

## Introduzione alla Pinch Analysis

### 1. Campo applicativo

La Pinch Analysis é un metodo di **ottimizzazione di reti complesse di scambiatori**, quali si possono verificare in situazioni nelle quali si presentano carichi termici e carichi di raffreddamento a diversi livelli di temperatura.

L'obiettivo della Pinch Analysis é quello di **minimizzare le interazioni con l'esterno** (sia di calore fornito al sistema ad alta temperatura – “Hot Utility” -  $Q_{hu}$  che di calore sottratto al sistema – “Cold Utility”  $Q_{cu}$ ). In tal modo si massimizza la rigenerazione interna, chiaramente al costo dell'adozione di scambiatori rigenerativi. Peraltro l'ottimizzazione cura l'accoppiamento delle correnti calde e fredde in modo da minimizzare la differenza “media” di temperatura; tale situazione é anche quella che minimizza le irreversibilit  (e, quindi, la reiezione termica all'ambiente). Pertanto, la Pinch Analysis – limitatamente ai fenomeni delle scambio termico, ovvero trascurando le irreversibilit  dovute agli attriti – costituisce di fatto un'ottimizzazione del tipo “Second-Law Analysis”, e corrisponde alla minimizzazione della distruzione di exergia nel processo dello scambio termico complesso. Il fatto di trascurare gli effetti degli attriti porta a problemi di incompleta ottimizzazione per recuperi da flussi di gas (o vapori), dove l'exergia distrutta per attrito pu  essere rilevante. E' sempre possibile condurre separatamente un'analisi exergetica, valutando l'entit  delle perdite per attrito e confrontandole con quelle del sistema (ottimizzato con la pinch analysis) di recupero termico.

Le applicazioni fondamentali della Pinch Analysis si trovano nell'industria chimica (produzione di composti di base per materie plastiche, raffinerie di petrolio,...) dove **carichi termici e di raffreddamento** si incontrano di frequente nelle stesse aree di impianto. La diminuzione dei carichi termici  $Q_{hu}$  limita il consumo di combustibile, mentre la riduzione dei carichi di raffreddamento  $Q_{cu}$  limita i problemi di interazione con l'ambiente (sotto forma di acqua di raffreddamento o di torri evaporative: soluzioni comunque costose per la reiezione termica).

Se in queste situazioni la Pinch Analysis svolge tutte le sue potenzialit , andando ad incidere sulla riduzione dei costi operativi dell'impianto (oltre che sui costi di costruzione, quantomeno per il sistema di raffreddamento), esistono casi nei quali il metodo pu  essere utilizzato per altri obiettivi. Ad esempio, nelle caldaie a recupero per cicli combinati gas vapore (in assenza di postcombustione), fissata la portata di gas combust, e la loro temperatura di ingresso e di uscita dalla caldaia, si verifica una situazione in cui il calore da recuperare é fissato, e non esistono interazioni con l'esterno ( $Q_{hu} = Q_{cu} = 0$ ). Definita la configurazione della caldaia (livelli di pressione: 2; 2+RH; 3), i livelli di pressione e temperatura del vapore, ed i valori di  $DT_{pinch}$ , le portate di vapore risultano determinate. In questo caso, l'applicazione della Pinch Analysis, garantendo di produrre il profilo pi  “omogeneo” di differenza di temperatura locale tra le due correnti, minimizza la superficie complessiva della caldaia a recupero: l'ottimizzazione si traduce quindi in un minor costo della caldaia.

## 2. Diagrammi Temperatura-Entalpia

La Pinch Analysis è stata ideata come un **metodo grafico**, basato sull'impiego dei **diagrammi Temperatura** (ordinata) – **Entalpia**. A titolo di esempio, la Figura 1 illustra tre casi di riferimento di accoppiamento tra due flussi di materia (uno da riscaldare, l'altro da raffreddare), che determinano le necessità di carico termico e di raffreddamento. I due flussi si considerano monofase (il metodo può essere generalizzato a situazioni che comprendono le transizioni di fase).

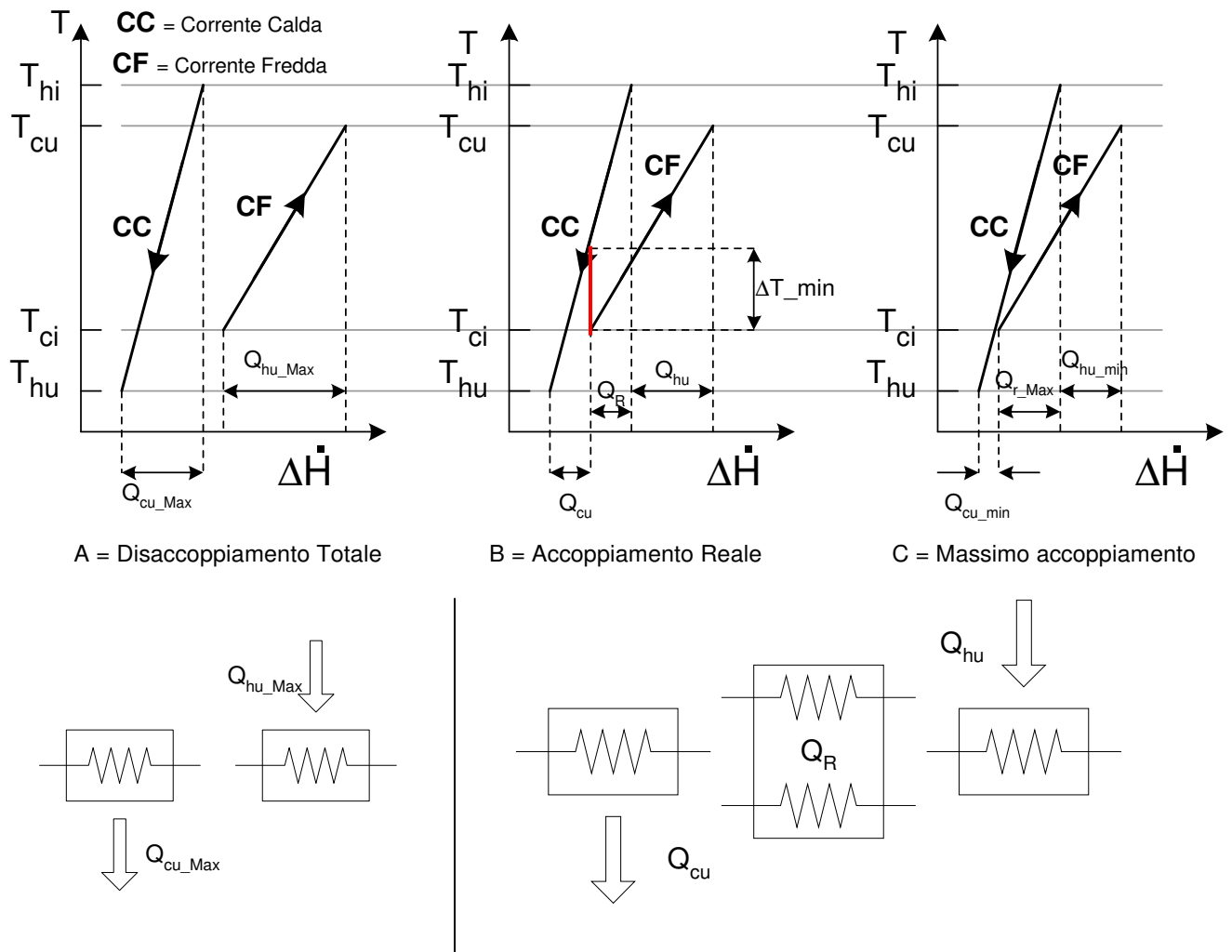


Figura 1 – Modifica delle interazioni termiche con l'esterno a seguito dell'introduzione della rigenerazione

Nel **caso A** non esiste alcun recupero. La corrente calda viene raffreddata per cessione di calore all'esterno (carico refrigerante  $Q_{cu\_max}$ ); la corrente fredda viene riscaldata per cessione di calore dall'esterno (carico termico  $Q_{hu\_max}$ ).

Nel **caso limite C**, introducendo uno scambiatore rigenerativo e spingendone ad infinito la superficie, si annulla localmente la differenza di temperatura tra le due correnti; conseguentemente, lo scambiatore rigenerativo trasferisce tra le due correnti la massima quantità di calore rigenerabile  $Q_{R\_max}$ ; le interazioni con l'esterno in termini di carico refrigerante ( $Q_{cu}$ ) e termico ( $Q_{hu}$ ) risultano minimizzate.

Il **caso B** (intermedio) rappresenta la **situazione reale**; inevitabilmente, la superficie dello scambiatore rigenerativo é finita e quindi si mantiene una differenza minima di temperatura  $\Delta T_{\min}$  tra le due correnti;  $Q_R$ ,  $Q_{cu}$  e  $Q_{hu}$  non sono minimizzati ma questi ultimi due sono considerevolmente ridotti rispetto al caso non recuperativo.

Nel caso A ( i calori sono valutati in valore assoluto):

$$Q_{hu\_max} = Q_h = m_c (h_{cu} - h_{ci}) = m_c c_{pc}(T_{cu} - T_{ci}) = (\Delta H)_c$$

$$Q_{cu\_max} = Q_c = m_h (h_{hi} - h_{hu}) = m_h c_{ph}(T_{hi} - T_{hu}) = (\Delta H)_h$$

La condizione di pinch (contatto tra le due curve) si può realizzare in diverse posizioni a seconda dei valori delle capacità termiche ( $m c_p$ )

- se  $m_h c_{ph} > m_c c_{pc}$  il contatto si verifica a temperatura  $T_{cu}$ , **vicino al lato caldo** dello scambiatore rigenerativo (Figura 2A)
- se  $m_c c_{pc} > m_h c_{ph}$  il contatto si verifica alla temperatura  $T_{ci}$ , **vicino al lato freddo** dello scambiatore rigenerativo (Figura 1C, 2B)
- se le due capacità termiche sono uguali le due curve evolvono parallele mantenendo nel caso limite nulla la loro differenza di temperatura.

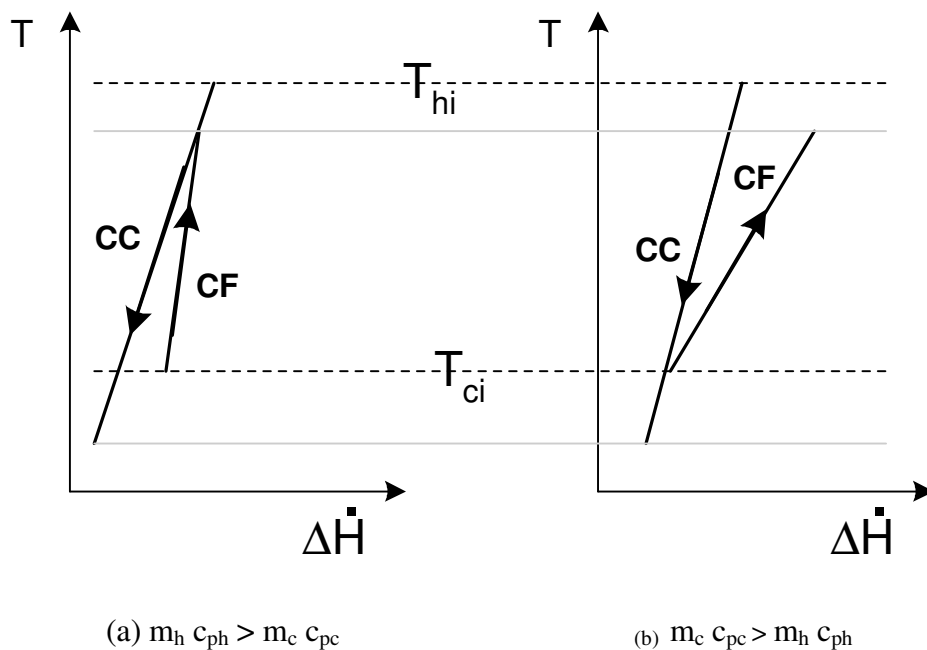


Figura 2 – Localizzazione del pinch in funzione della diversità delle capacità termiche tra le due correnti

Il **calore massimo rigenerabile** risulta pari a:

$$Q_{R\_max} = (m c_p)_{\min} (T_{hi} - T_{ci})$$

Infatti il fluido caldo non può essere raffreddato al di sotto di  $T_{ci}$  interagendo con la sola corrente fredda; ed il fluido freddo non può essere riscaldato al di sopra di  $T_{hi}$  interagendo con la sola corrente calda. Per ottenere lo scambio di  $Q_{R\_max}$  occorre arrivare al “contatto” al Pinch, ovvero una superficie infinita.

### 3. Curva composita e Pinch di processo – Soluzione grafica

Nell'esempio del paragrafo 2 si è studiata la possibile interazione tra due soli flussi (uno caldo ed uno freddo), comprendendo le interazioni termiche con l'esterno (carichi termici e di raffreddamento).

La Pinch Analysis trova le applicazioni più interessanti nei casi in cui esistono più flussi caldi da raffreddare e più flussi freddi da riscaldare: il primo passo è costruire le **curve composite del lato caldo** (da raffreddare) e **del lato freddo** (da riscaldare).

L'esempio seguente (Tabella 1) è tratto da Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996).

Id. corrente	$T_i$ [K]	$T_u$ [K]	$m c_p$ [kW/K]	$\Delta H$ [kW]
1 - h	400	310	2.0	180
2 - c	300	390	1.8	162
3 - c	330	370	4.0	160
4 - h	450	350	1.0	100

h = calda da raffreddare (hot)      c = fredda da riscaldare (cold)

Tabella 1 – Esempio di costruzione delle curve composite

L'applicazione del metodo nella forma semplificata richiede alcune assunzioni:

- si adotta una configurazione in controcorrente per gli scambiatori di calore
- l'entalpia dipende unicamente dalla temperatura
- si trascurano le dispersioni di calore all'esterno
- si trascurano le variazioni di energia cinetica e potenziale
- il calore specifico di ogni corrente si mantiene costante

In primo luogo vengono riportati in un grafico (Figura 3) le rette<sup>1</sup> temperatura-entalpia per le quattro correnti, spaziandole arbitrariamente lungo l'ascissa:

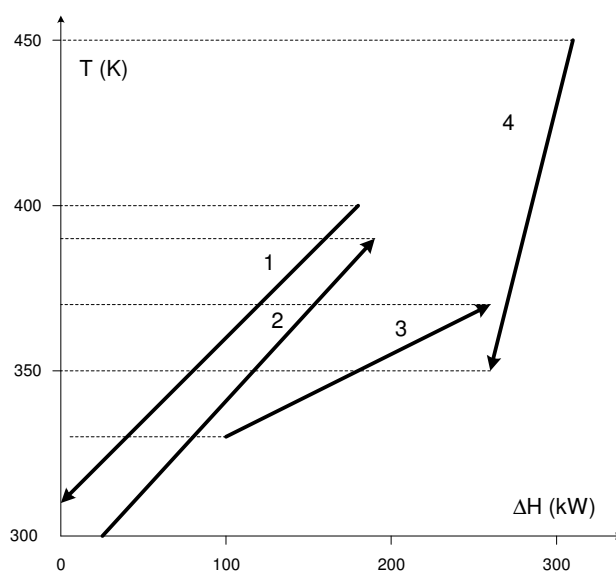


Figura 3 – Grafico T-  $\Delta H$  per tutte le correnti

<sup>1</sup> "Rette" in base all'ipotesi (e),  $c_p$  costante; chiaramente i tools applicativi di Pinch analysis possono facilmente essere applicati a tratti tenendo conto della progressiva variazione del  $c_p$  (si tratta allora di curve e non di rette).

La figura 3 consente di identificare **intervalli di temperatura caratteristici** di questo sistema, prima per la corrente calda e poi per quella fredda; e di associare a ciascuno di essi una potenza termica scambiata sull'intervallo. La situazione é sintetizzata nella tabella 2:

Intervallo T	Alta	Bassa	Correnti	Espressione Flusso	$m c_p$ (kW/K)	Flusso kW	Id. flusso (Fig. 4)
450-400	$T_{i4}$	$T_{i1}$	4H	$m_4 c_{p4}$ (450-400)	1	50	$\Delta H_3$
400-350	$T_{i1}$	$T_{u4}$	4H, 1H	$(m_4 c_{p4} + m_1 c_{p1})$ (400-350)	3	150	$\Delta H_4$
350-310	$T_{u4}$	$T_{u1}$	1H	$m_1 c_{p1}$ (350-310)	2	80	$\Delta H_5 + \Delta H_6 + Q_{cu}$
390-370	$T_{u2}$	$T_{u3}$	2C	$m_2 c_{p2}$ (390-370)	1,8	36	$\Delta H_1$
370-330	$T_{u3}$	$T_{i3}$	2C, 3C	$(m_2 c_{p2} + m_3 c_{p3})$ (370-330)	5,8	232	$\Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5$
330-300	$T_{i3}$	$T_{i2}$	2C	$m_3 c_{p3}$ (330-300)	1,8	54	$\Delta H_6$

Tabella 2 – Costruzione dei flussi termici

La tabella precedente consente di graficare di nuovo la curva (detta adesso curva composta) su di un piano T-  $\Delta H$ ; la curva superiore (**curva composta calda**) e quella inferiore (**curva composta fredda**) sono indipendenti e possono essere **traslate sull'asse delle ascisse**; convenzionalmente si trasla una delle due (ad esempio quella fredda) in modo da determinare il valore desiderato della **differenza di temperatura al pinch** (10K nella figura 4).

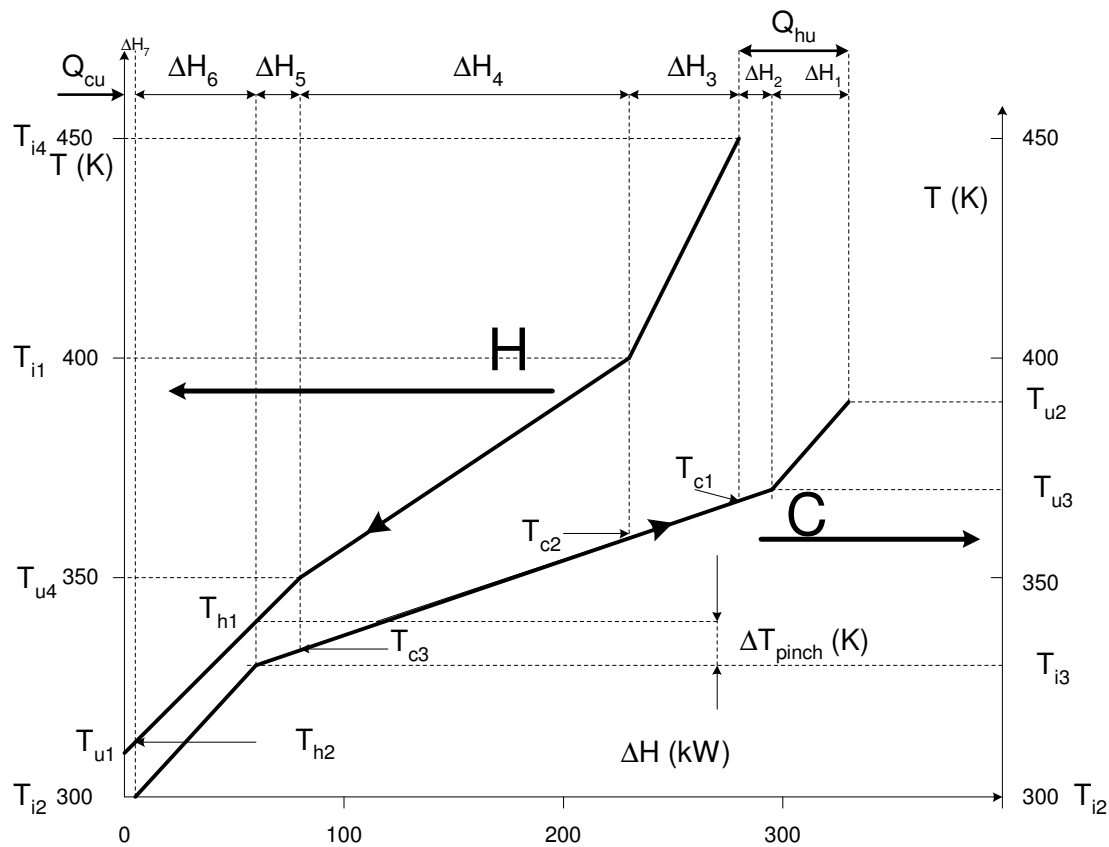


Figura 4 – Curva composta del sistema

Le temperature incognite  $T_{pinch}$ ,  $T_{h1}$ ,  $T_{h2}$  di figura 4 sono determinate dalla condizione di pinch e dai bilanci di energia, condotti a sinistra (lato freddo) a partire dal pinch:

$$T_{pinch} = T_{i3} = 330 \text{ K}$$

$$T_{h1} = T_{pinch} + \Delta T_{pinch} = 330 + 10 = 340 \text{ K}$$

$$T_{h2} = T_{h1} - \Delta H_6 / (m_1 c_{p1}) = 340 - 54/2 = 313 \text{ K}$$

$$Q_{cu} = (m_1 c_{p1}) * (T_{h2} - T_{u1}) = 6 \text{ kW}$$

Dalla tabella 2 é possibile ora per sostituzione ricavare i flussi mancanti:

$$\Delta H_5 = 80 - \Delta H_6 - Q_{cu} = 80 - 54 - 6 = 20 \text{ kW}$$

$$\Delta H_2 = 232 - (\Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5) = 232 - (50 + 150 + 20) = 12 \text{ kW}$$

Le temperature incognite  $T_{c3}$ ,  $T_{c2}$ ,  $T_{c1}$  di figura 4 sono determinate dalla condizione di pinch e dai bilanci di energia, condotti a destra (lato caldo) a partire dal pinch:

$$T_{c3} = T_{pinch} + \Delta H_5 / (m_2 c_{p2} + m_3 c_{p3}) = 330 + 20/5,8 = 333,45 \text{ K}$$

$$T_{c2} = T_{pinch} + (\Delta H_4 + \Delta H_5) / (m_2 c_{p2} + m_3 c_{p3}) = 330 + (150 + 20) / 5,8 = 359,31 \text{ K}$$

$$T_{c1} = T_{pinch} + (\Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5) / (m_2 c_{p2} + m_3 c_{p3}) = 330 + (50 + 150 + 20) / 5,8 = 367,93 \text{ K}$$

La curva composta così ricavata determina graficamente la lettura dei flussi termici sull'asse delle ascisse.

Conseguentemente ai valori di temperatura sono stati inseriti i valori delle temperature in tabella e sono stati calcolati i valori di  $\Delta T_{ml}$  - limitatamente agli scambi di calore tra i due flussi - lungo i 4 tratti in cui viene suddiviso lo scambiatore rigenerativo, mediante la formula:

$$\Delta T_{ml} = [(T_{hH} - T_{cH}) - (T_{hL} - T_{cL})] / \ln[(T_{hH} - T_{cH}) / (T_{hL} - T_{cL})]$$

	Espressione flusso	KW	T <sub>hH</sub> (K)	T <sub>hL</sub> (K)	T <sub>cH</sub> (K)	T <sub>cL</sub> (K)	ΔT <sub>ml</sub> (K)	S (m <sup>2</sup> )
Q <sub>hu</sub>	ΔH <sub>1</sub> =m <sub>2</sub> c <sub>p2</sub> (T <sub>u2</sub> -T <sub>u3</sub> )	36	---	---	390	370		
48 kW	ΔH <sub>2</sub> =(m <sub>2</sub> c <sub>p2</sub> + m <sub>3</sub> c <sub>p3</sub> ) *(T <sub>u3</sub> - T <sub>c1</sub> )	12	---	---	370	T <sub>c1</sub> = 367, 93		
ΔH <sub>3</sub>	(m <sub>4</sub> c <sub>p4</sub> ) (T <sub>i4</sub> - T <sub>i1</sub> )	50	450	400	T <sub>c1</sub> = 367, 93	T <sub>c2</sub> = 359, 31	58,97	1,70
ΔH <sub>4</sub>	(m <sub>4</sub> c <sub>p4</sub> + m <sub>1</sub> c <sub>p1</sub> ) (T <sub>i1</sub> - T <sub>u4</sub> )	150	400	350	T <sub>c2</sub> = 359, 31	T <sub>c3</sub> = 333, 45	26,84	11,18
ΔH <sub>5</sub>	(m <sub>1</sub> c <sub>p1</sub> ) (T <sub>u4</sub> - T <sub>h1</sub> )	20	350	T <sub>h1</sub> = 340	T <sub>c3</sub> = 333, 45	330	13,00	3,08
ΔH <sub>6</sub>	(m <sub>1</sub> c <sub>p1</sub> ) (T <sub>h1</sub> - T <sub>h2</sub> )	54	T <sub>h1</sub> = 340	T <sub>h2</sub> = 313	330	300	11,43	9,45
Q <sub>cu</sub> =ΔH <sub>7</sub> 6 kW	(m <sub>1</sub> c <sub>p1</sub> ) * (T <sub>h2</sub> - T <sub>u1</sub> )	6	T <sub>h2</sub> = 313	310	---	---		

Tabella 3 – Calcolo dei valori di temperatura, dei ΔT<sub>ml</sub> e delle superfici di scambio

I valori delle superfici per gli scambi termici con l'esterno (Q<sub>hu</sub> e Q<sub>cu</sub>) non sono calcolati in quanto dipendono dal profilo di temperatura dell'utenza esterna con la quale si intende accoppiarli. Al riguardo, per lo scambio termico inferiore (carico refrigerante), che presenta un'escursione di temperatura pari a 3°C, si può raccomandare un sistema esterno<sup>2</sup> che presenti capacità termica circa pari a Q<sub>cu</sub>/ΔT = 6/3 = 2 kW/K; mentre per lo scambio superiore é raccomandabile l'utilizzo di un flusso che presenti se possibile un'escursione termica di circa 22,1°C (ovvero, una capacità termica pari a Q<sub>hu</sub>/ΔT = 48/22 ~ 2,2 kW/K).

I valori calcolati di Q<sub>cu</sub> = 6 kW e Q<sub>hu</sub> = 48 kW sono quelli che corrispondono ad un ΔT<sub>pinch</sub> = 10 K; i valori minimi teorici (superficie infinita) si otterrebbero con ΔT<sub>pinch</sub> = 0; cambiando il valore di ΔT<sub>pinch</sub> occorre sempre ricalcolare i valori di ΔT<sub>ml</sub>, che risultano alterati.

Il metodo, conoscendo il valore locale del coefficiente globale di scambio K, consente un dimensionamento di primo tentativo degli scambiatori rigenerativi, secondo la formula:

$$S = Q / (K \Delta T_{ml})$$

Nella tabella 3, a titolo del tutto esemplificativo, si é adottato un valore costante di K = 0,500 kW(m<sup>2</sup>°C) per calcolare le superficie di scambio indicativamente necessarie.

<sup>2</sup> Esempi di sistemi esterni: Motore a combustione interna (bassa capacità termica), turbina a gas (alta capacità termica), pompa di calore (alta capacità termica), combustori (capacità termica variabile), scambiatori di calore con refrigerante esterno (aria/acqua, capacità termica variabile),

La figura 5 mostra la curva composta così come viene calcolata dall'applicativo excel realizzato da studenti del corso di Termodinamica e Termoeconomia 2004/05.

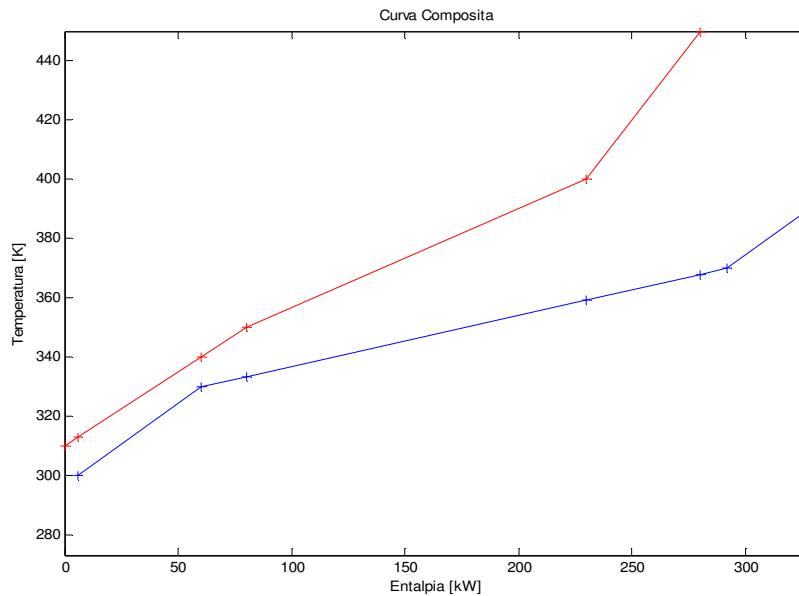


Figura 5 – Restituzione grafica xls della curva composta relativa all'esempio di calcolo

### 3. Programmazione del metodo

Il metodo introdotto sotto forma grafica si presta ad un'implementazione numerica.

#### Dati:

Numero di flussi caldi da raffreddare  $N_h$

Numero di flussi freddi da riscaldare  $N_c$

Per ogni flusso (caldo o freddo): portata, calore specifico, Temperatura ingresso  $T_i$ , Temperatura di uscita  $T_u$

Valore del  $\Delta T_{\min}$  ammissibile al pinch di processo

Valori indicativi dei coefficienti globali di scambio

#### Variabili in uscita:

Curva composta con identificazione degli accoppiamenti raccomandati per lo scambio termico rigenerativo

$Q_{hu,\min}$

$Q_{cu,\min}$

Carico termico di ciascun scambiatore rigenerativo

$\Delta T_{ml}$  di ciascun scambiatore rigenerativo

Superficie indicativa di ciascun scambiatore rigenerativo



Passi della procedura:

- 1) Calcolare i prodotti  $mc_p$  ed i flussi termici  $(mc_p) (T_u - T_i)$  per ognuna delle correnti specificate, calde e fredde
- 2) Ridurre tutte le temperature dei flussi caldi di  $\Delta T_{\min}/2$  ed aumentare tutte le temperature dei flussi freddi di  $\Delta T_{\min}/2$
- 3) Costruire un diagramma monodimensionale come in Figura 6 od una tabella delle temperature modificate in modo da identificare gli intervalli rilevanti:

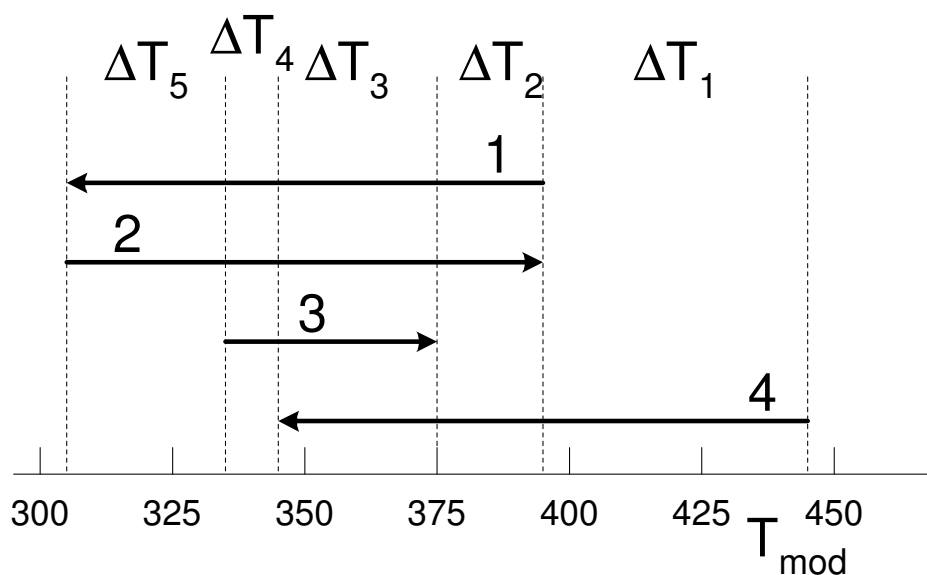


Figura 6 Diagramma delle temperature modificate

- 4) Iniziando dall'intervallo di temperatura modificata più alto, calcolare il calore da trasferire (con l'esterno o rigenerativamente) sull'intervallo, con la formula:

$$Q_i = \left[ \sum_{\text{cold}} (m c_p)_{\text{cold}} - \sum_{\text{hot}} (m c_p)_{\text{hot}} \right] \Delta T_i$$

Un valore di  $Q_i$  **negativo** indica che **esiste un eccesso di energia disponibile da parte delle correnti calde nell'intervallo  $\Delta T_i$** ; questo eccesso può essere utilizzato per riscaldare correnti fredde a temperature più basse; oppure, per temperature al di sotto del pinch, l'eccesso di calore disponibile può essere trasferito ad un'utenza termica di tipo freddo (es. fornitura di calore per cogenerazione, riscaldamento, servizi sanitari,.....).

Un valore di  $Q_i$  **positivo** indica che **esiste un difetto di energia disponibile da parte delle correnti calde nell'intervallo  $\Delta T_i$** ; a questo difetto si può far fronte recuperando calore eventualmente disponibile a temperatura più elevata, oppure ricorrendo ad un'utenza termica esterna di tipo caldo (es. scarico di un MCI, di una TG, di un processo; oppure, combustione).

La tabella 4 seguente esemplifica nella colonna 3 il calcolo dei flussi relativi agli intervalli mostrati in Figura 5 e riportati in colonna 2.

Colonna 1	Colonna 2	Colonna 3	Colonna 4	Colonna 5
Intervallo di temperatura n.	T <sub>sup/inf</sub> K	Q <sub>i</sub> kW	Σ Q <sub>i</sub> kW	Σ Q <sub>i</sub> * kW
			0	-48
1	445/395	-50	-50	-98
2	395/375	-24	-74	-122
3	375/345	84	+10	-38
4	345/ <b>335</b>	38	<b>+48</b>	0
5	335/305	-6	+42	<b>-6</b>

Tabella 5 – Calcolo dei flussi termici per intervallo modificato di temperatura

- 5) Si calcola il valore cumulativo dello scambio termico al termine dell'intervallo i-esimo con la formula:

$$\Sigma Q_i = \sum_{j=1}^i Q_j$$

considerando i segni dei diversi Q<sub>i</sub>. I valori sono riportati nella colonna 4 di Tabella 5.

Valori negativi indicano la possibilità di trasferire la quantità di calore cumulativa indicata all'intervallo di temperatura immediatamente inferiore.

**Il valore positivo più elevato (48 kW nell'esempio) indica il valore del minimo carico termico Q<sub>hu</sub> per l'utenza calda.**

- 6) Si calcola un valore corretto dello scambio termico cumulativo con la formula:

$$\Delta Q_i^* = \sum_{j=1}^i Q_j - Q_{hu}$$

I valori di ΔQ<sub>i</sub>\* sono riportati nella colonna 5 di Tabella 5.

**Il valore inferiore dell'intervallo di temperatura per il quale ΔQ<sub>i</sub>\* = 0 viene chiamato temperatura media del pinch (335 K nel caso presente).**

Le temperature reali della corrente calda e fredda sono ottenute rispettivamente aggiungendo o sottraendo ΔT<sub>pinch</sub>/2.

**Il valore di Q<sub>cu</sub> è identificato come il valore di ΔQ<sub>i</sub>\* per la temperatura di processo più fredda.**

#### 4. Grand Composite Curve

Il calcolo dei  $\Delta Q_i^*$  esemplificato al punto (6) del precedente paragrafo può essere interpretato termodinamicamente per via grafica, portando alla costruzione della Grand Composite Curve (GCC).

La GCC viene costruita riportando in ascissa i valori di  $-\Delta Q_i^*$ , ed in ordinata la temperatura  $T^*$  (la  $T$  reale sfalsata di  $\Delta T_{pinch}/2$ ) dei flussi corrispondenti (ultima e seconda colonna della Tabella 5, nell'esempio). La curva così costruita rappresenta sulle ascisse l'eccesso od il difetto di energia su ciascun intervallo di temperatura di riferimento. La Grand Composite Curve relativa all'esempio è rappresentata in Figura 7:

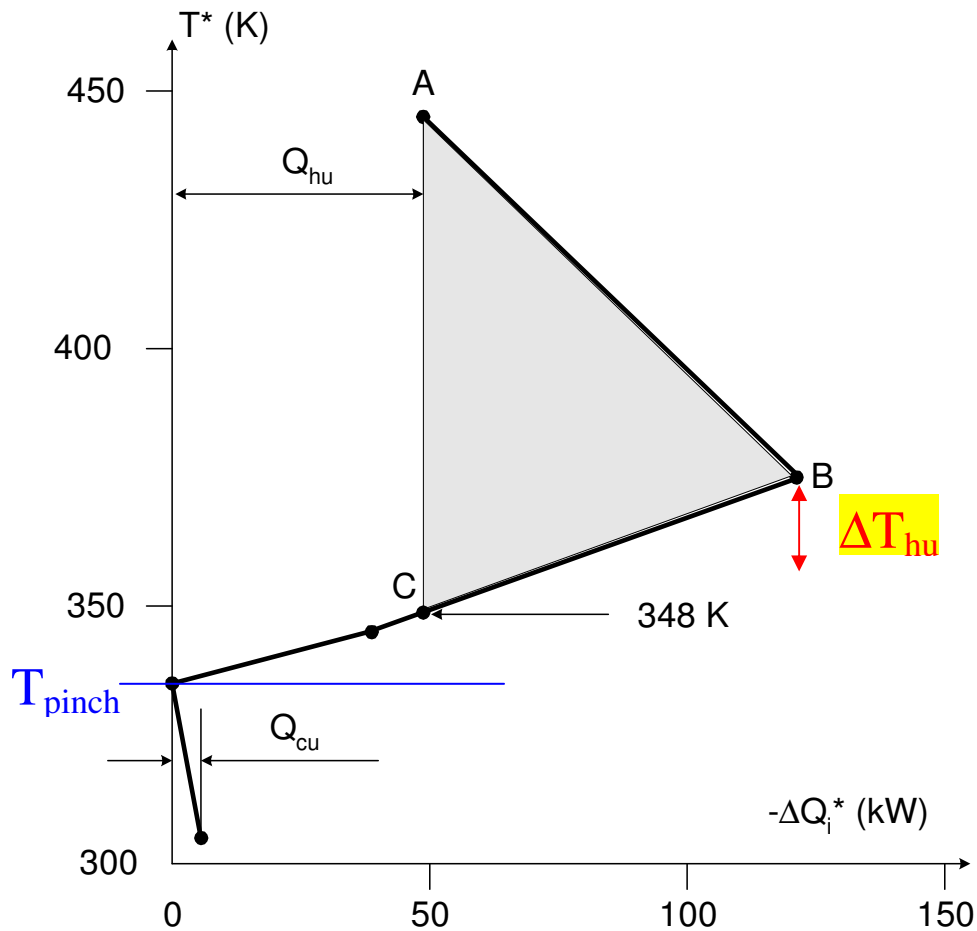


Figura 7 Grand Composite Curve (Esempio)

La GCC è utile per evidenziare la quantità e qualità dei fabbisogni di carico termico esterno.

Ad esempio, l'area grigia di Figura 7 rappresenta la possibilità di copertura interna dei fabbisogni delle correnti fredde mediante recupero di calore dalle correnti calde.

Poiché l'area grigia inizia alle temperature più calde, è evidente che il carico termico  $Q_{hu}$  non deve necessariamente essere fornito a temperature elevate: in effetti, è sufficiente una sorgente a temperatura superiore a  $T_C = 348 + \Delta T_{pinch}/2 = 353$  K.

I 48 kW corrispondenti a  $Q_{hu}$  servono per riscaldare correnti fredde nella fascia 335-343 K (temperature reali, ottenute dalle  $T^*$  sottraendo  $\Delta T_{pinch}/2$ ).

Poiché l'escursione termica nello scambio termico relativo a  $Q_{hu}$  é modesta (8 K) sarebbe naturale scegliere un fluido ad elevata capacità termica, ad esempio vapore condensante a pressione appropriata (capacità termica infinita).

Se invece alla cessione di  $Q_{hu}$  dall'esterno si accompagnasse una forte escursione di temperatura, sarebbe più indicato scegliere un'interazione con una corrente a bassa capacità termica (e forte escursione di temperatura), come ad esempio un recupero da gas combusti di un motore.

La GCC, interpretata nell'ottica dell'analisi exergetica, consente anche di identificare le **componenti inevitabili e quelle ottimizzabili della distruzione di exergia**: l'area grigia ABC rappresenta scambi termici (ed associati livelli di temperatura) bloccati dal recupero ottimizzato (con il vincolo del  $\Delta T_{pinch}$  specificato!) tra le correnti fredde e calde definite; la distruzione di exergia corrispondente risulta essere "inevitabile"<sup>3</sup>.

La distruzione di exergia conseguente alle interazioni delle correnti con l'esterno ( $Q_{hu}$  e  $Q_{cu}$ ) richiede invece la corretta definizione della tipologia della "sorgente" da utilizzare, e può quindi essere soggetta ad ottimizzazione al fine di ridurla nei limiti del possibile (in sostanza, adottando sempre un accoppiamento delle capacità termiche tra corrente e "sorgente", in modo da mantenere un  $\Delta T$  il più possibile costante)

### **Bibliografia**

Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., 1996 "Thermal Design and Optimization, Wiley.

Linnhoff, B., et al., 1982, "A user guide on process integration for the efficient use of energy", Institution of Mech. Eng., 1982.

Linnhoff, B., 1989, "Pinch technology for the synthesis of optimal heat and power systems", J. Energy Res. Tech., 111, 137-148.

---

<sup>3</sup> "Inevitabile" con la rete dei processi definita. Se è possibile alterare la rete dei processi (ad esempio dividendo le portate dove le capacità termiche sono eccessive, e destinando la portata in eccesso all'integrazione con altri processi, il vincolo viene a cadere.