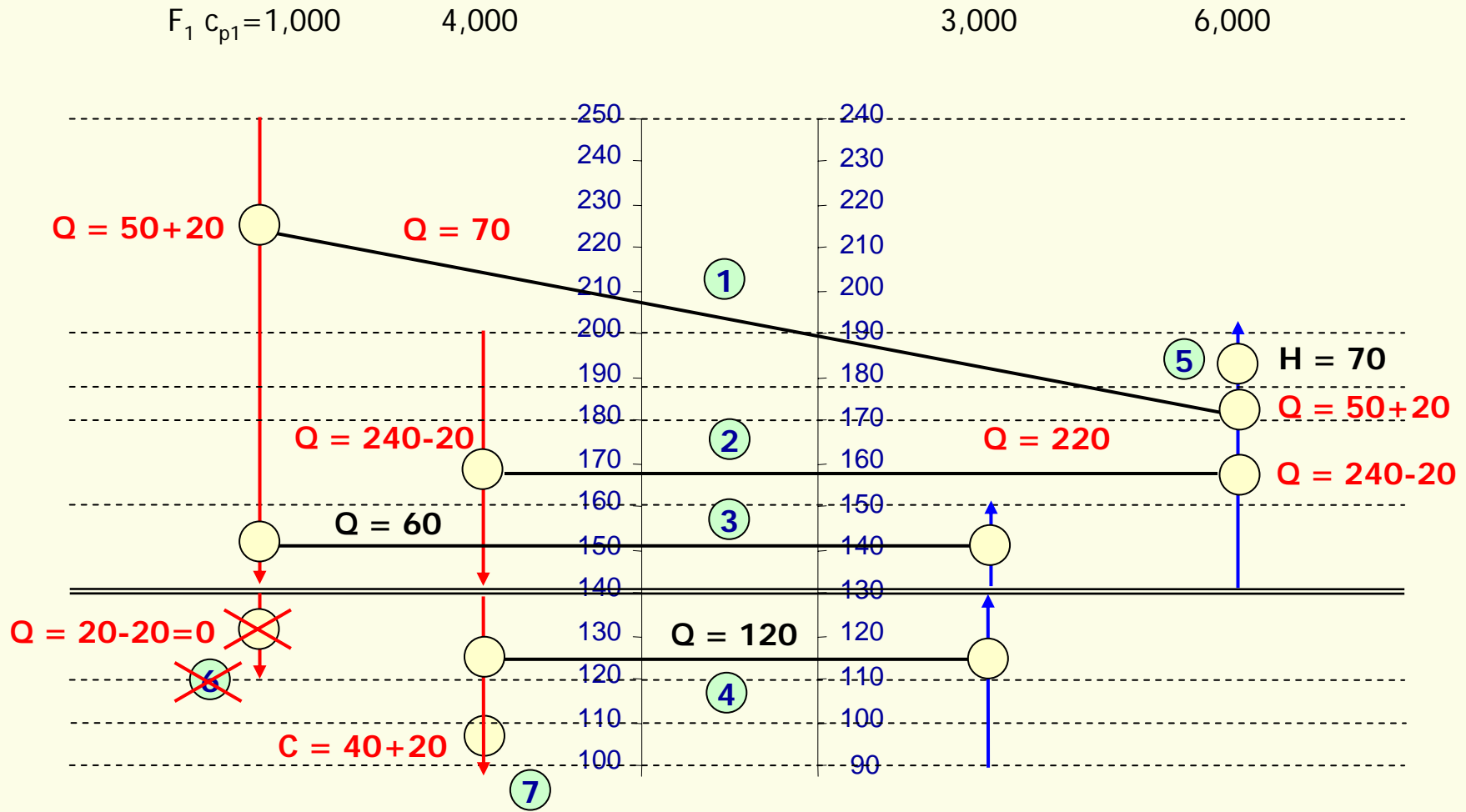
Ma se pongo $Q_E = 20...$

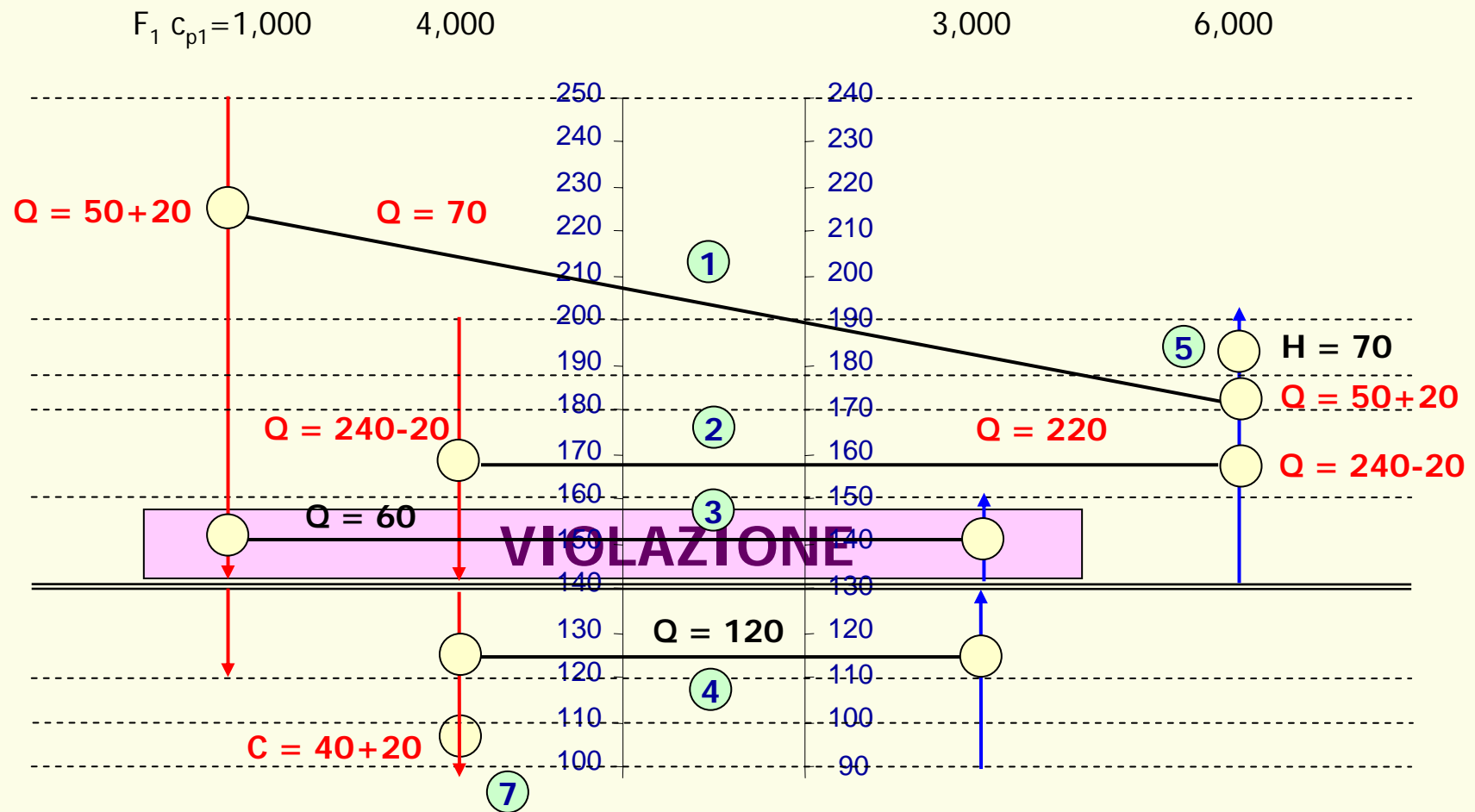


Path



Riduzione del numero di scambiatori

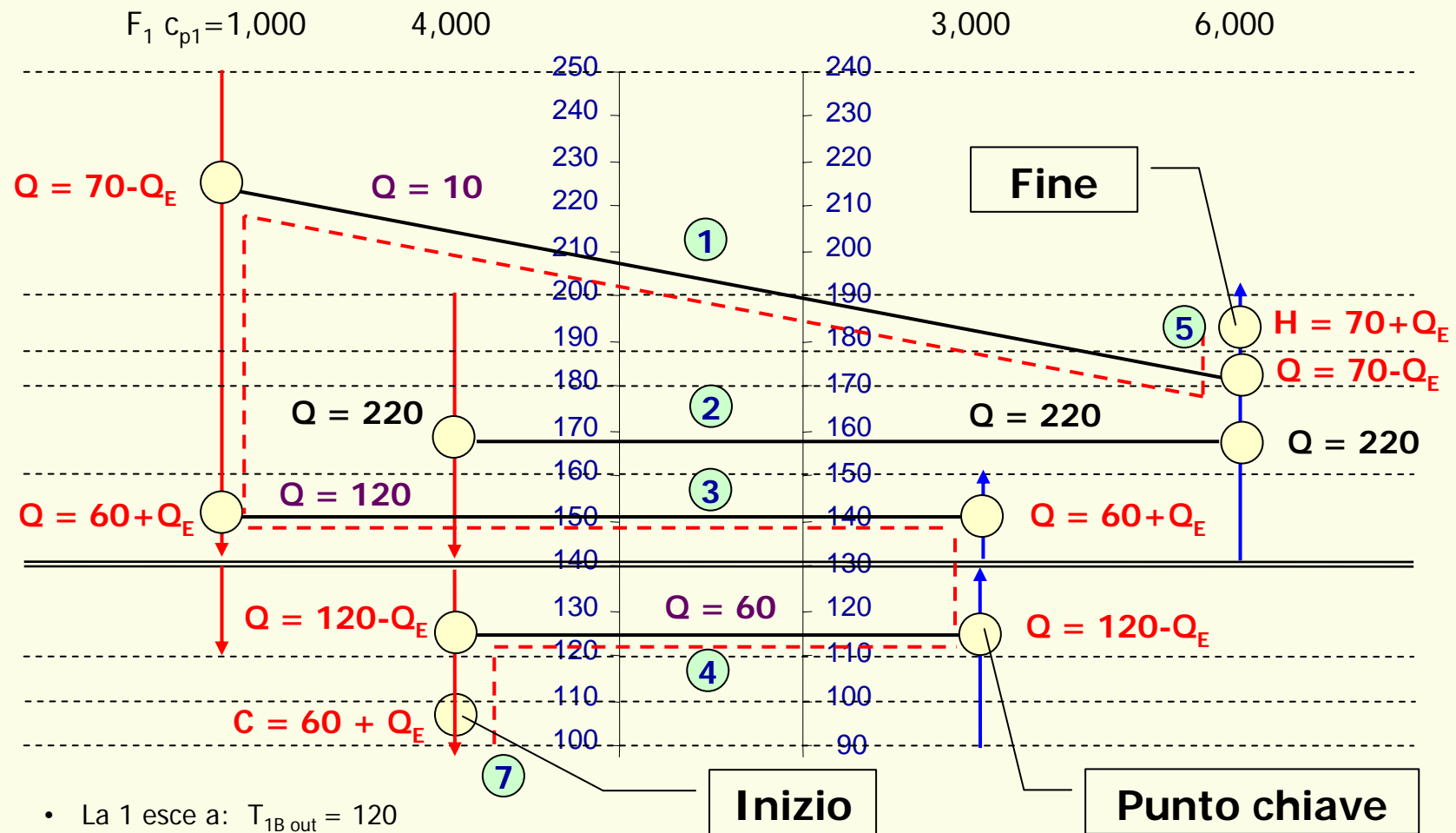




- La 1 esce dopo lo scambiatore (1) a: $70,000 = 1,000(250 - T_{1A\ out}) \rightarrow T_{1A\ out} = 180$
- La 1 esce dopo lo scambiatore (3) a: $60,000 = 1,000(180 - T_{1B\ out}) \rightarrow T_{1B\ out} = 120$
- La 3 entra nello scambiatore (3) a: $T_{3\ in} = 130$
- Allora esiste **VIOLAZIONE**



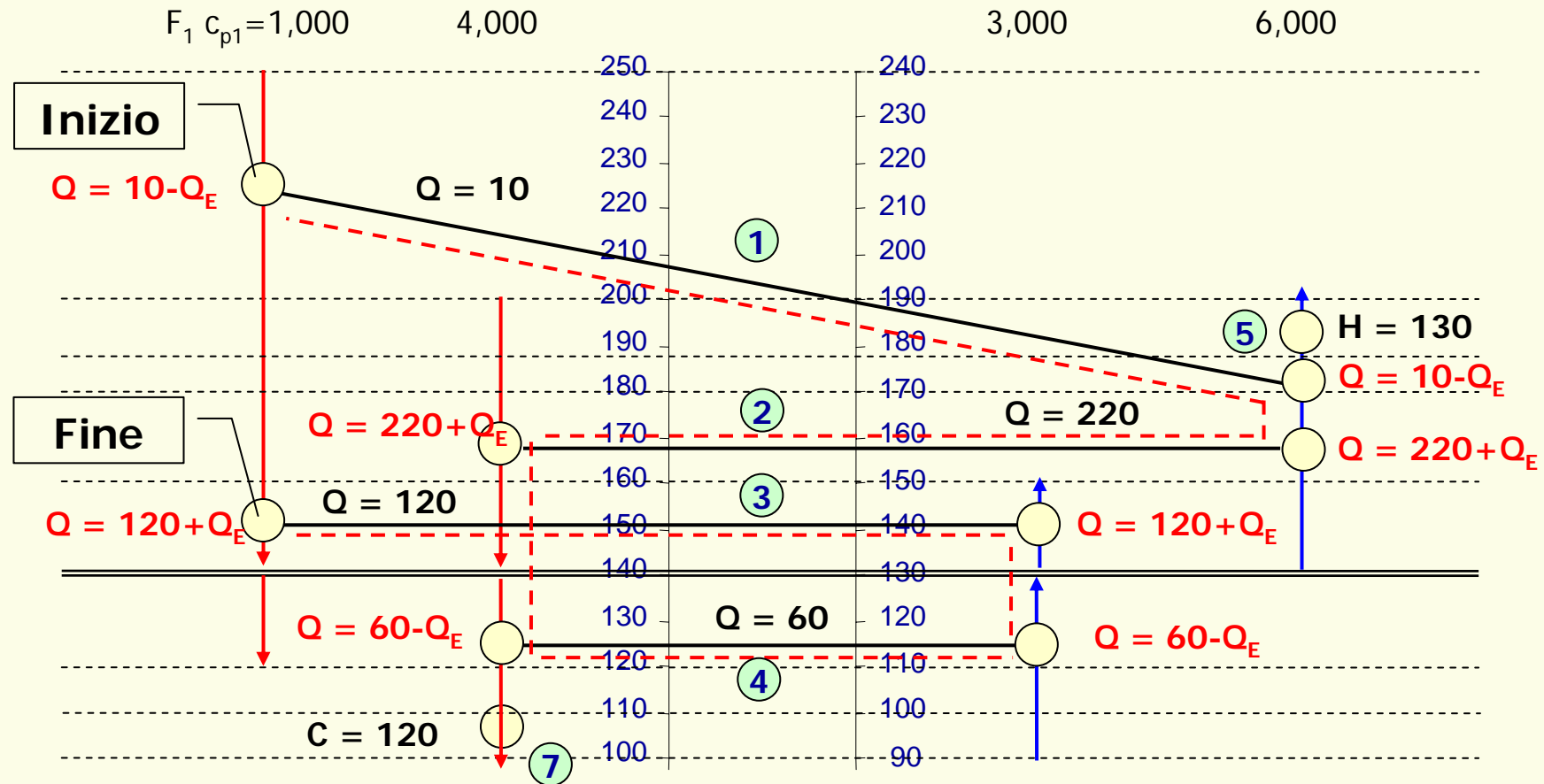
Per ripristinare il rispetto del ΔT_{\min} spostato Q_E lungo un path...



- La 1 esce a: $T_{1B \text{ out}} = 120$
- La 3 DEVE quindi entrare al massimo in (3) a: $T_{3B \text{ in}} = 110$
- Quindi corrispondentemente la $T_{3A \text{ out}} = 110$
- Allora dobbiamo avere: $120,000 - Q_E = 3,000(T_{3A \text{ out}} - T_{3A \text{ in}}) = 3,000(110 - 90) \rightarrow Q_E = 60,000$



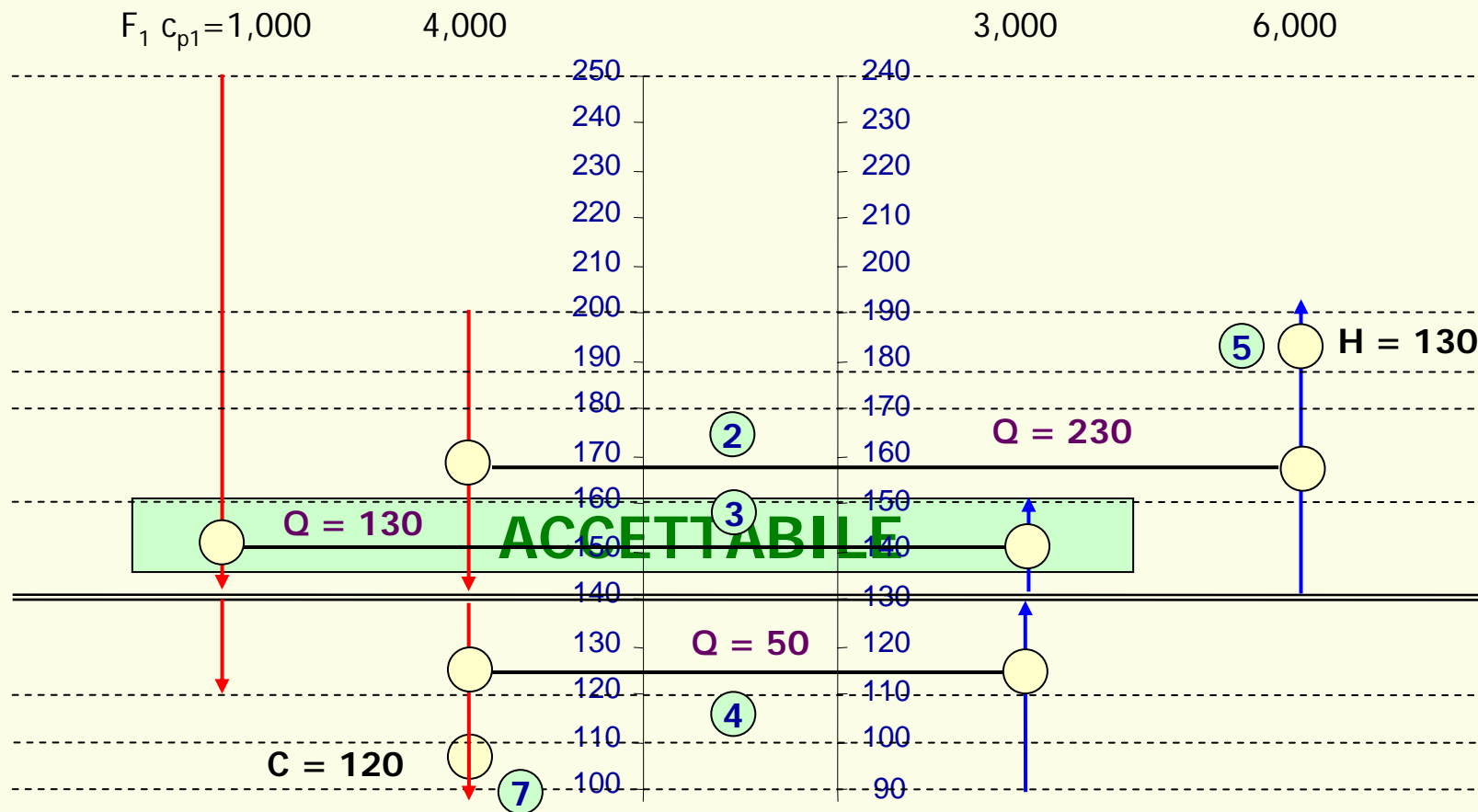
Resta da eliminare solo il terzo loop...



- La minima richiesta di calore da sottrarre è: $Q_E = 10$ (focalizzo l'attenzione sul loop)
- Verifico che non sia violato il ΔT_{\min} anche in questo caso sono infatti a CAVALLO del PINCH
- A livello di scambiatore (3) $T_{1out} = 120$ mentre $Q_3 = 120 + Q_E = 120 + 10 = 130$
- $130,000 = 3,000(150 - T_{3B in}) \rightarrow T_{3B in} = 106.666$ Il $\Delta T = 120 - 106.666 > 10$ **NON esiste VIOLAZIONE**



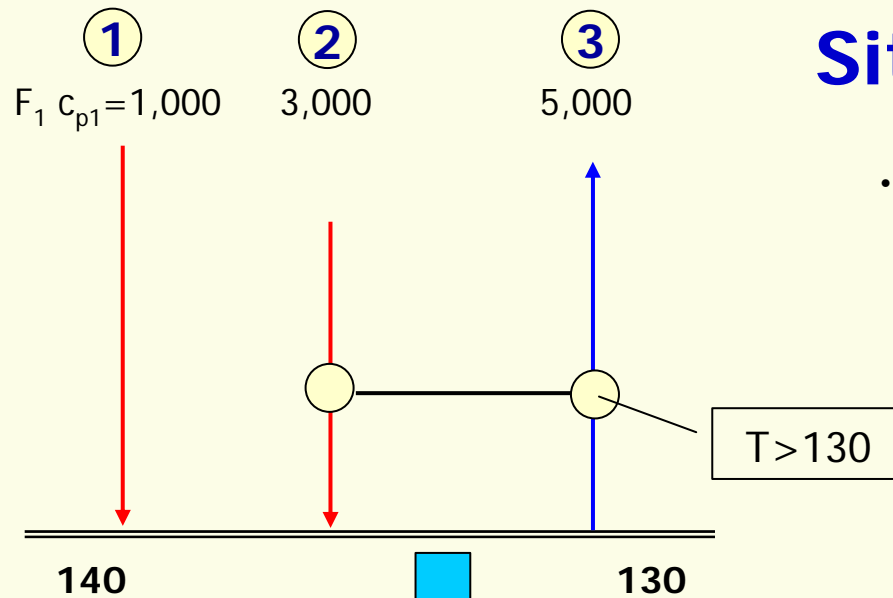
Alla fine ottengo il minimo numero di scambiatori di calore...



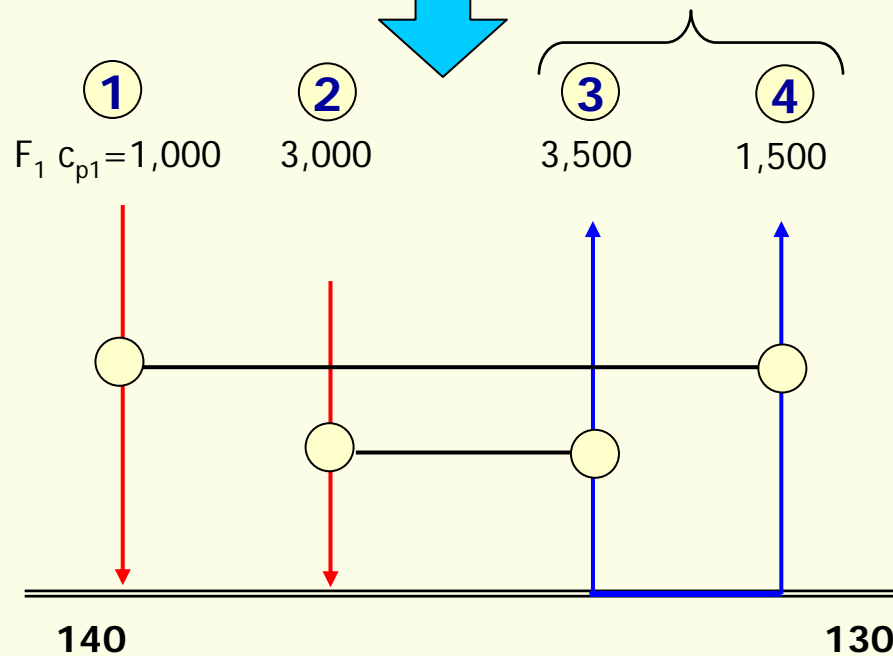
- Il $\Delta T = 120 - 106.666 > 10$ può essere ulteriormente ridotto giocando sul trasferimento di calore tramite path
- Restano solo 5 scambiatori: (2), (3), (4), (5) e (7)
- Si noti come la richiesta di scambio termico con le utility calde e fredde sia notevolmente aumentata ma al contempo la differenza complessiva tra **H** e **C** sia ancora uguale a: $130 - 120 = 10$



Situazioni particolari...



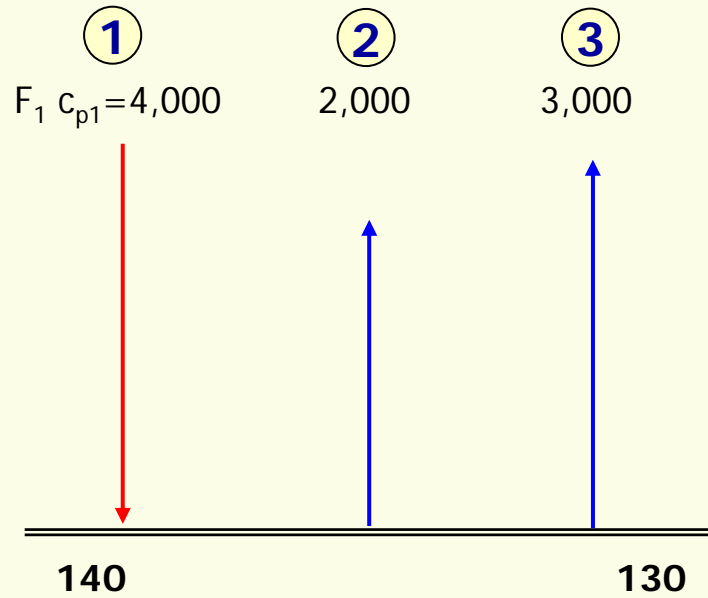
- $F_H C_{pH} < F_C C_{pC}$ per ogni corrente ma la (3) si scalda a $T > 130$ e l'introduzione di uno scambiatore tra (1) e (3) non soddisferebbe più il $\Delta T = 10$ con la $T_{1\text{ out}} = 140$



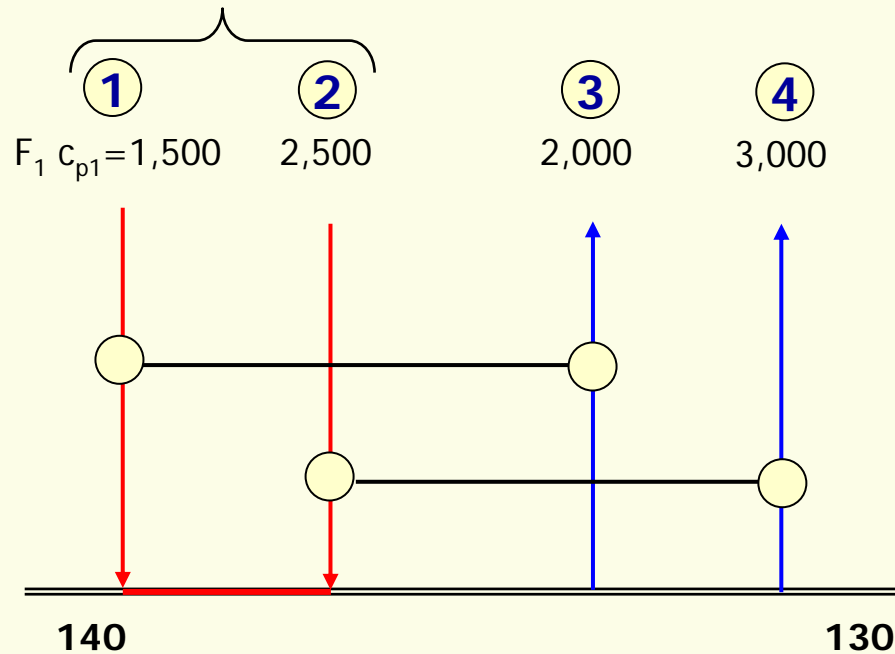
- Si ha ancora $F_H C_{pH} < F_C C_{pC}$ per ogni corrente, ma ora la (4) con $T_{4\text{ in}} = 130$ soddisfa il $\Delta T = 10$ rispetto alla $T_{1\text{ out}} = 140$



Altri controesempi...



- **NON** è rispettata la condizione $F_H C_{pH} < F_C C_{pC}$

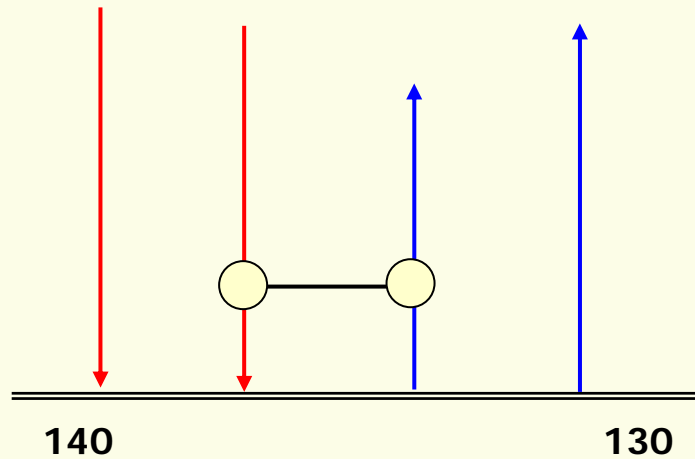


- Suddivido la (1) in due correnti andando a rispettare la condizione $F_H C_{pH} < F_C C_{pC}$
- accoppio la (1) con (3) e la (2) con (4)



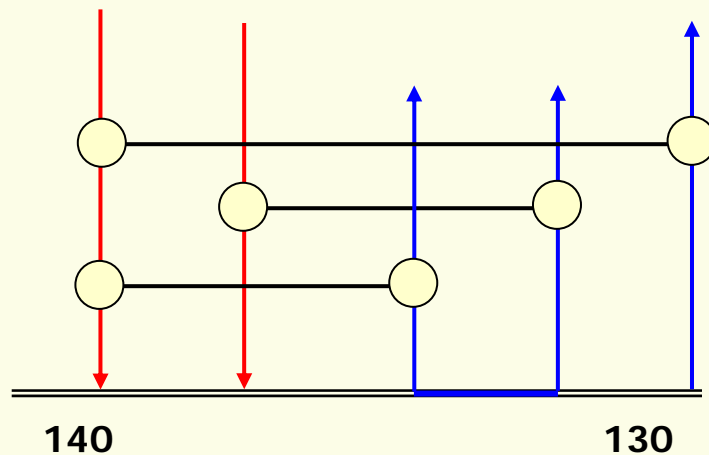
Apparente violazione ΔT_{\min}

① ② ③ ④
 $F_1 c_{p1} = 2,000$ 5,000 10,000 1,000



- **NON** è rispettata la condizione $F_H C_{pH} < F_C C_{pC}$ tra la (1) e la (4)
- Allora suddivido la (3)

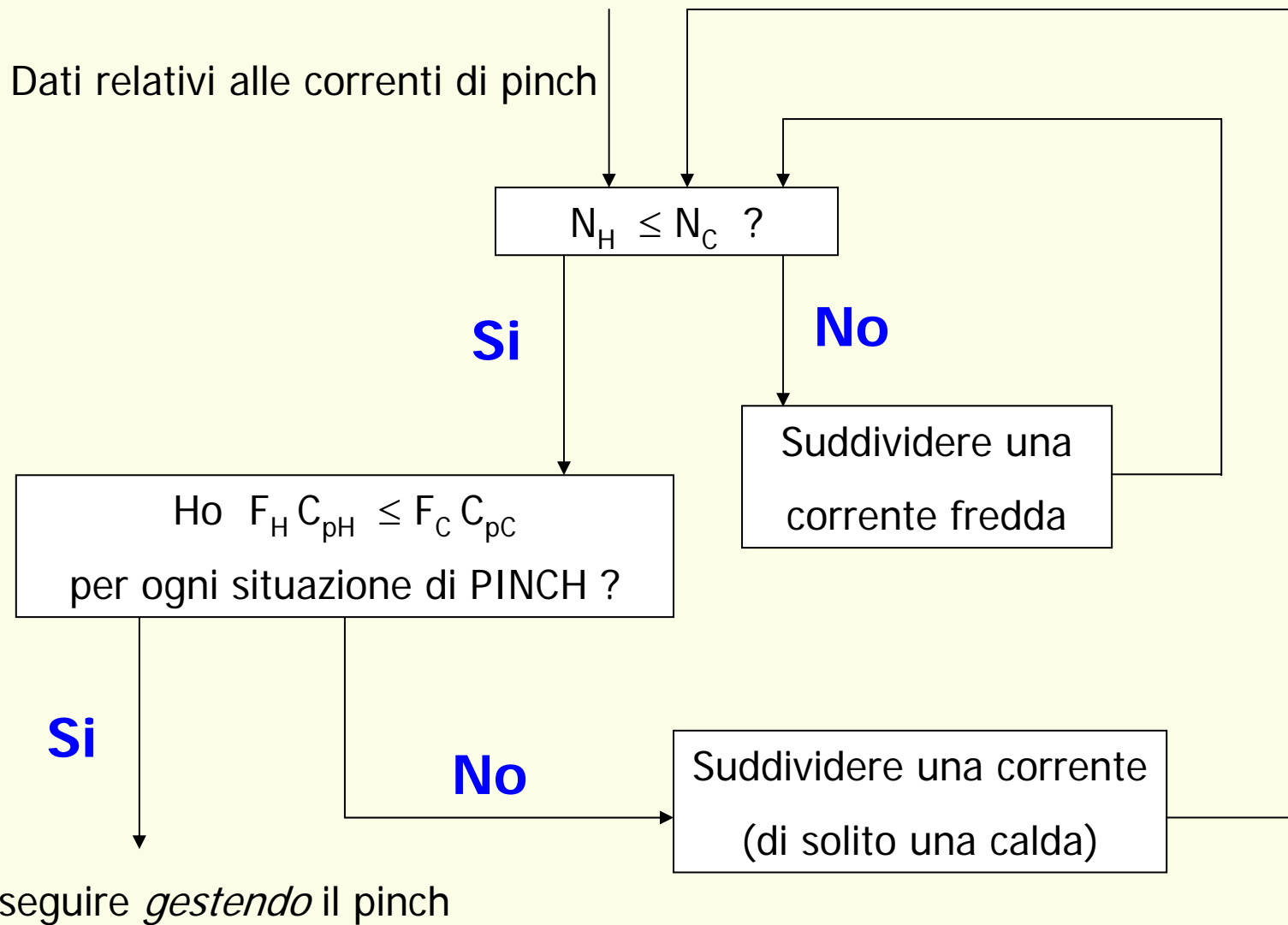
① ② ③ ④ ⑤
 $F_1 c_{p1} = 2,000$ 5,000 4,000 6,000 1,000



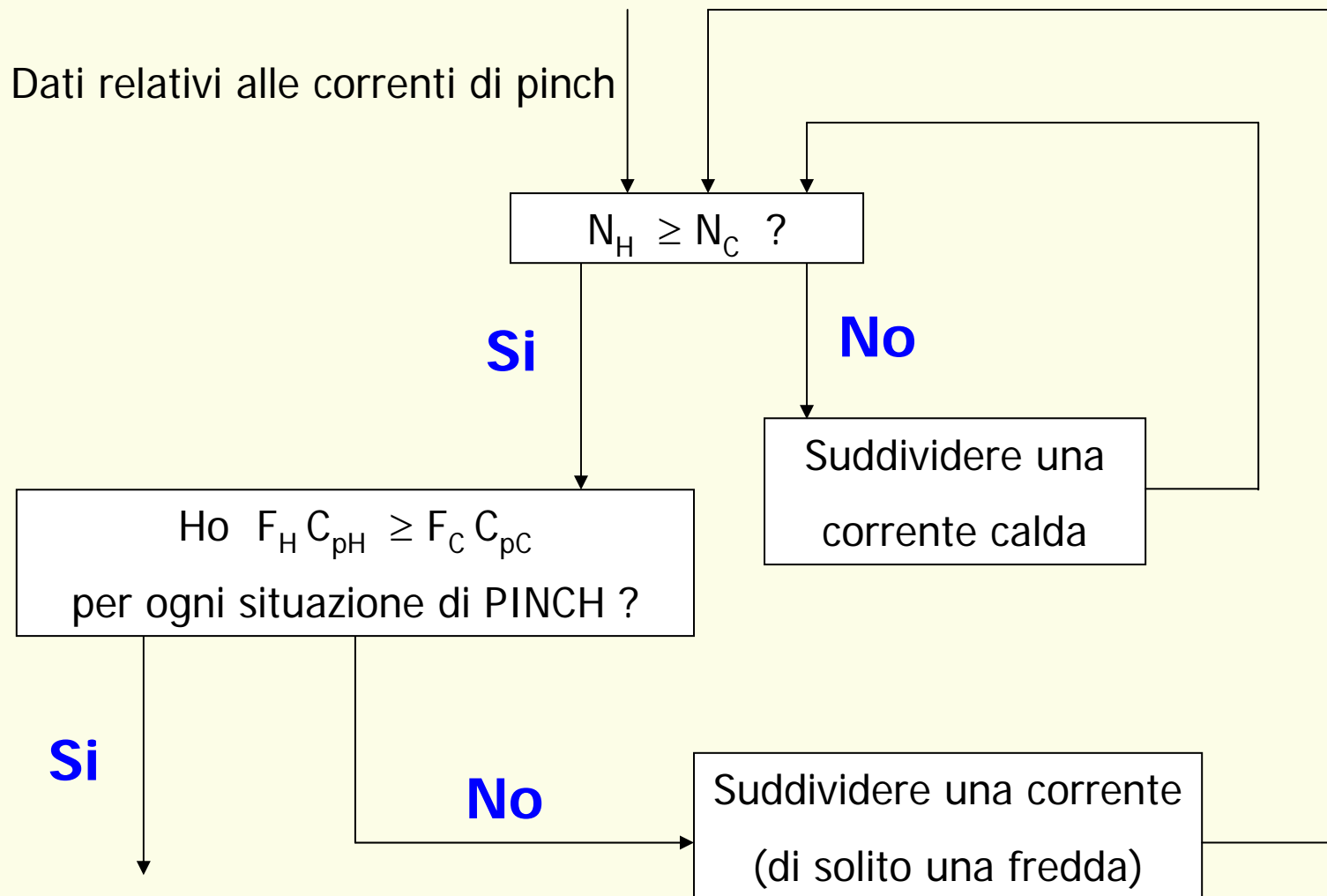
- Ora gli accoppiamenti (2) con (4) e (1) con (3) rispettano la condizione: $F_H C_{pH} < F_C C_{pC}$
- Al contrario l'accoppiamento (1) con (5) sembra non rispettare la condizione: $F_H C_{pH} < F_C C_{pC}$ ma dato che tramite il primo scambiatore tra (1) e (3) mi sono allontanato dal PINCH posso accettare la situazione: $F_H C_{pH} > F_C C_{pC}$



Sopra il PINCH



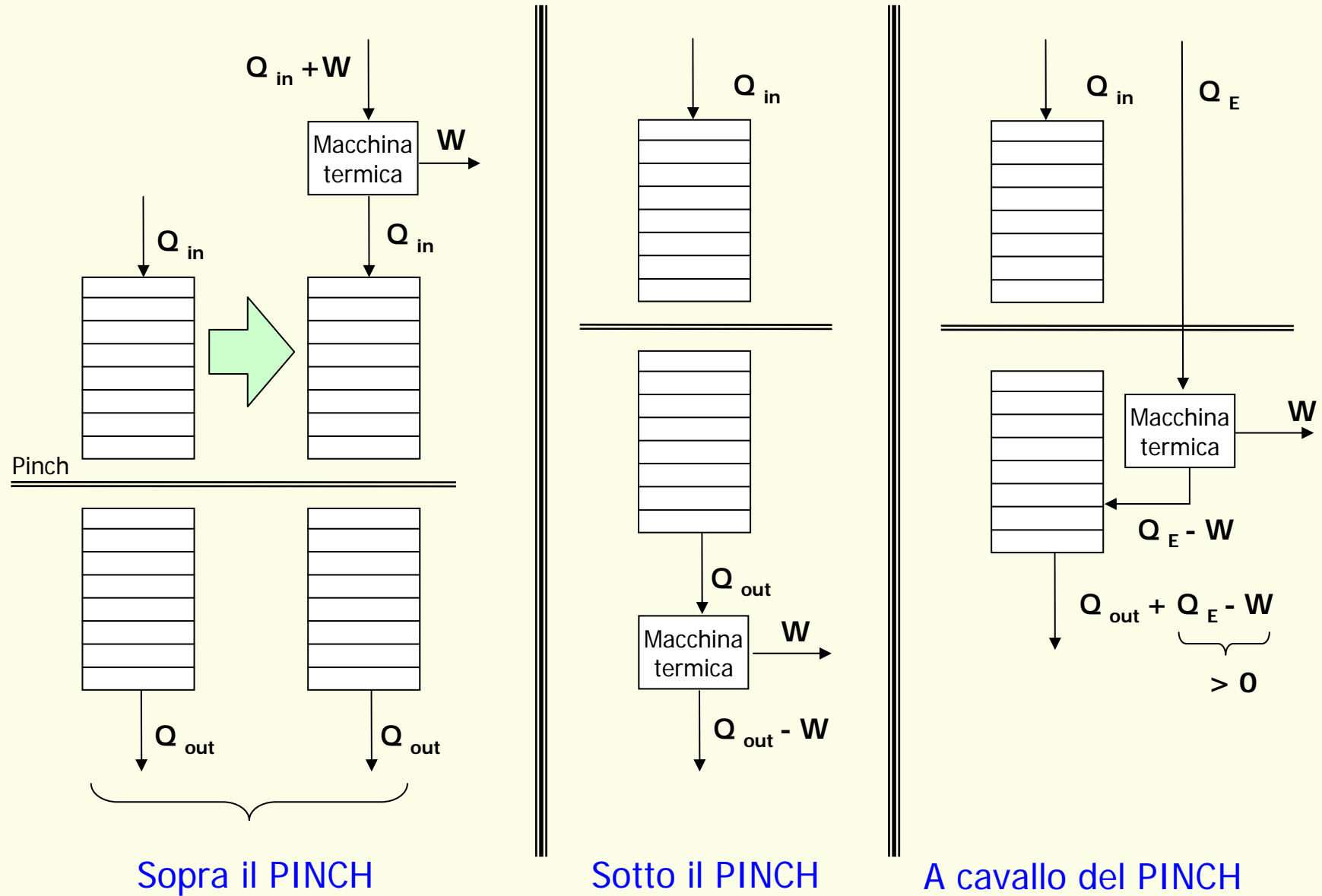
Sotto il PINCH



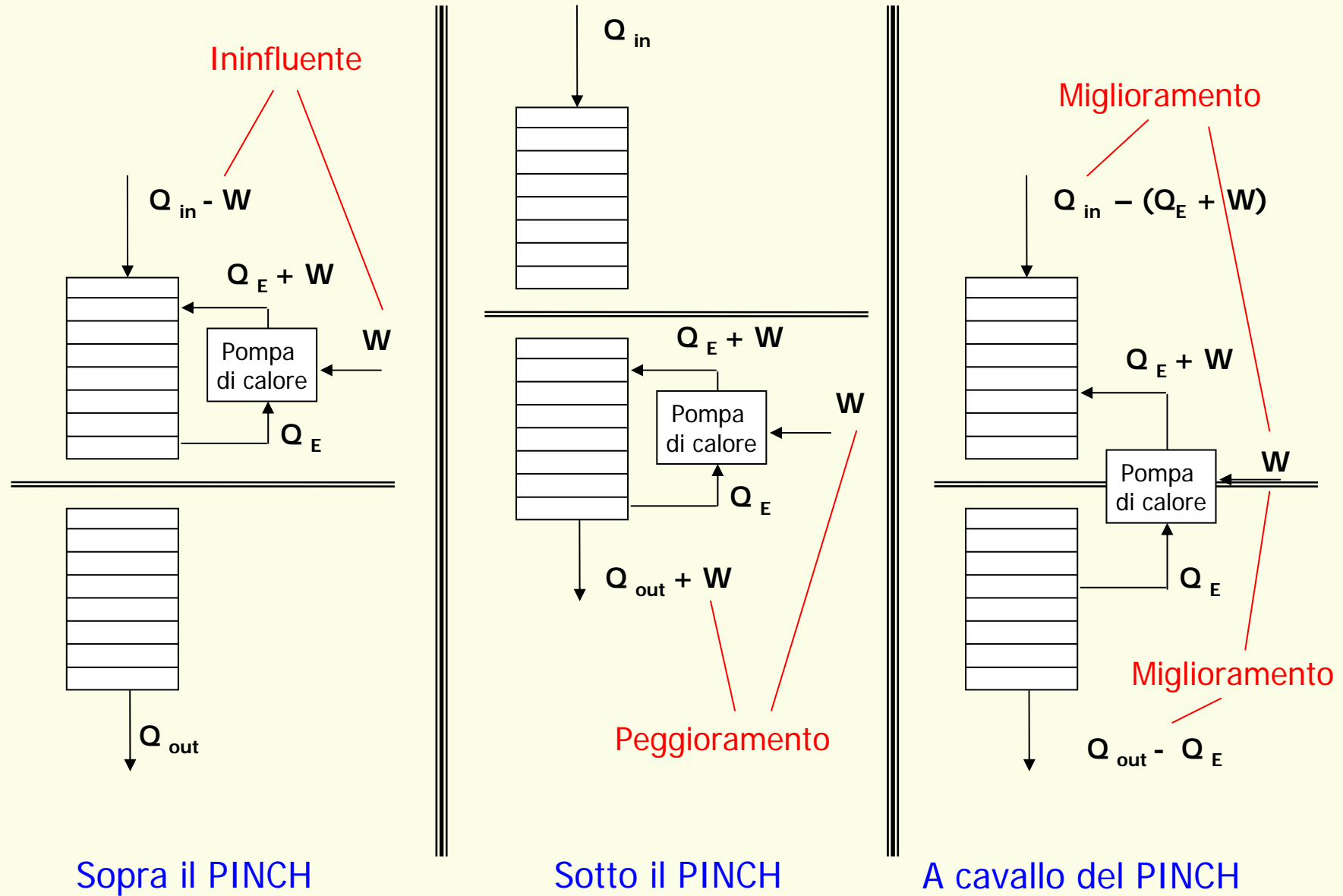
Proseguire *gestendo* il pinch



Macchine termiche

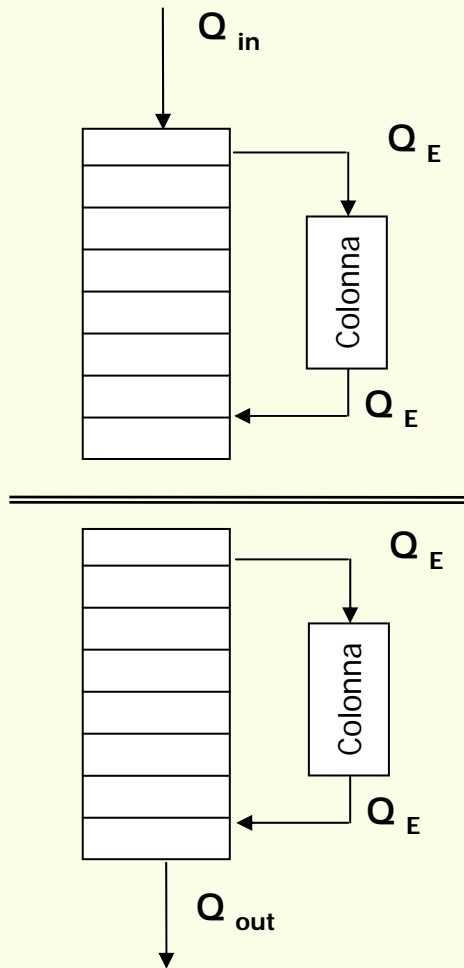


Pompe di calore



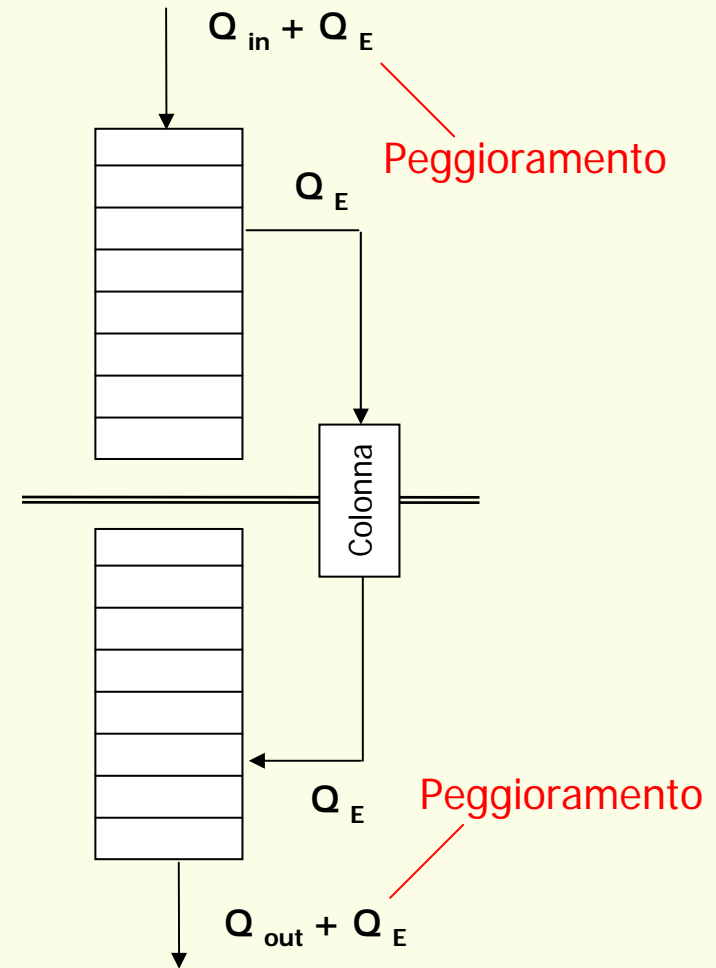
Colonne di distillazione

Situazione accettabile



Sopra e sotto il PINCH

Situazione **NON** accettabile



A cavallo del PINCH



Reti di scambio termico

Piuttosto che approcciare il problema dello scambio termico abbracciando una sola apparecchiatura alla volta, è utile considerare l'INTEGRAZIONE ENERGETICA di tutto il processo.

Il punto cardine di quest'approccio globale è il calcolo della richiesta MINIMA di fornitura di energia (riscaldamento o raffreddamento) per la rete degli scambiatori.

Sarà così possibile determinare il minimo numero di scambiatori necessari per soddisfare le specifiche di progetto.

Si pensi al processo HDA, nel quale occorre:

- Riscaldare le correnti in ingresso al reattore (toluene e idrogeno freschi, ricicli) e le correnti nei ribollitori;
- Raffreddare la corrente in uscita dal reattore, i prodotti (T_{ambiente} per stoccaggio) e le correnti nei condensatori.



Reti di scambio termico

Prima legge della Termodinamica:

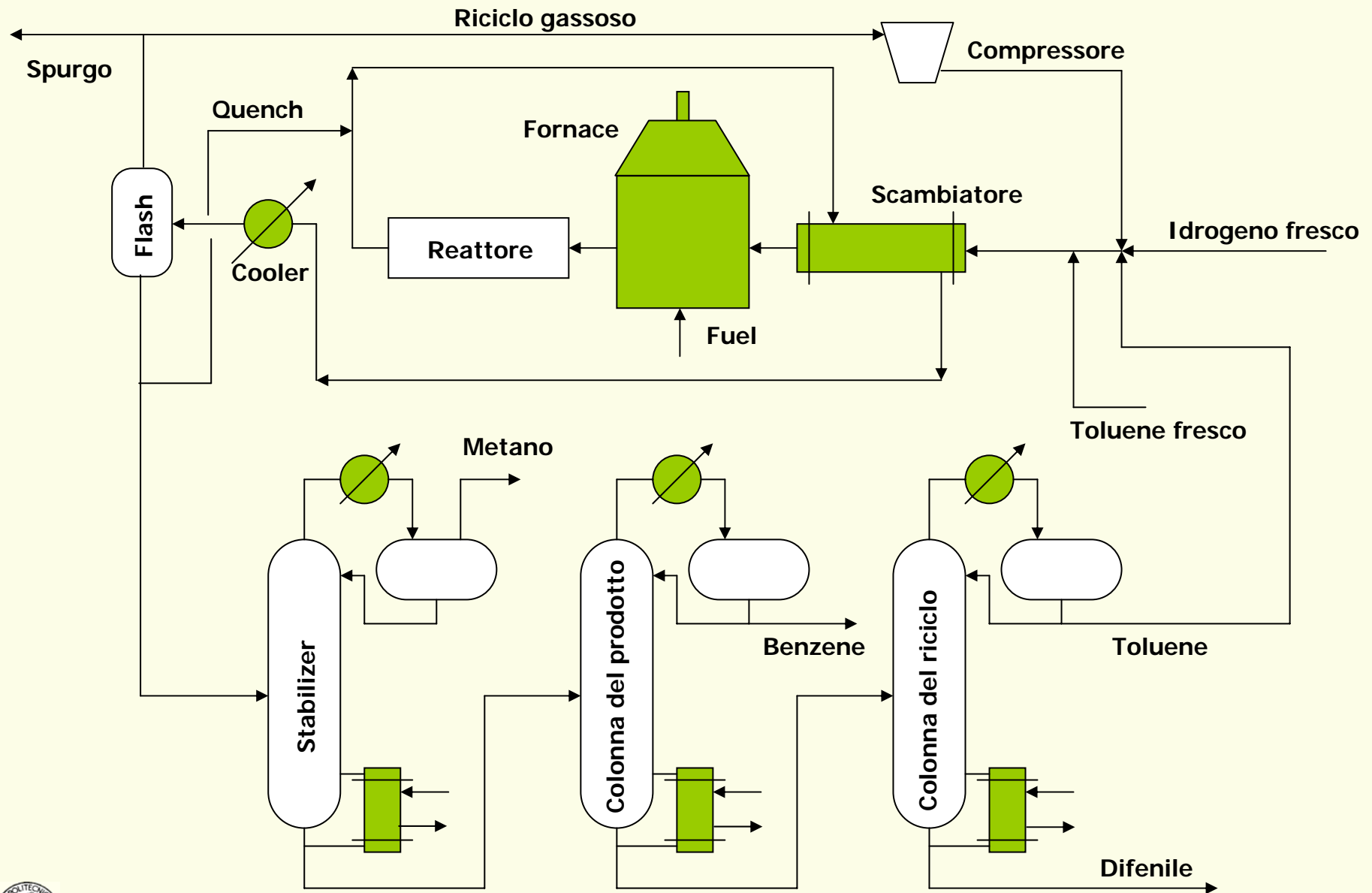
Date n correnti calde e n correnti fredde, è possibile calcolare per ogni corrente il calore ceduto (positivo) o assorbito (negativo) e sommare algebricamente tali valori. Se la somma risultasse positiva, vi sarebbe calore da sottrarre; in caso contrario, le correnti necessiterebbero di una fornitura di calore.

Il problema è che NON è sufficiente sapere quanto calore occorre scambiare, ma anche se tale scambio rispetti o meno la Seconda legge della Termodinamica: è necessario che la T della corrente calda sia maggiore della T della corrente fredda.

Inoltre, NON è unicamente necessario che $T_{\text{hot}} > T_{\text{cold}}$ per realizzare scambiatori fisicamente accettabili a livello di dimensioni. Al contrario occorre assegnare un ΔT_{min} al fine di avere una DRIVING FORCE che permetta la progettazione di uno scambio EFFICIENTE.

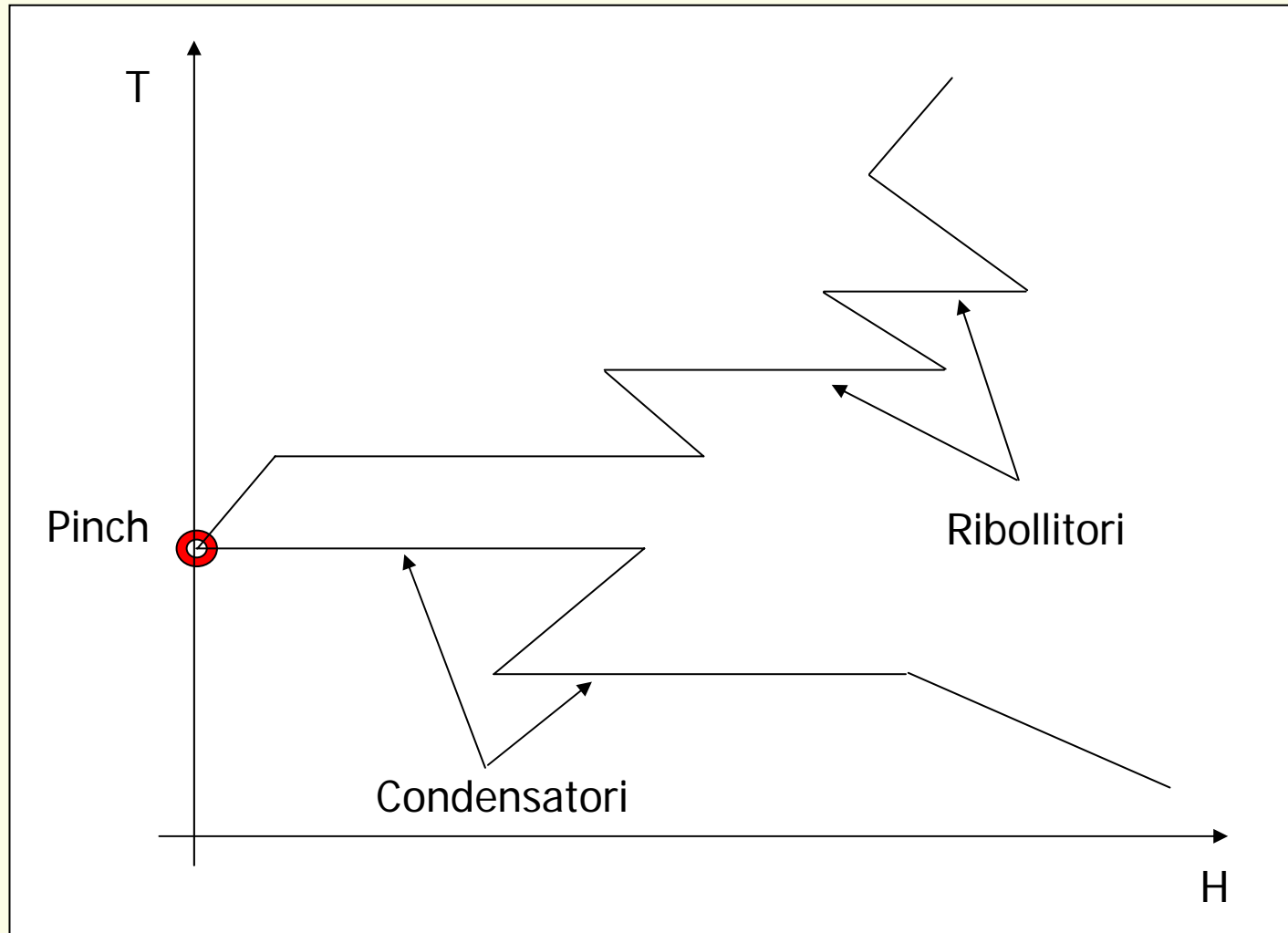


Lo scambio termico nel processo HDA



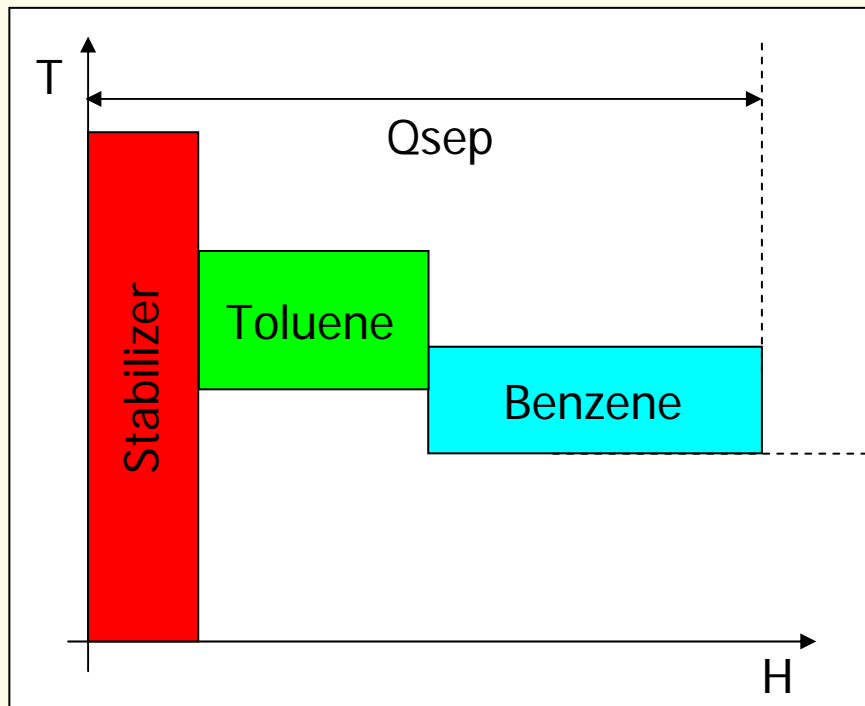
Esempio applicativo

Nel caso HDA, la gran curva composta della sezione di separazione liquida ha un andamento del tipo

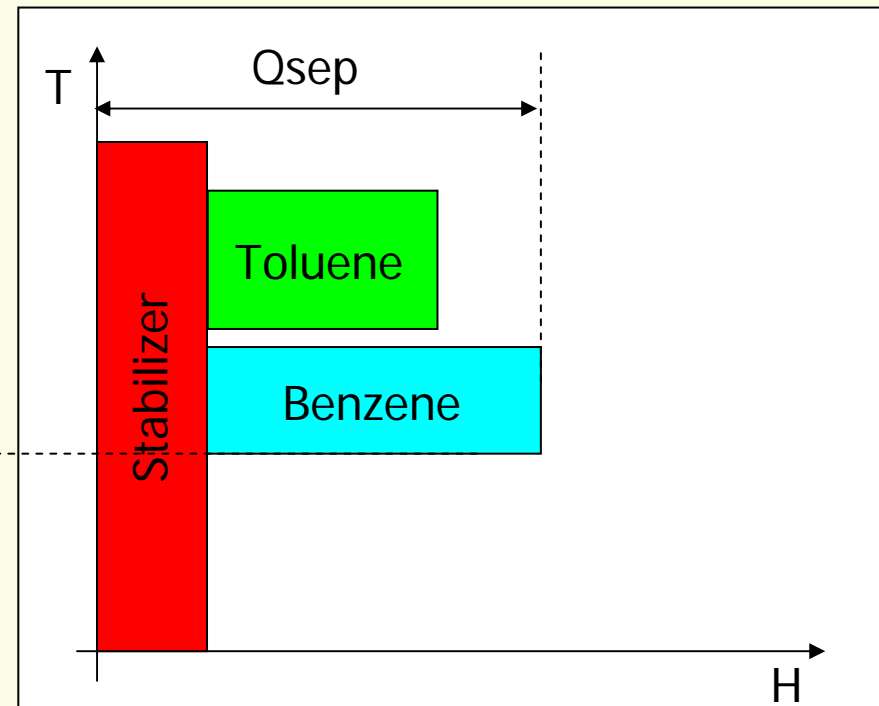


Esempio applicativo

È possibile osservare che RIBOLLITORI e CONDENSATORI sono rispettivamente sopra e sotto il pinch. La situazione è indesiderata, quindi, per risolvere il problema è possibile operare tramite modifiche della pressione operativa (*pressure-swing*) al fine di *spostare* la colonna sopra il pinch.



Condizioni operative convenzionali

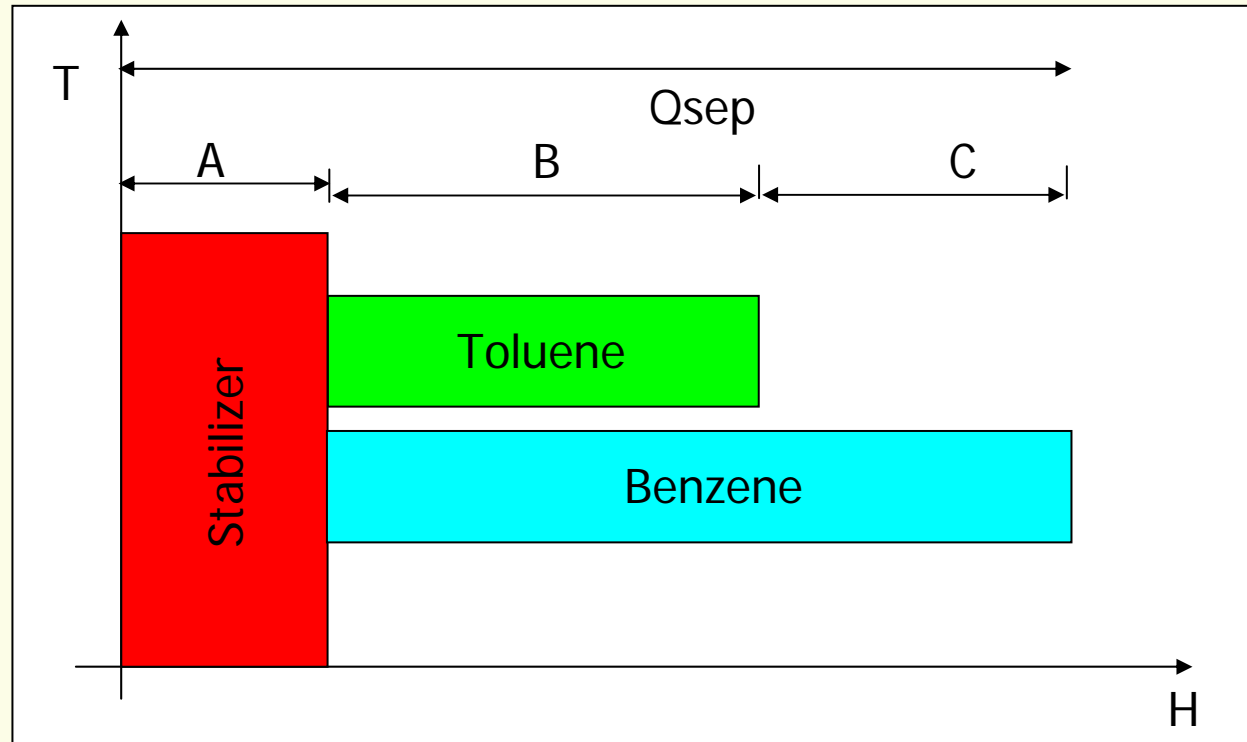


Condizioni operative dopo l'introduzione del *pressure-swing*



Esempio applicativo

In particolare:



Dopo l'introduzione del *pressure-swing*, la colonna del benzene viene a trovarsi sotto quella del toluene, la quale ha mantenuto la richiesta energetica. È cambiata soltanto la temperatura alla quale avviene lo scambio entalpico, in virtù dell'incremento di pressione. Così facendo la richiesta entalpica della colonna del benzene può traslare verso sinistra perché una quota parte B del calore ad essa necessario (B+C) è fornita dalla colonna del toluene. Conseguentemente la colonna del benzene ha necessità di ricevere dall'esterno soltanto il calore C.

