

Corso di impiego industriale dell'energia



Pinch analysis

Prof. Rodolfo Taccani

Ing. Chiara Dall'Armi

A.A. 2020-21

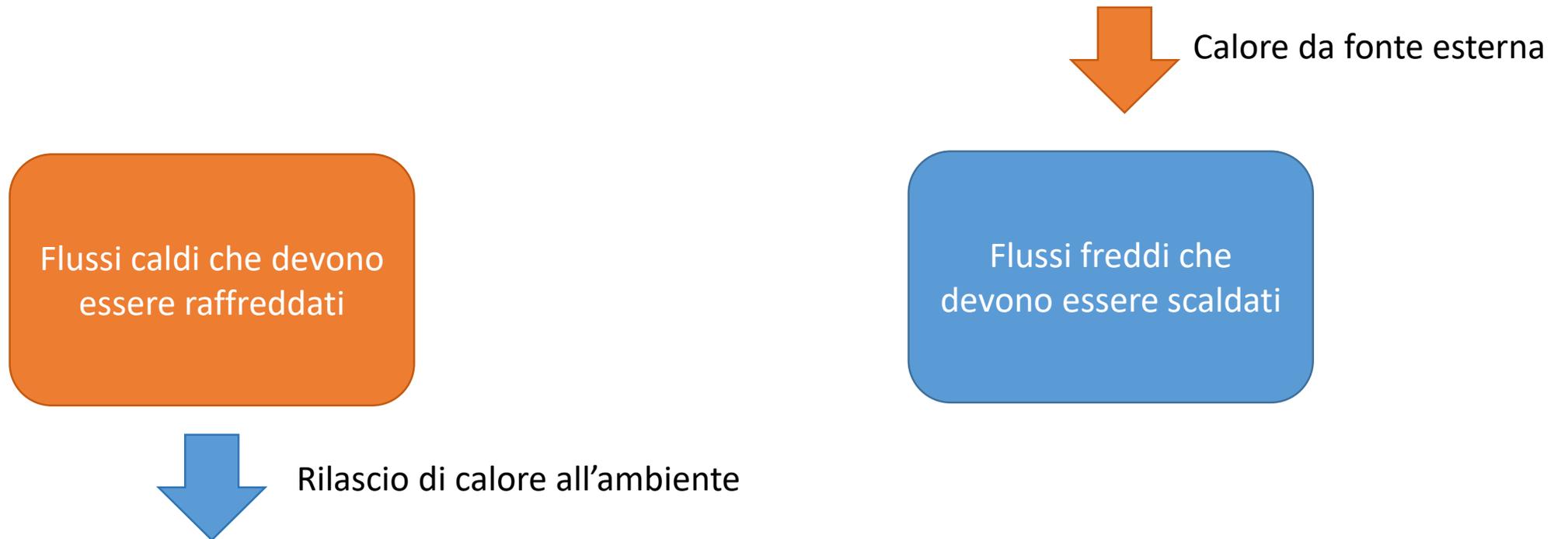
Obiettivi e contenuti della lezione



Comprensione metodologia Pinch Analysis per l'individuazione di possibilità di recupero termico in un sistema energetico

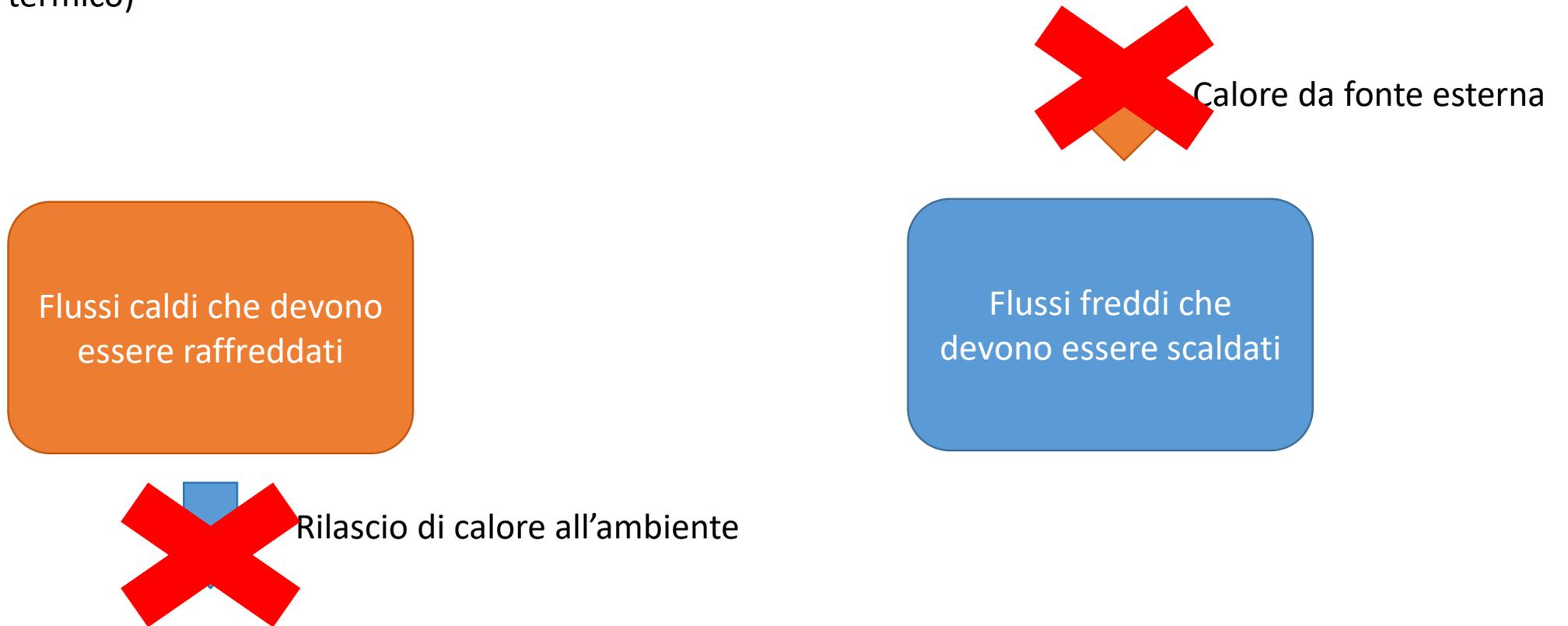
Pinch Analysis

Insieme di procedure inizialmente volte alla corretta definizione della **rete di scambiatori (Heat Exchanger Network - HEN)** in un sistema energetico e successivamente utilizzato per altre applicazioni (per esempio recupero termico)



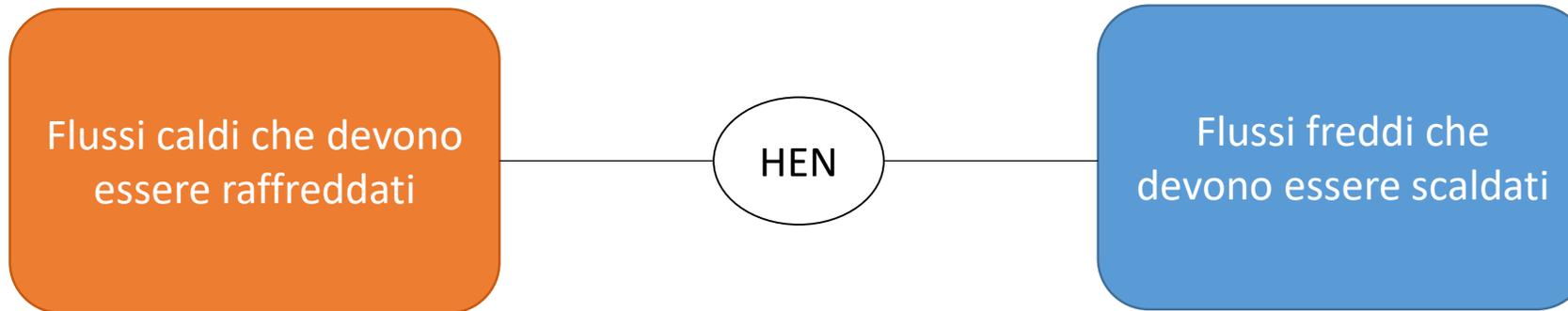
Pinch Analysis

Insieme di procedure inizialmente volte alla corretta definizione della **rete di scambiatori (Heat Exchanger Network - HEN)** in un sistema energetico e successivamente utilizzato per altre applicazioni (per esempio recupero termico)



Pinch Analysis

Insieme di procedure inizialmente volte alla corretta definizione della **rete di scambiatori (Heat Exchanger Network - HEN)** in un sistema energetico e successivamente utilizzato per altre applicazioni (per esempio recupero termico)



Quanto più l'integrazione tra flussi caldi e freddi sarà ottimizzata, tanto maggiore sarà il risparmio energetico nel sistema complessivo

Pinch Analysis

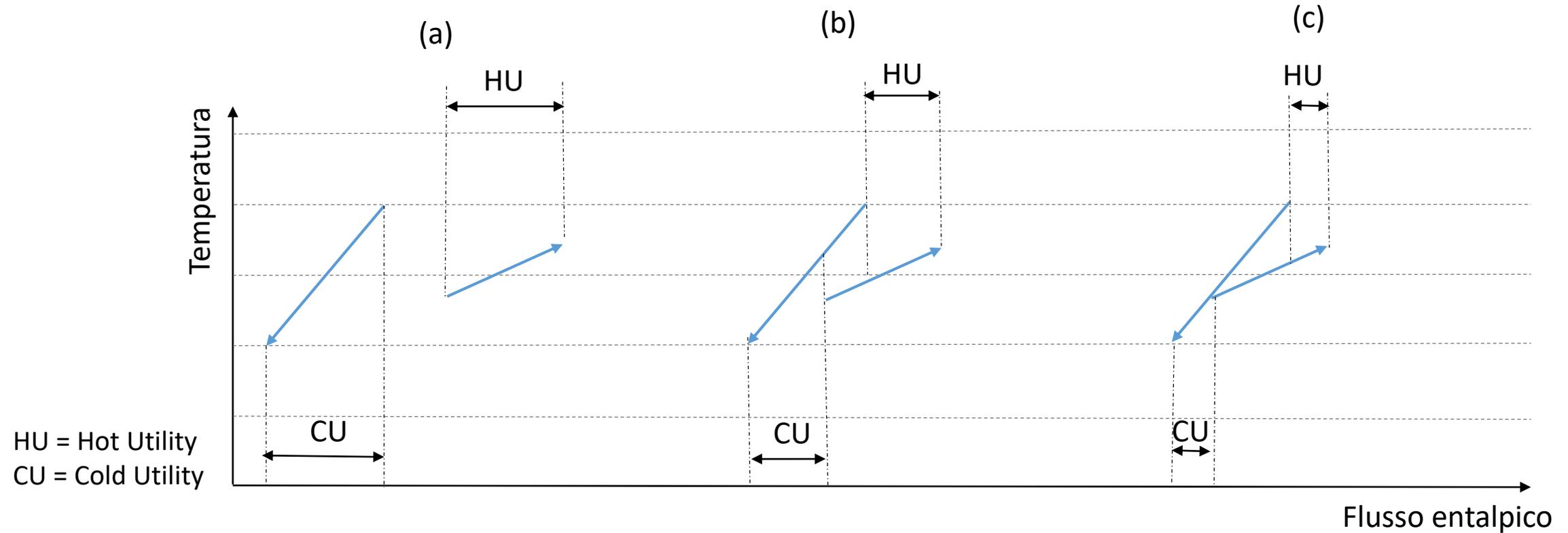
Obiettivo Pinch Analysis → definire la HEN che garantisca il massimo risparmio energetico (criterio **MER – Maximum Energy Recovery**)

Dati di partenza = dati termodinamici flussi caldi e freddi nel sistema

Passi principali:

1. Identificazione flussi caldi e freddi del sistema
2. Costruzione delle curve composte
3. Scelta della minima differenza di temperatura
4. Problem table
5. Grand composite curve

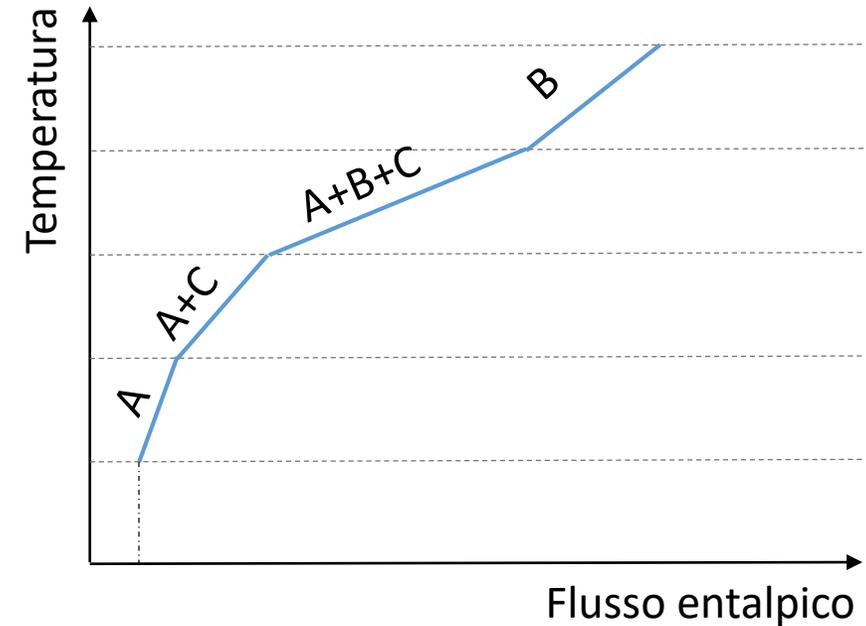
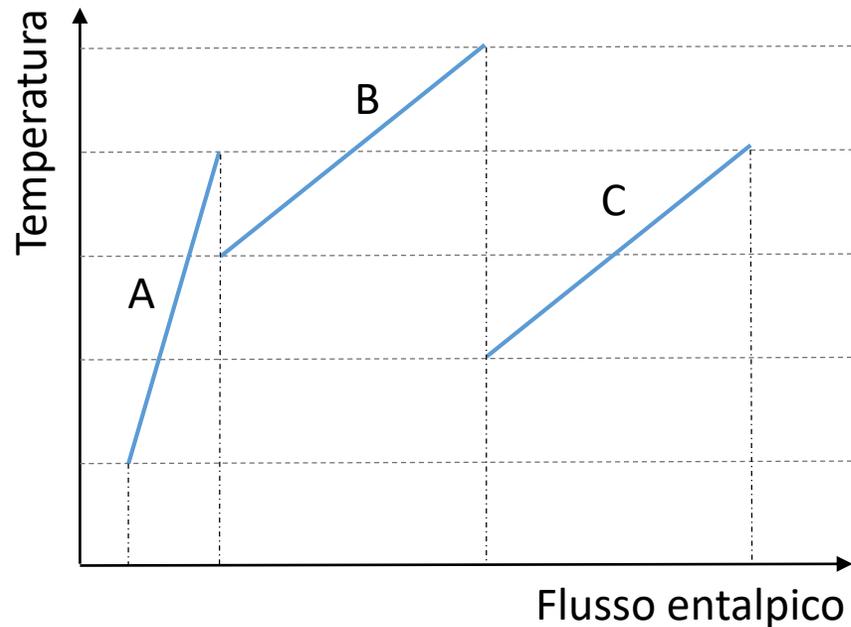
Esempio di rappresentazione di scambi termici nel diagramma T- Δh



- (a) Flussi non integrati, calore interamente fornito da HU e rilasciato a CU
- (b) Avviene scambio termico tra i flussi, diminuiscono HU e CU
- (c) Massima integrazione dei flussi, HU e CU sono le minime possibili

Metodo grafico: composite curves (curve composte)

La **composite curve** rappresenta il processo di scambio termico (raffreddamento o riscaldamento) di un insieme di flussi (caldi o freddi).



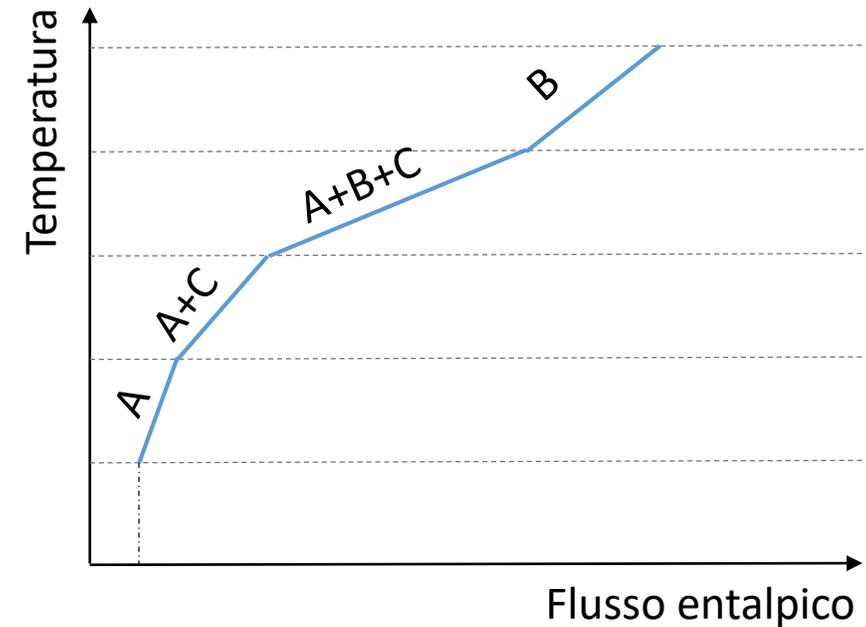
Per ogni intervallo di temperatura si sommano le capacità dei flussi termici; la somma viene moltiplicata per l'ampiezza dell'intervallo di temperatura e si ottiene la proiezione orizzontale del segmento

Metodo grafico: composite curves (curve composte)

La **composite curve** rappresenta il processo di scambio termico (raffreddamento o riscaldamento) di un insieme di flussi (caldi o freddi).

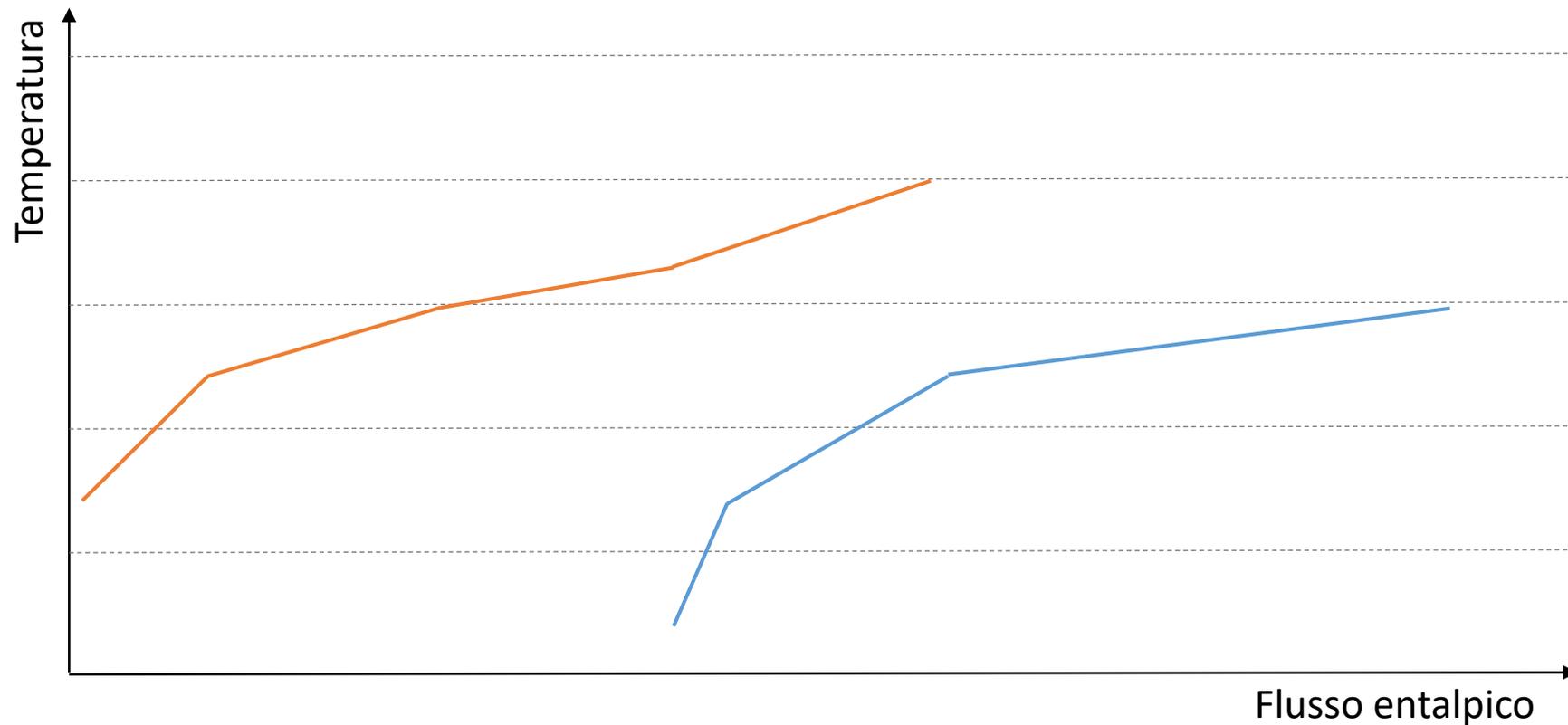
Pendenza = somma delle capacità termiche di tutti i flussi termici coinvolti nell'intervallo di temperatura considerato

Proiezione asse x = flusso termico complessivamente scambiato



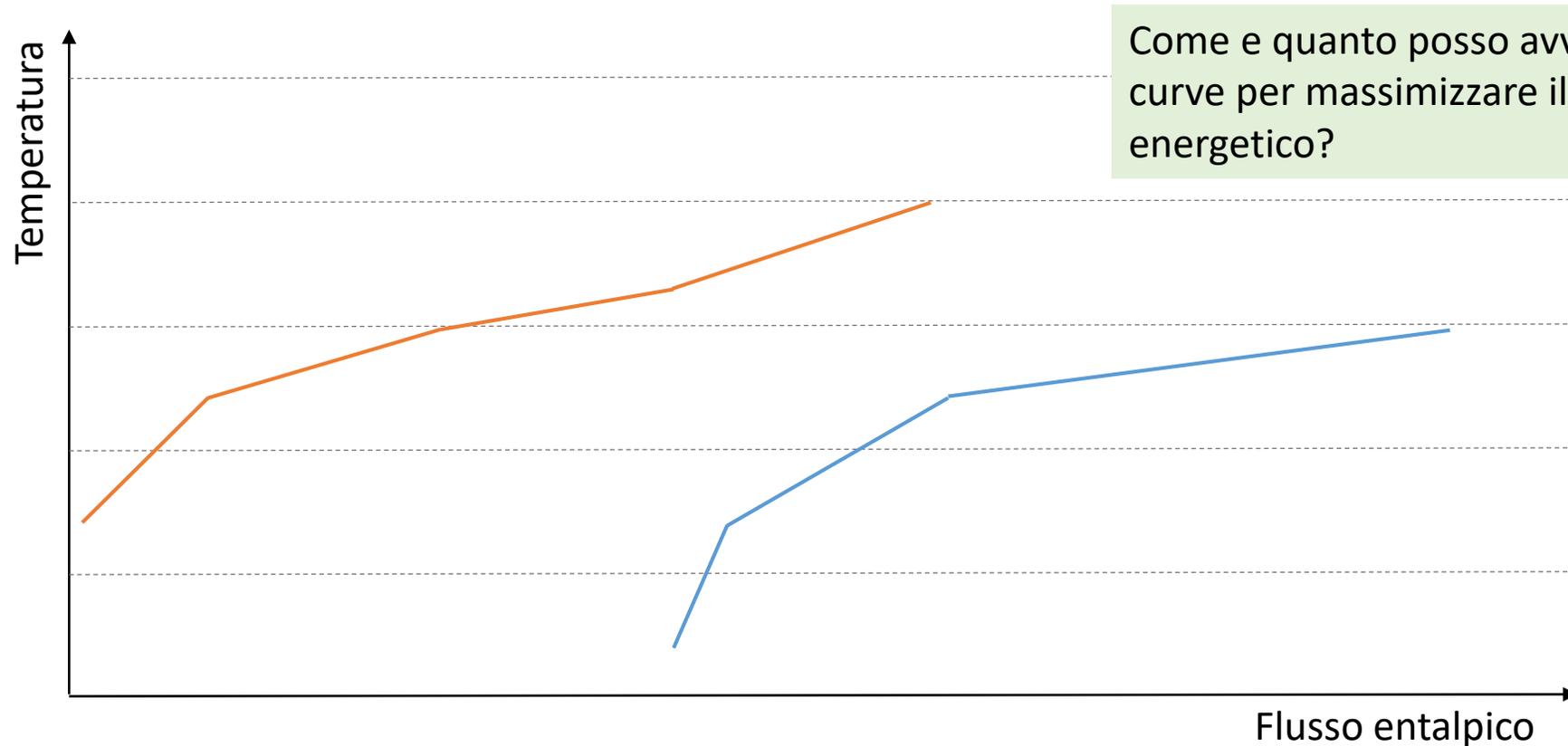
Composite curves in una HEN

In una HEN ci saranno sempre la **Cold Composite Curve (CCC)** relativa ai flussi freddi che si devono scaldare e la **Hot Composite Curve (HCC)** relativa ai flussi caldi che si devono raffreddare:



Composite curves in una HEN

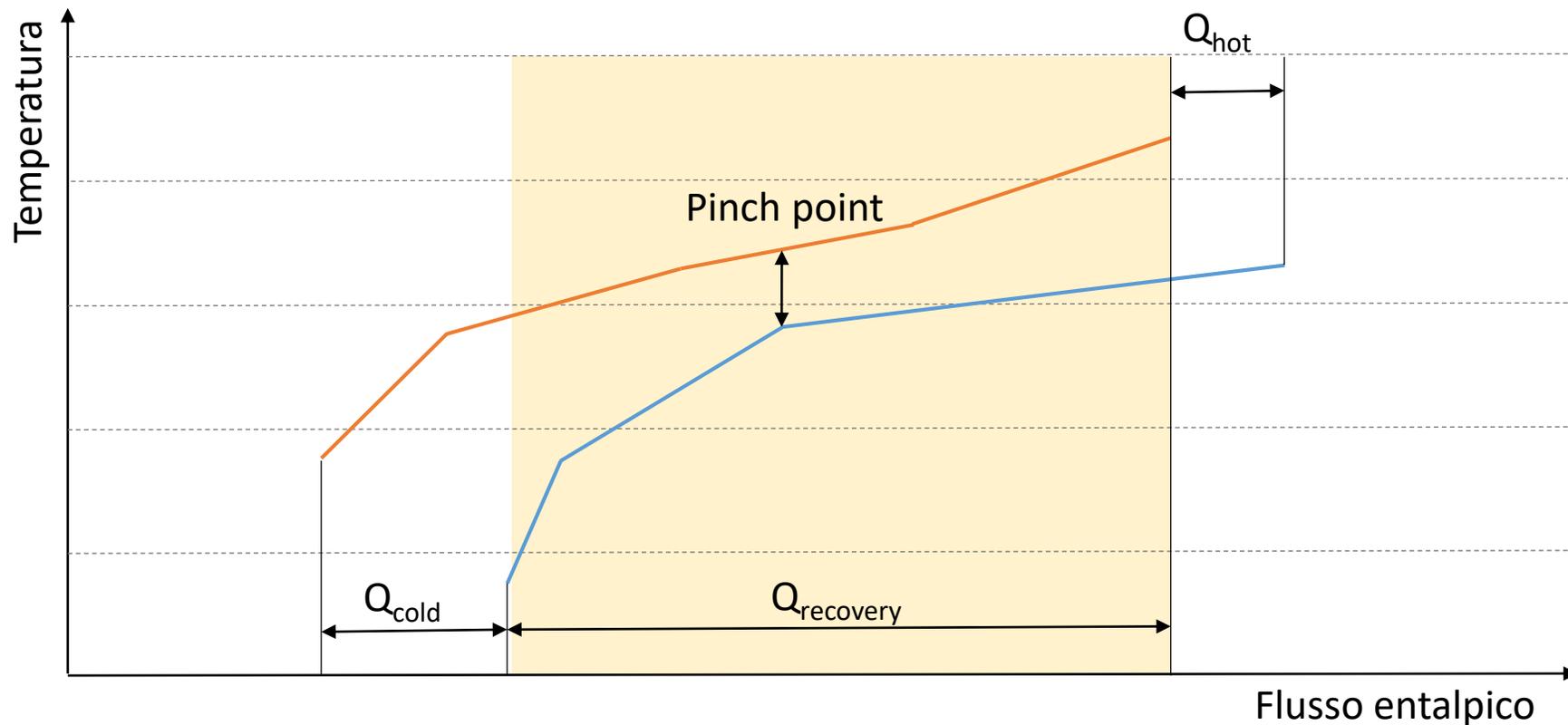
In una HEN ci saranno sempre la **Cold Composite Curve (CCC)** relativa ai flussi freddi che si devono scaldare e la **Hot Composite Curve (HCC)** relativa ai flussi caldi che si devono raffreddare:



Composite curves in una HEN

In una HEN ci saranno sempre la **cold composite curve (CCC)** relativa ai flussi freddi che si devono scaldare e la **hot composite curve (HCC)** relativa ai flussi caldi che si devono raffreddare.

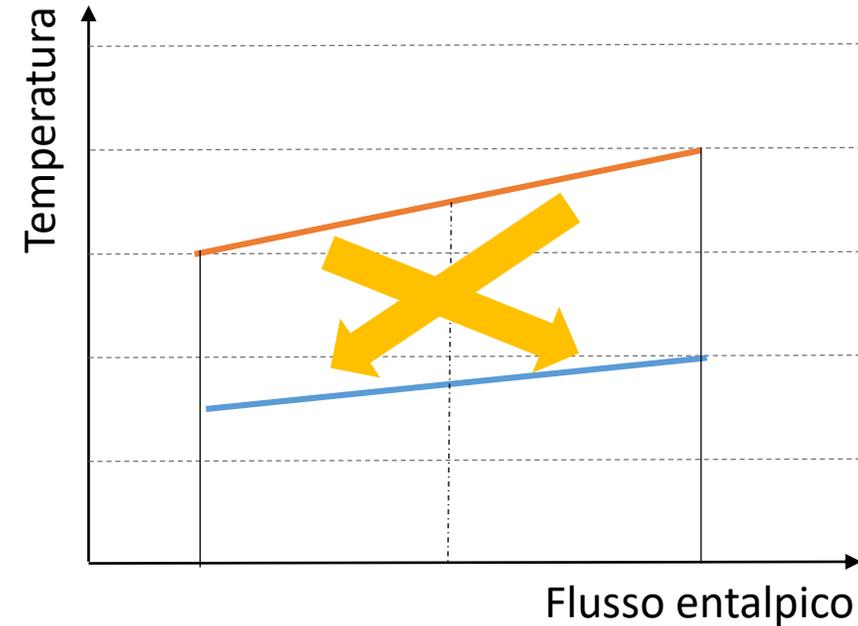
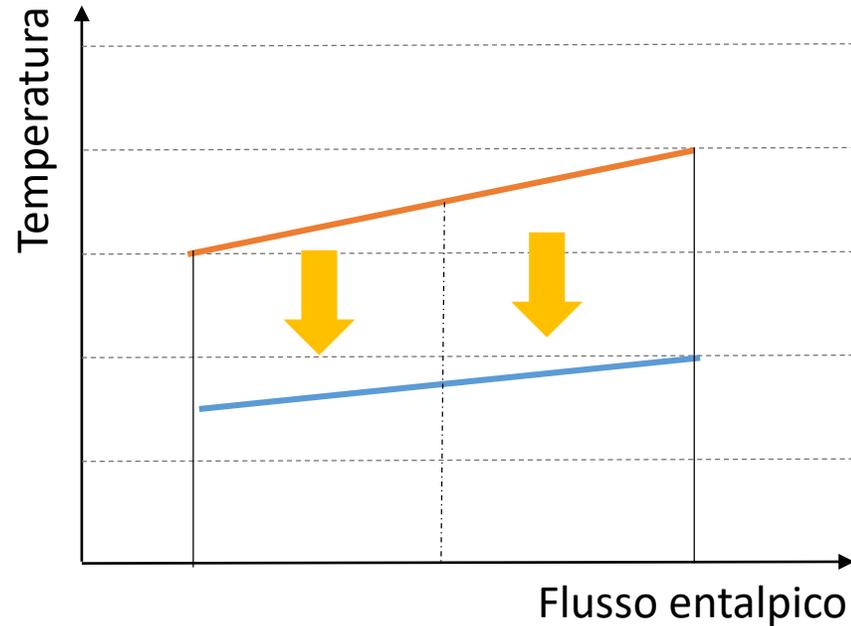
Il punto in cui le curve sono più vicine viene detto **pinch point**.



NON posso avvicinare le curve all'infinito, ma devo rispettare il ΔT_{min} del sistema

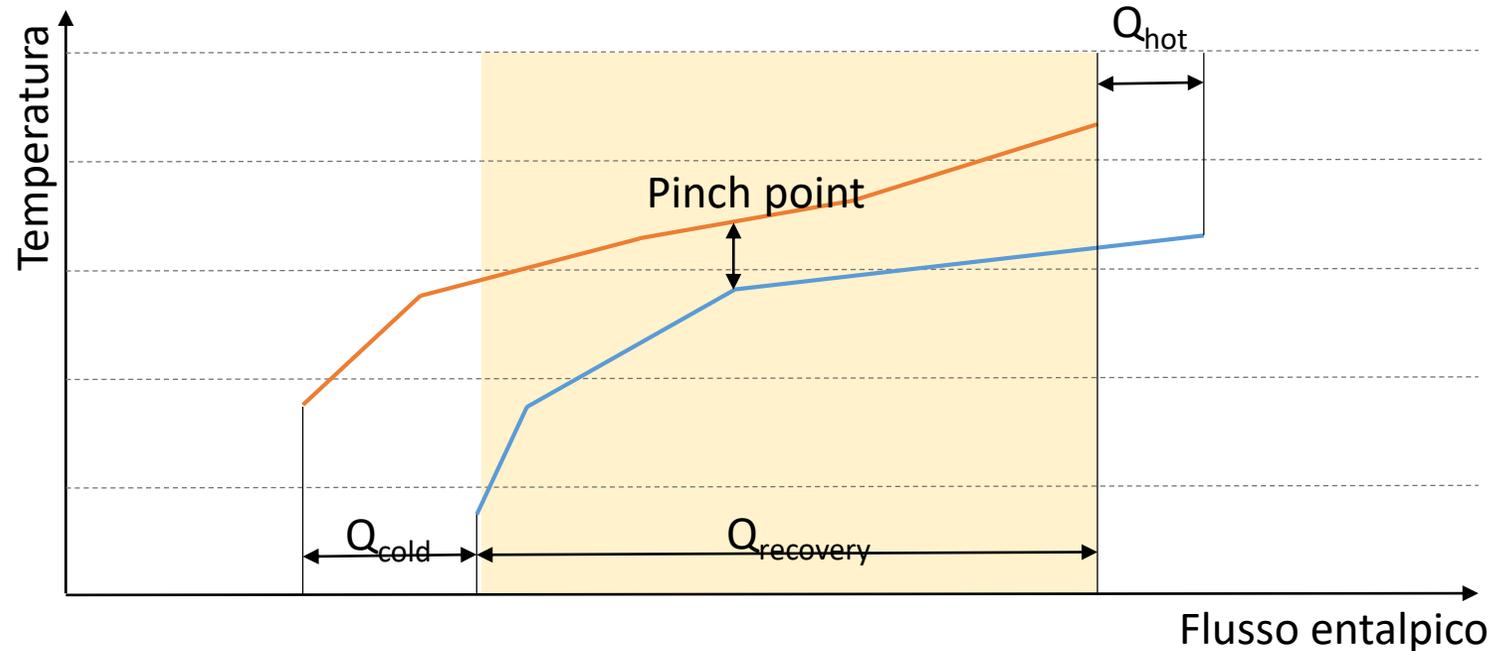
In ogni punto:
 $\Delta T \geq \Delta T_{min}$

Composite curves in una HEN



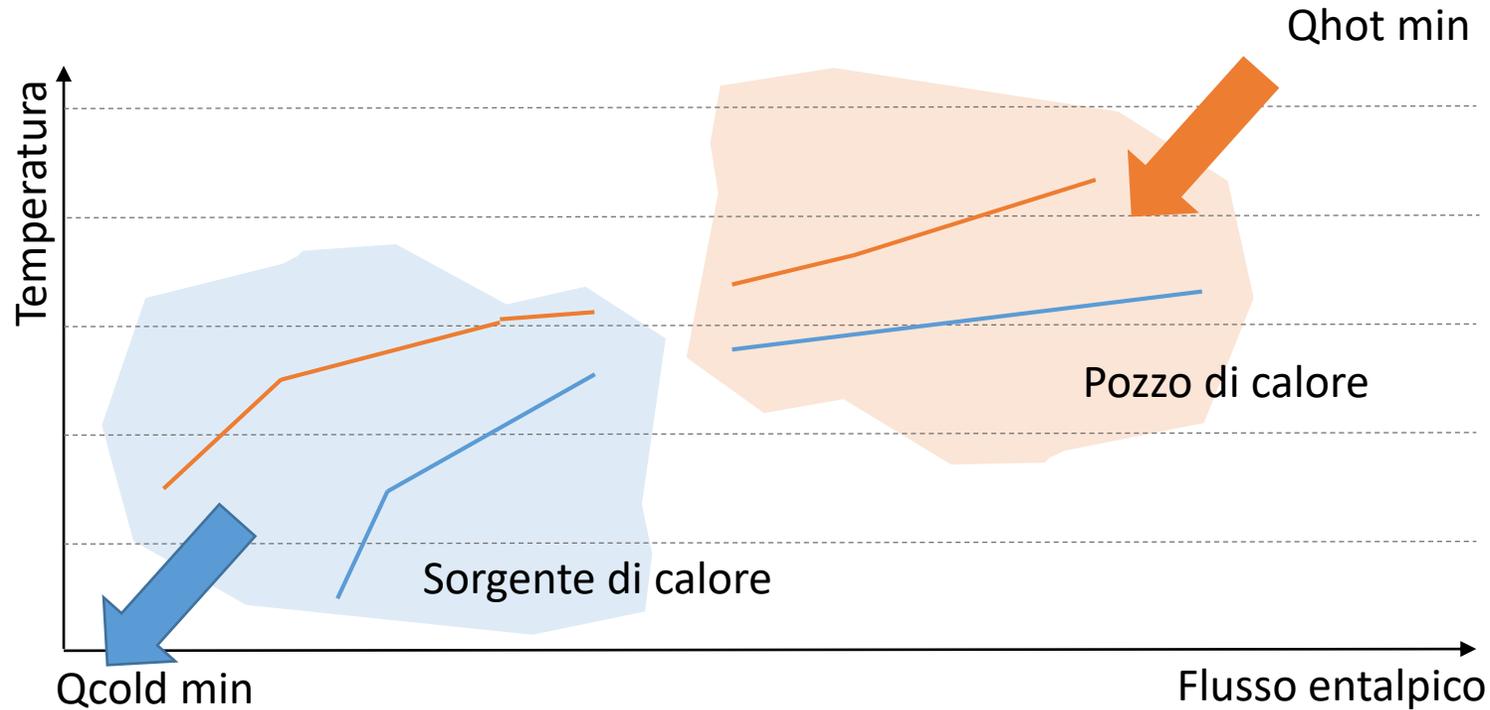
N.B: le composite curves **non** danno indicazioni su **come** avviene lo scambio termico in ciascuna sezione, lo scambio potrebbe essere anche “incrociato”; il vincolo di **fattibilità** è legato solamente al **ΔT_{min} scelto**, che deve essere rispettato in ogni punto

Composite curves in una HEN



- Se la minima differenza di temperatura tra le CC è inferiore a ΔT_{min} lo scambio termico non è fattibile
- Il **massimo recupero di calore** viene realizzato quando la differenza di temperature al pinch point è pari a ΔT_{min} ($\Delta T_{min} = \Delta T_{pp} \rightarrow$ max porzione sovrapposta di CCC e HCC)
- Nella configurazione ottimale Q_{cold} e Q_{hot} sono le minime possibili
- Nella configurazione ottimale, **lo scambio di calore attraverso il pinch point è nullo**

Caso ottimale $\Delta T_{min} = \Delta T_{pp}$



Se scambiassi calore attraverso il PP (da dx verso sx), poi dovrei fornire la stessa quantità di calore che ho scambiato attraverso il PP dall'esterno → non conveniente!

Nella configurazione ottimale la parte sopra al pinch point si comporta come **pozzo di calore** per assorbire la minima quantità di calore Q_{hot} dall'esterno; analogamente, la parte sotto il pinch point si comporta come **sorgente di calore** che rilascia all'ambiente la minima quantità di calore Q_{cold}

Caso ottimale $\Delta T_{min} = \Delta T_{pp}$

Riassumendo, per raggiungere l'obiettivo di **massimo recupero di energia**:

- Non scambiare calore attraverso il pinch point
- Non utilizzare fonti di calore esterne sotto il pinch point
- Non rigettare calore all'ambiente esterno sopra al pinch point

Un'eccezione a tali regole potrebbe essere rappresentata dai **problemi di soglia** (v. dopo).

Scelta del ΔT_{min}

- All'aumentare di ΔT_{min} si ha un aumento del calore da rilasciare all'ambiente e del calore richiesto dall'esterno, diminuendo quindi la quantità di calore che può essere recuperate nel Sistema
- All'aumentare di ΔT_{min} si ha però una diminuzione della superficie necessaria allo scambio termico stesso
- Di fatto, ΔT_{min} bassi sarebbero conveniente *termodinamicamente*, ma sono generalmente più costose



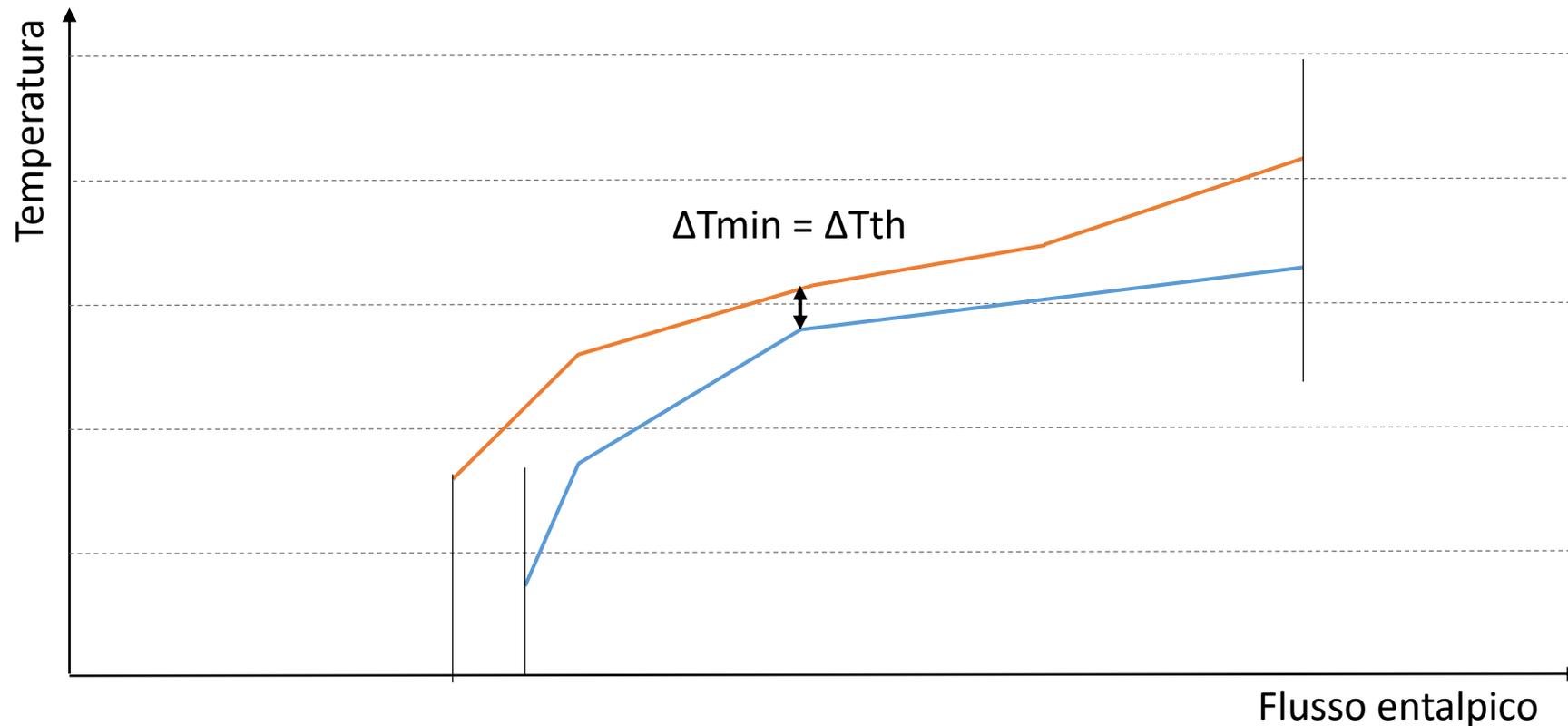
Come scelgo il ΔT_{min} che realizza il miglior compromesso tra *costo termodinamico* e *costo del capitale investito* ?

1. Si può procedere al calcolo della superficie di scambio totale richiesta dal sistema energetico, valutando l'influenza di ΔT_{min} sui costi
2. Si può valutare eventualmente l'influenza del ΔT_{min} sul costo capitale solo nell'intorno del pinch point, senza dover analizzare tutta la HEN

Problemi di soglia

I problemi a soglia (threshold problems) sono casi particolari in cui è necessario **solo uno scambio** di calore con l'ambiente esterno (solo CU o solo HU). Per questi problem possono non essere valide le tre regole viste prima.

Esempio:

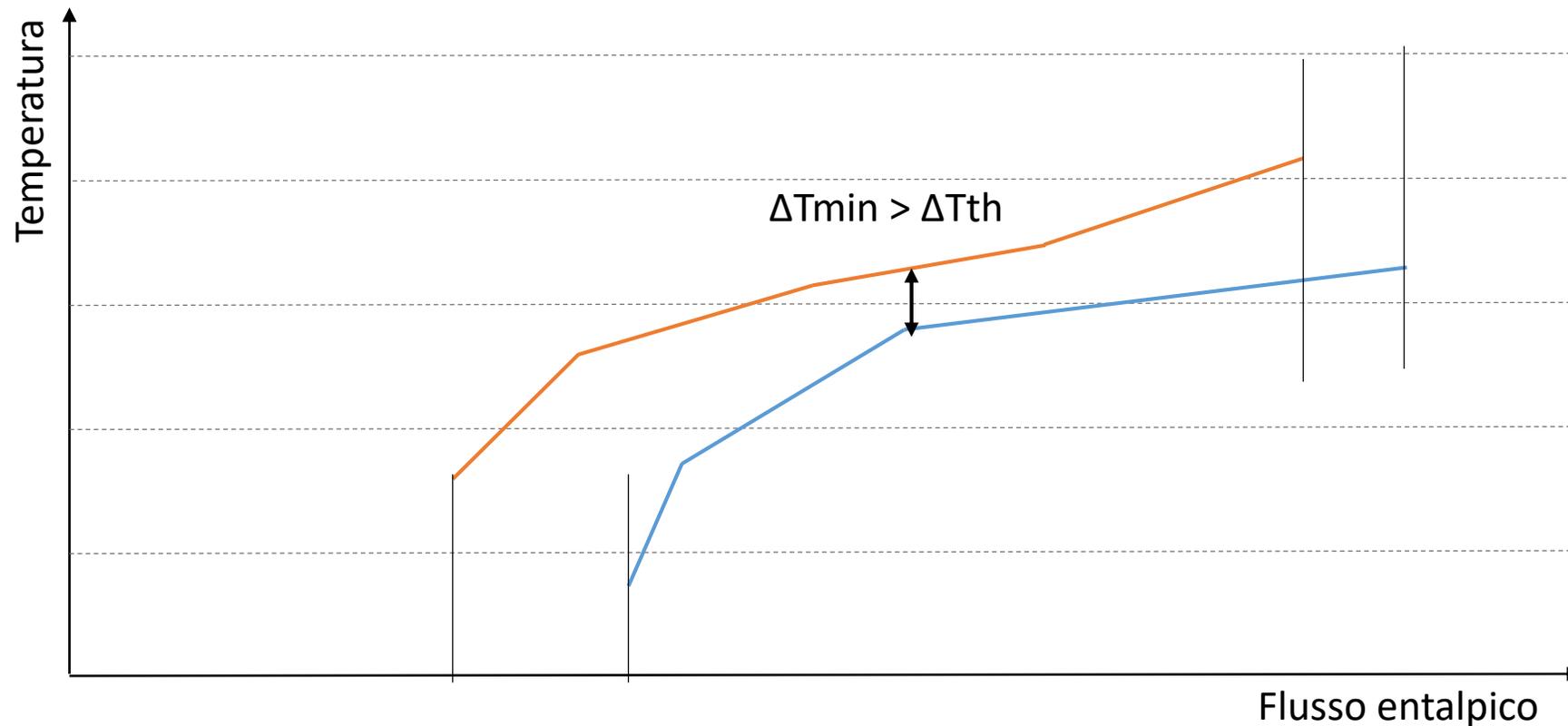


In questo caso la situazione di Massimo risparmio energetico si ha quando $\Delta T_{min} = \Delta T_{th}$ (threshold = soglia).

Problemi di soglia

I problemi a soglia (threshold problems) sono casi particolari in cui è necessario **solo uno scambio** di calore con l'ambiente esterno (solo CU o solo HU). Per questi problem possono non essere valide le tre regole viste prima.

Esempio:

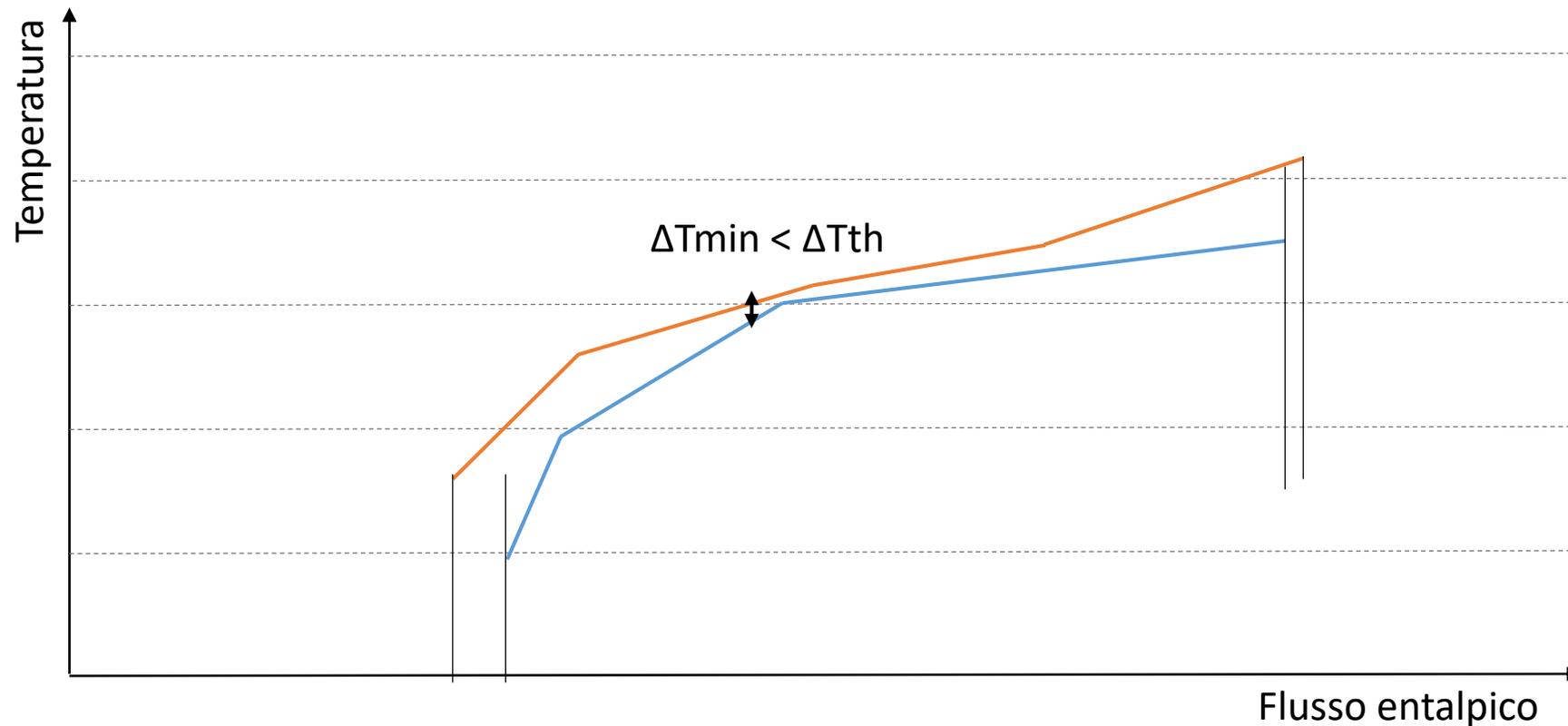


Se si allontanano le curve, ovvero $\Delta T_{min} > \Delta T_{th}$, compare una Q_{hot} oltre alla Q_{cold}

Problemi di soglia

I problemi a soglia (threshold problems) sono casi particolari in cui è necessario **solo uno scambio** di calore con l'ambiente esterno (solo CU o solo HU). Per questi problemi possono non essere valide le tre regole viste prima.

Esempio:



Se si avvicinano le curve, ovvero $\Delta T_{min} < \Delta T_{th}$, rimane solo la necessità di rilasciare calore all'esterno, a diversi livelli di temperatura

Problemi di soglia

Riassumendo:

- Per distinguere i problemi di soglia dai problemi normali, si posizionano le due curve in modo da avere $\Delta T_{min} = \Delta T_{pp}$: se in questa situazione emerge la necessità di avere **solo un flusso** da/per l'esterno allora si è nella situazione di un problema a soglia, ed è necessario procedere con l'individuazione di ΔT_{th}
- $\Delta T_{min} > \Delta T_{th} \rightarrow$ c'è bisogno sia di asportare che di fornire calore dall'ambiente esterno
- $\Delta T_{min} < \Delta T_{th} \rightarrow$ può succedere, in questo caso ci possono essere dei risparmi legati proprio al valore di ΔT_{min} , anche se di norma esso non influisce sul risparmio energetico

Problem Table

Metodo **più preciso** e soprattutto **più pratico** del metodo grafico.

Dati di partenza = temperature iniziali e finali dei flussi termici di un sistema, capacità termica dei flussi e ΔT_{min}



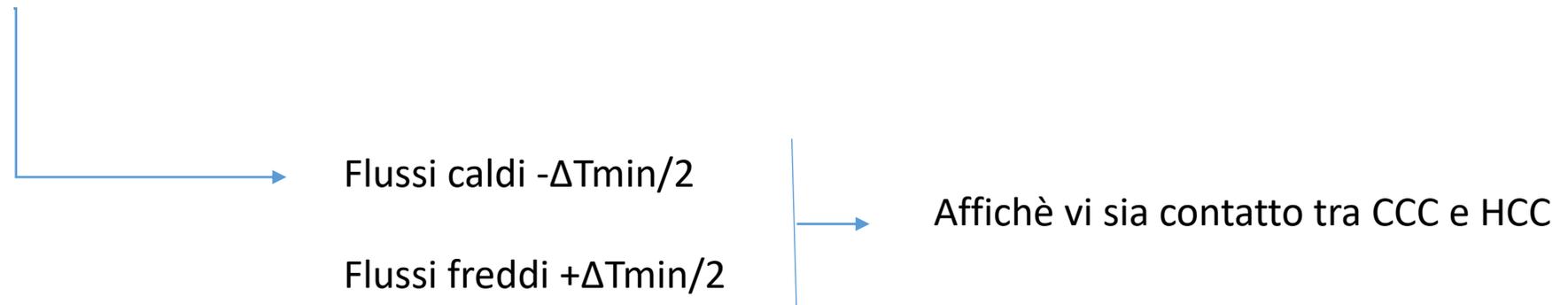
Scopo = mettere in evidenza la massima quantità di calore che può essere trasferita da un certo livello di temperature ai livelli sottostanti, ovvero garantire che attraverso il pinch point non ci sia scambio termico

Problem Table – Esempio 1

Flusso	Tipo	Cp (kW/°C)	T_in (°C)	T_fin (°C)
A	Freddo	2	20	135
B	Caldo	3	170	60
C	Freddo	4	80	140
D	Caldo	1.5	150	30

$\Delta T_{min} = 10^\circ\text{C}$

Si procede calcolando il SURPLUS o DEFICIT di calore, che rappresentano la distanza orizzontale nel diagramma T-H, per determinare se in per ciascun ΔT il flusso termico ceduto dai flussi caldi sia $>$ o $<$ di quello assorbito dai flussi freddi,



Si vuole quindi fare in modo che lo scambio termico attraverso il pinch point sia nullo (\rightarrow situazione ottimale)

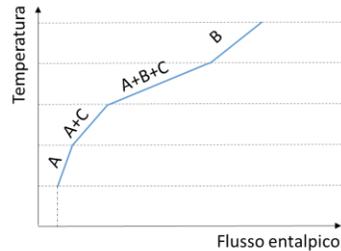
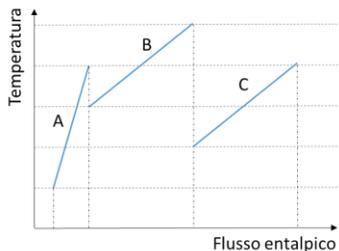
Problem Table – Esempio 1

+ se freddi, - se caldi

$C_p \cdot \Delta T$

+ deficit, - surplus

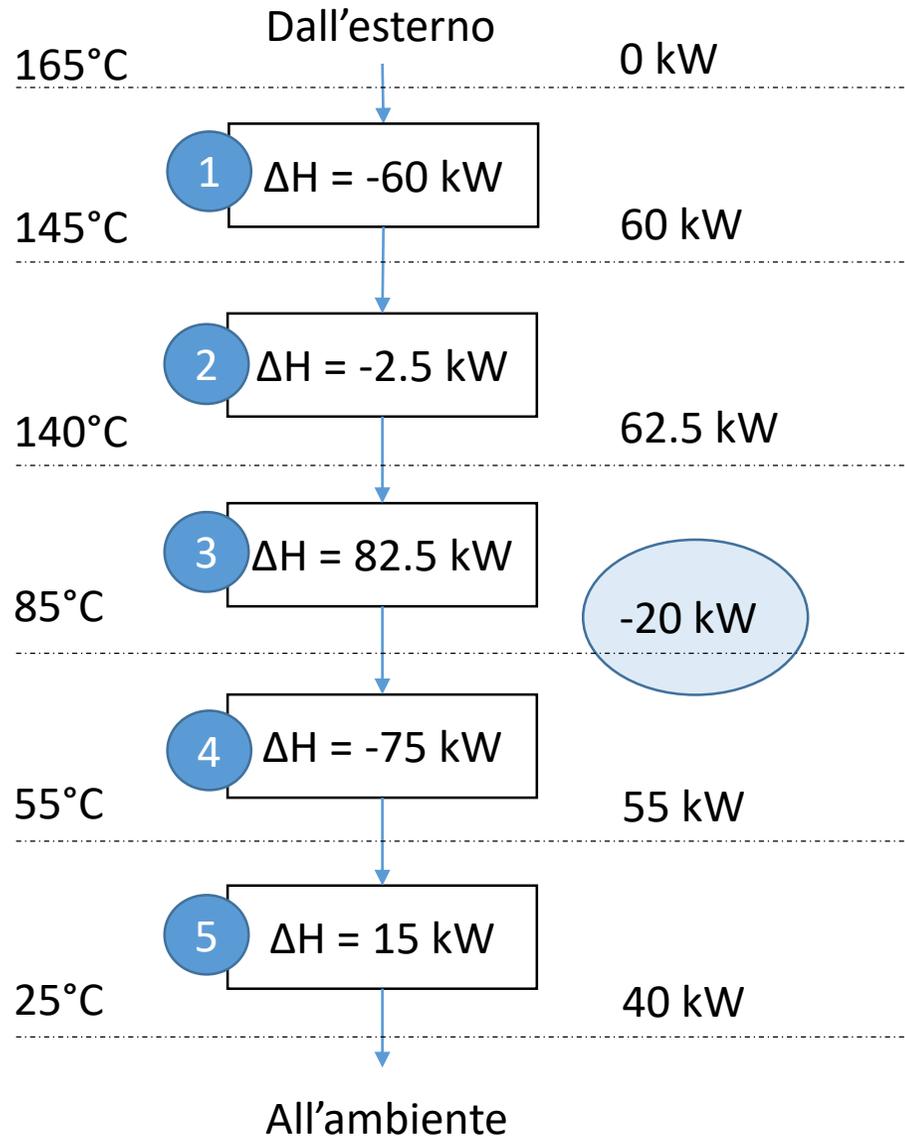
Intervallo	T_{in} (°C)	T_{fin} (°C)	ΔT (°C)	Flussi	Somma C_p (kW/°C)	ΔH (kW)	Surplus/Deficit	Somma Q (kW)
1	165	145	20	B	-3	-60	S	60
2	145	140	5	B+C+D	-0.5	-2.5	S	62.5
3	140	85	55	A+B+C+D	1.5	82.5	D	-20
4	85	55	30	A+B+D	-2.5	-75	S	55
5	55	25	30	A+D	0.5	15	S	15



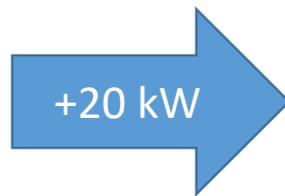
→ Come visto per metodo grafico

In presenza di surplus di calore, tale quantità potrà essere trasferita all'intervallo sottostante; se nell'intervallo sottostante ha un deficit, tale deficit dovrà essere colmato dal surplus accumulato

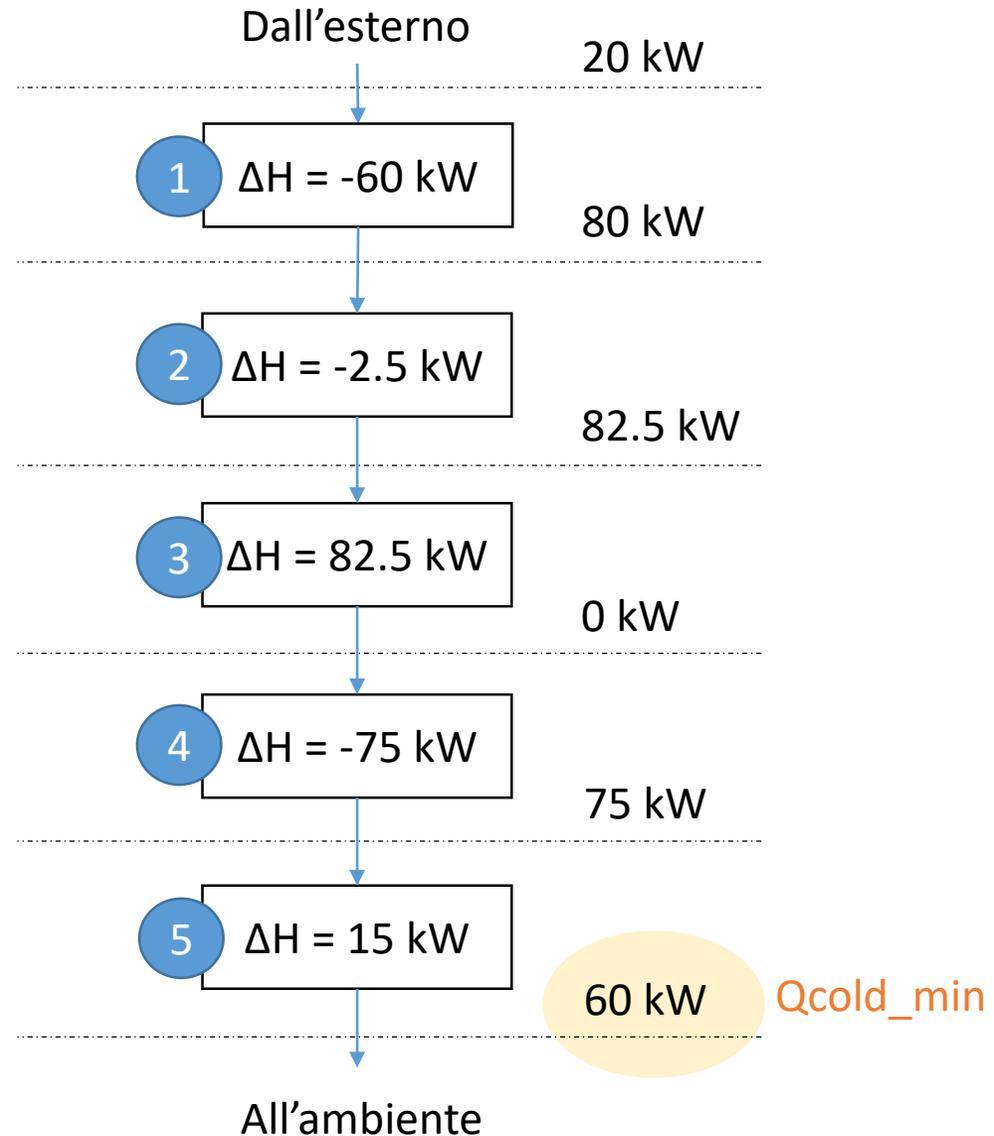
Problem Table – Esempio 1



C'è un deficit di 20 kW che deve essere soddisfatto da una fonte esterna



Il PP è tra il 3 e il 4 intervallo



Q_{cold_min}

Problem Table – Esempio 2

Scambi termici a T diverse con una sola utility esterna ($\Delta T_{min} < \Delta T_{th}$)

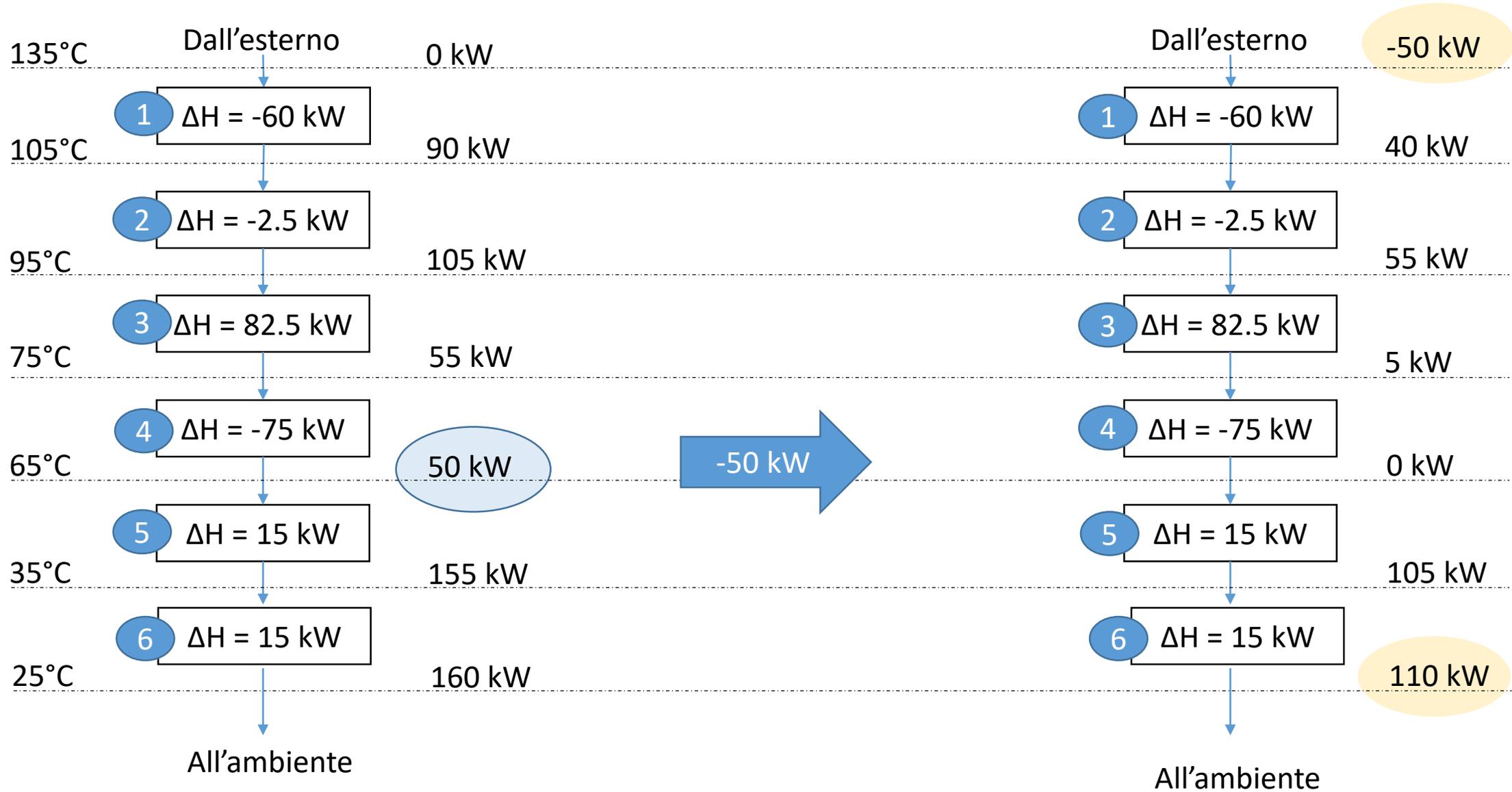
Flusso	Tipo	Cp (kW/°C)	T_in (°C)	T_fin (°C)
A	Caldo	3	140	40
B	Caldo	2	80	30
C	Freddo	4	60	90
D	Freddo	1.5	20	100

$\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$

Problem Table – Esempio 2

Intervallo	T _{in} (°C)	T _{fin} (°C)	ΔT (°C)	Flussi	Somma Cp (kW/°C)	ΔH (kW)	Surplus/ Deficit	Somma Q (kW)
1	135	105	30	A	-3	-90	S	90
2	105	95	10	A+D	-1.5	-15	S	105
3	95	75	20	A+C+D	2.5	50	D	55
4	75	65	10	A+B+C+D	0.5	5	D	50
5	65	35	30	A+B+D	-3.5	-105	S	155
6	35	25	10	B+D	-0.5	-5	S	160

Problem Table – Esempio 2



Problem Table – Esempio 2

In questo secondo esempio si nota che:

- Flussi caldi sono sufficienti a scaldare i flussi freddi → non c'è bisogno di sorgenti esterne
- Tutta la curva fredda è *coperta* da quella calda
- Il totale calore in eccesso (160 kW) viene rilasciato in ambiente
- La Pinch Analysis consente di identificare come questo **calore in eccesso possa essere rilasciato a diversi livelli di temperatura**; ciò potrebbe comportare notevoli vantaggi in termini di recupero termico di tale calore
- Si nota inoltre che la quantità di calore rilasciato ad un livello di temperatura più alto coincide con il minimo valore del flusso termico cumulato (50 kW)
- Il pp si trova in corrispondenza del flusso termico scambiato nullo (65°C)

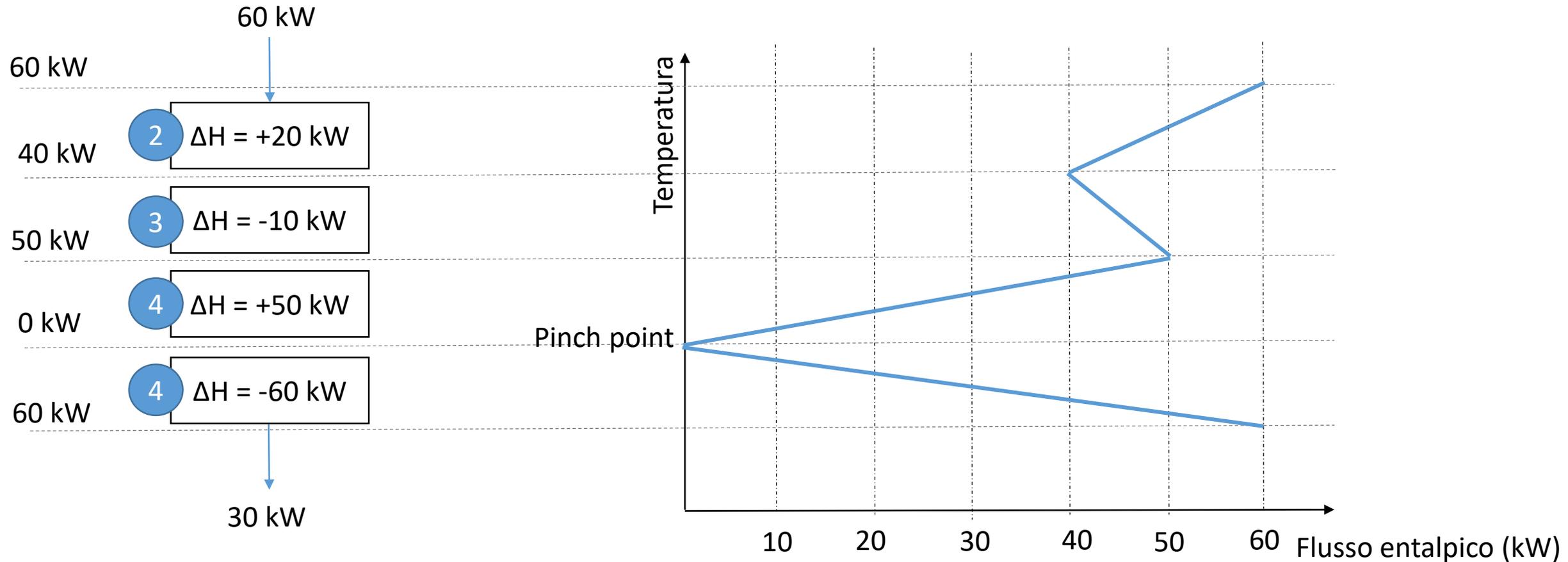
Problem Table – Riepilogo

Dall'analisi svolta con la Problem Table si possono presentare le seguenti casistiche:

1. Il valore minimo del flusso termico cumulato è **negativo** → tale valore rappresenta la minima quantità di calore che deve essere fornito da una sorgente esterna; sommando tale valore all'inizio della cascata si ottengono i nuovi valori (con 0 kW scambiati al PP) e la quantità rilasciata all'ambiente sarà ora la minima quantità rilasciata (Esempio 1)
2. Il valore minimo del flusso termico cumulato è **nullo** → il livello termico a cui corrisponde flusso termico nullo corrisponde al PP; in questo caso non richiede somministrazione di calore dall'esterno. Il flusso termico al termine della cascata rappresenta la quantità di calore da rilasciare all'esterno. Il problema sarà di soglia, con $\Delta T_{min} = \Delta T_{th}$
3. Il valore minimo del flusso termico cumulato è **positivo** → il Sistema non richiede calore dall'esterno, perché i flussi caldi interni sono sufficienti a riscaldare i flussi freddi; il valore minimo del flusso termico corrisponde anche alla minima quantità di calore che può essere sottratta dal sistema ad alta temperatura (Esempio 2)

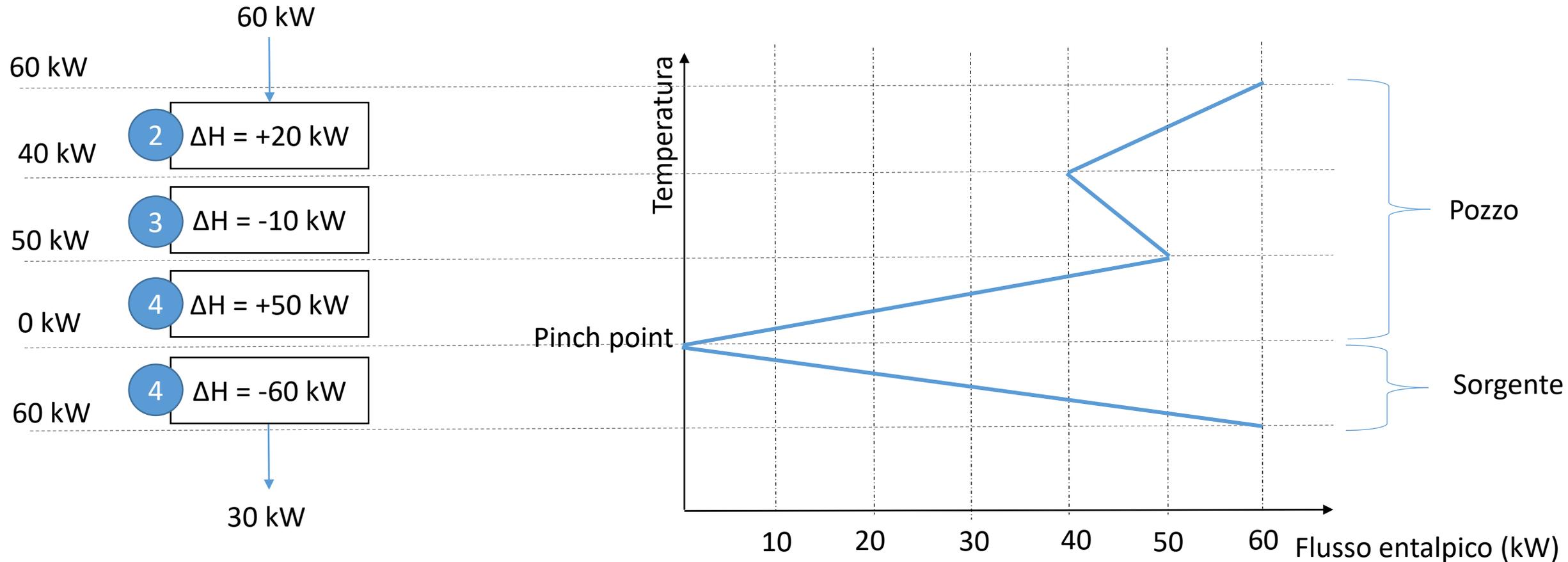
Grand Composite Curve (GCC)

Dal problem table è possibile ricavare direttamente la **Grand Composite Curve (GCC)** riportando per ogni ΔT il surplus (-) o deficit (+) di calore relativo a quel livello di temperatura



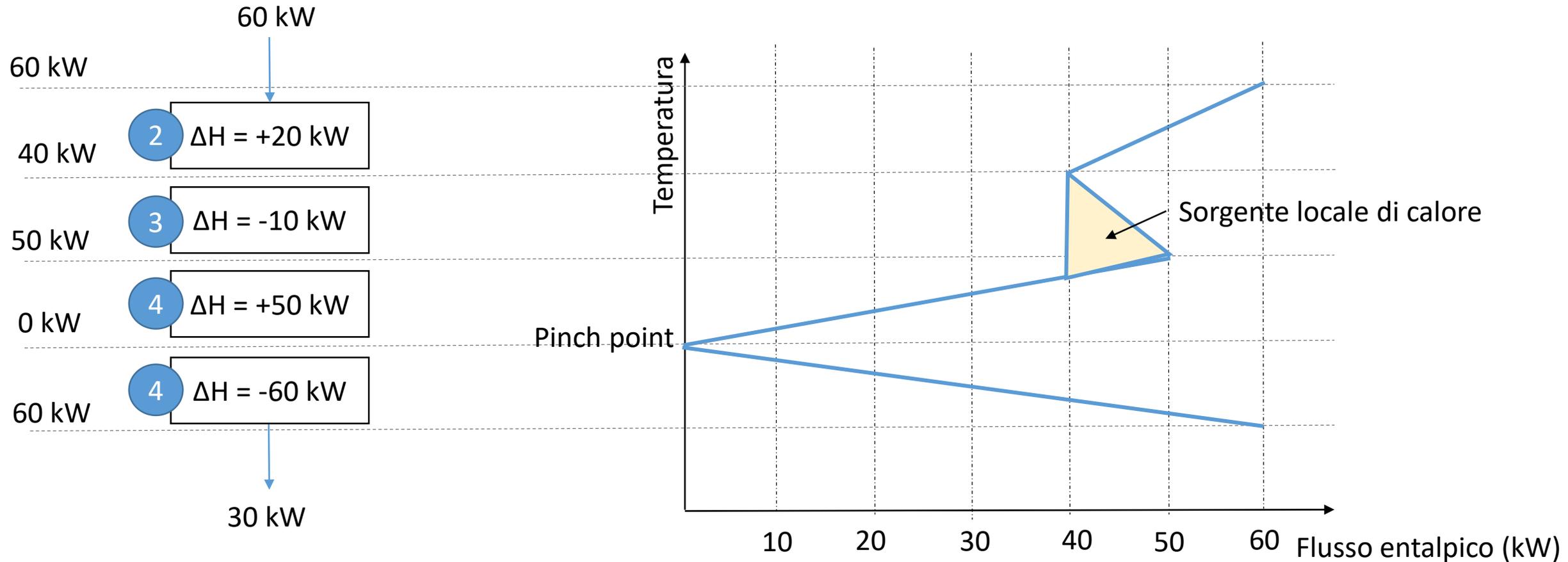
Grand Composite Curve (GCC)

Dal problem table è possibile ricavare direttamente la **Grand Composite Curve (GCC)** riportando per ogni ΔT il surplus (-) o deficit (+) di calore relativo a quel livello di temperatura



Grand Composite Curve (GCC)

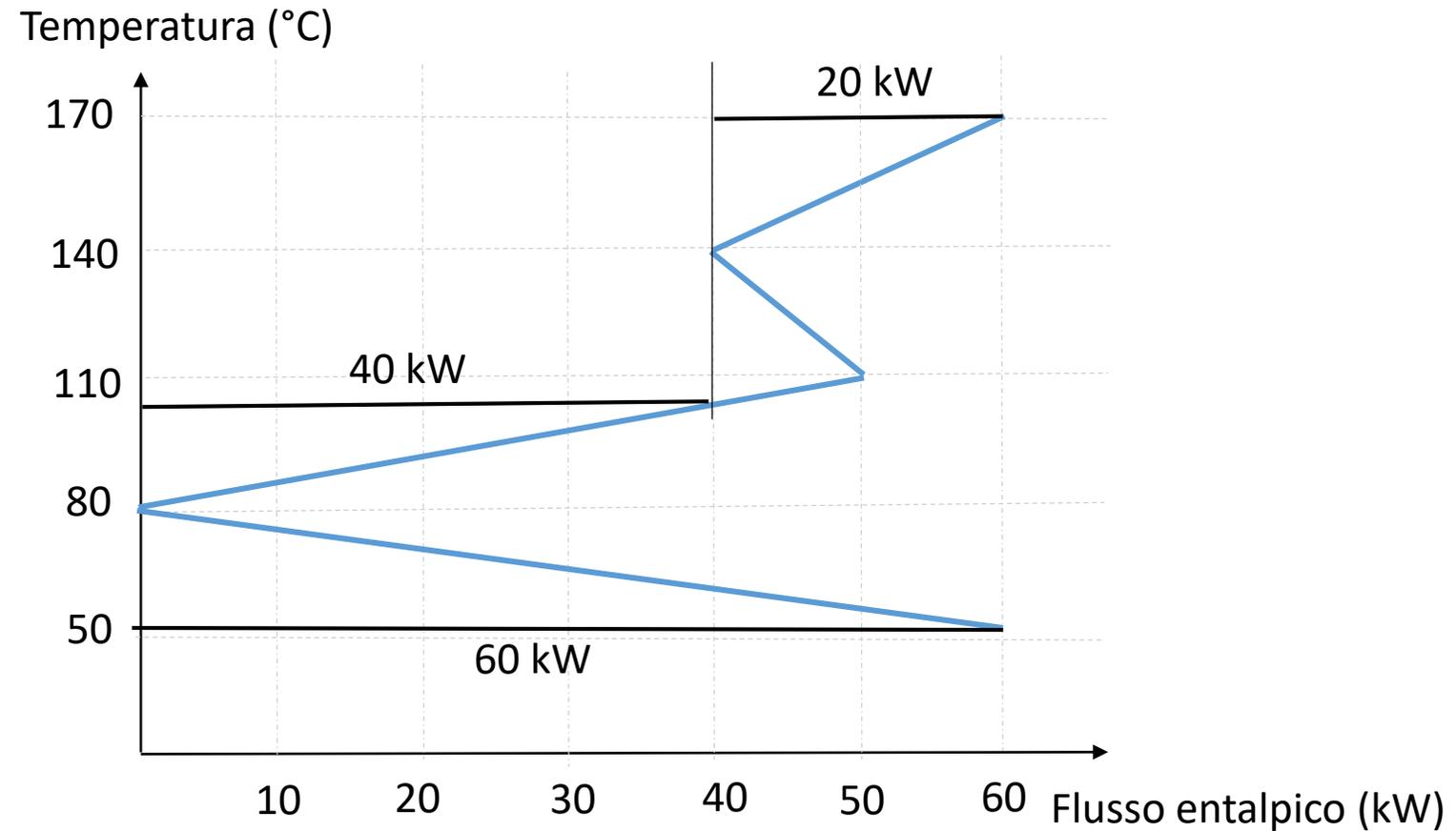
Dalla GCC è possibile anche individuare **pozzi e sorgenti locali di calore** nelle zone sopra e sotto il PP. Ad esempio nella GCC riportata in figura è evidenziata una sorgente locale di calore:



Grand Composite Curve (GCC)

La GCC consente anche di evidenziare i **livelli termici a cui fornire/sottrarre calore al sistema**

- 20 kW da fornire a 170 °C
- 40 kW da fornire a 100°C
- 60 kW ilasciati a 50°C



Pinch analysis



chiara.dall'armi@phd.units.it

Riferimenti

Linnhoff, B. (1989). Pinch technology for the synthesis of optimal heat and power systems

A. Lazzaretto, Appunti di sistemi energetici, Università degli Studi di Padova