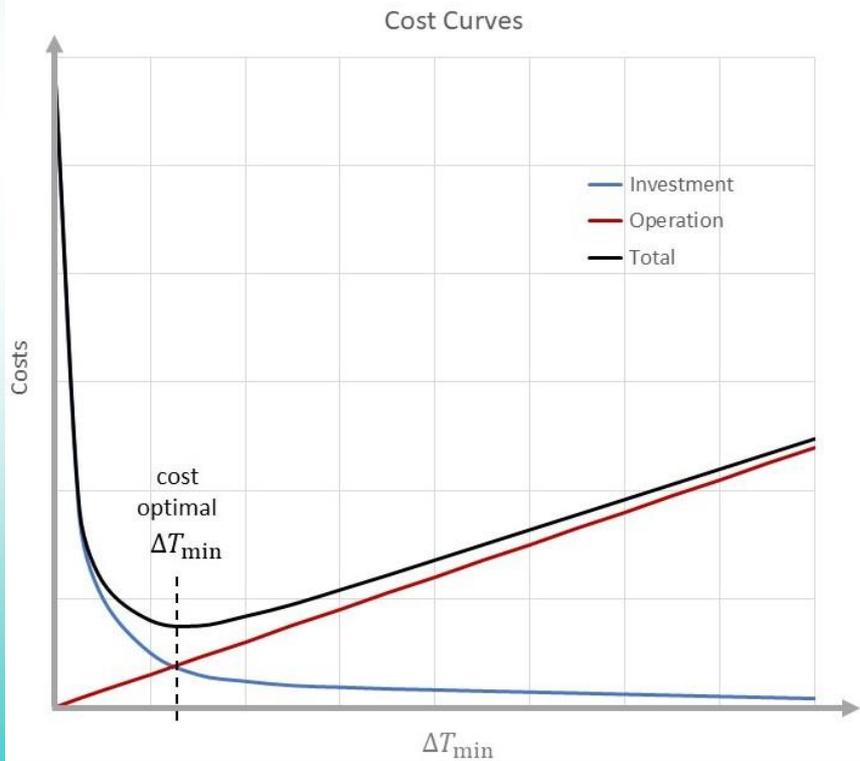
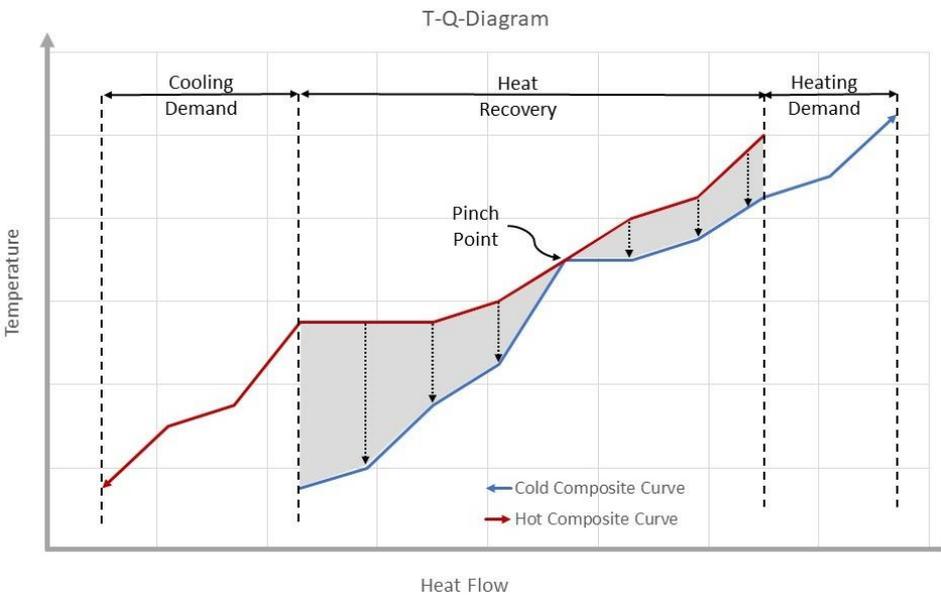
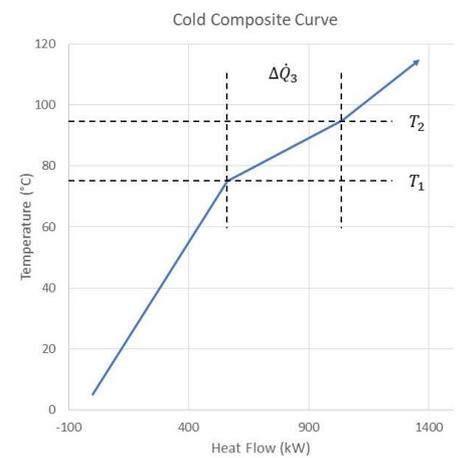
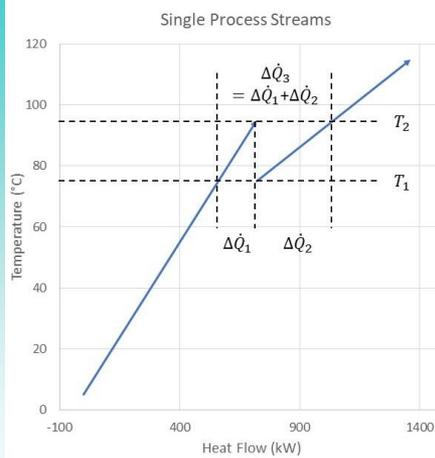
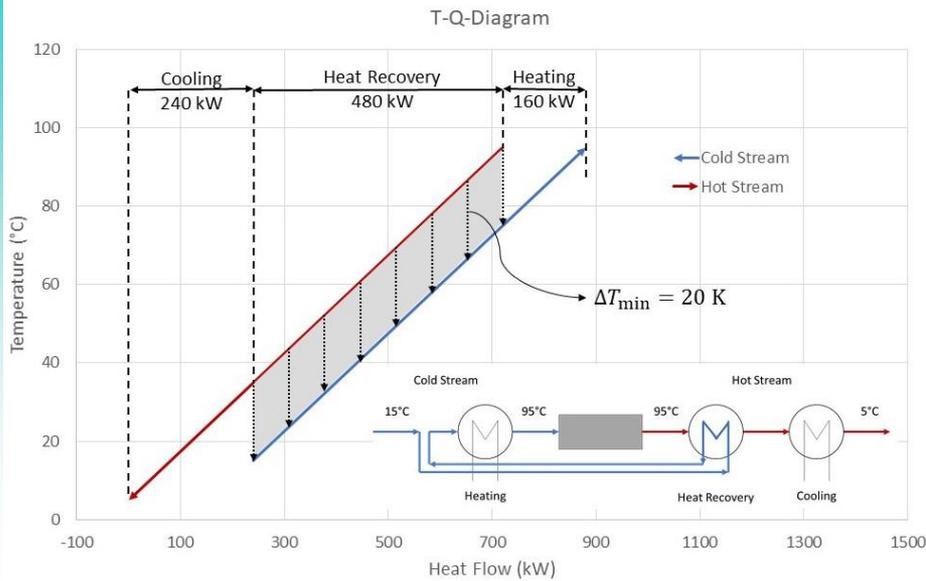


Integración energética



Procedimiento para el diseño de redes de Intercambio de calor

1. Determinar objetivos

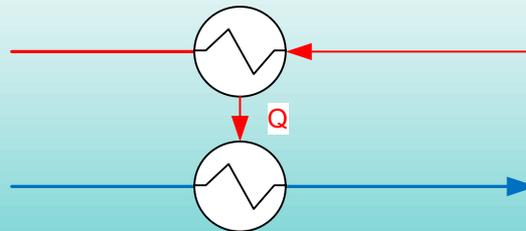
- Metas de energía: Máxima recuperación de energía.
- Metas de capital:
 - ✓ **Mínimo número de unidades de transferencia de calor.**
 - ✓ **Mínima área total de transferencia de calor.**

2. Generar alternativas para alcanzar las metas (caso base, MER).

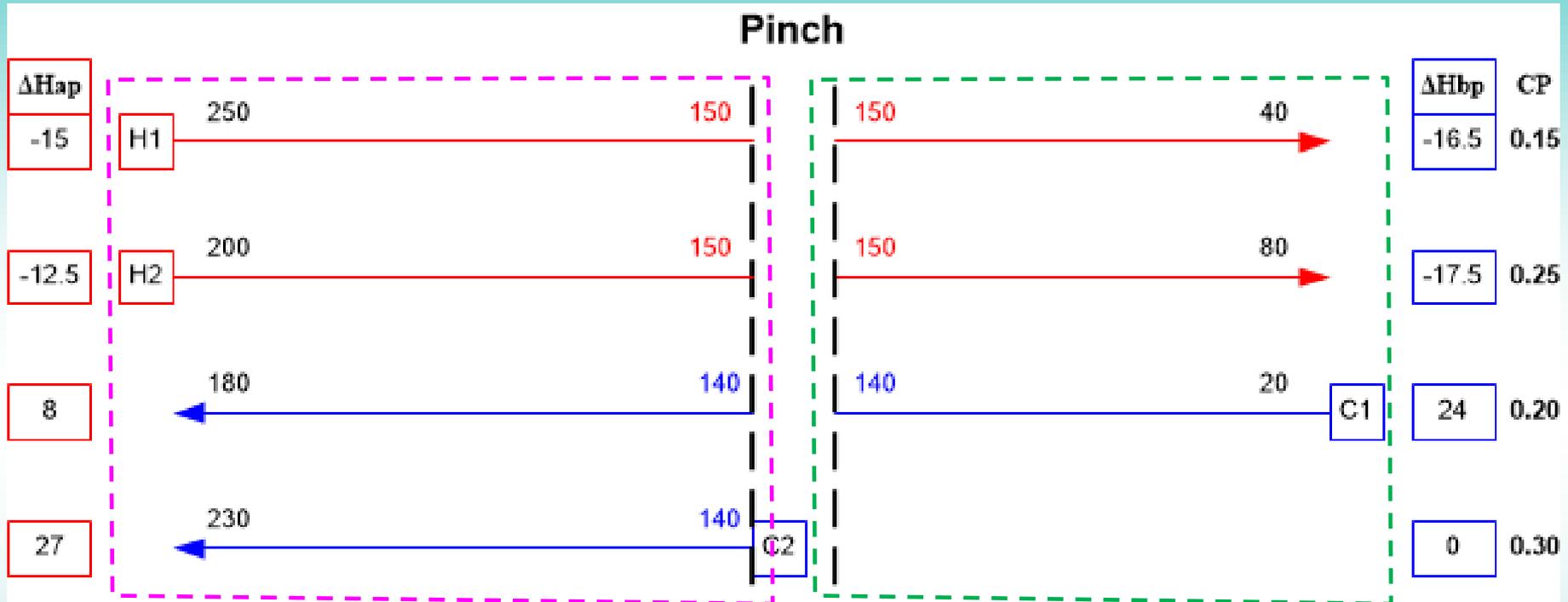
3. Modificar las alternativas basadas en consideraciones prácticas.

4. Diseño de equipo y determinación de costo para cada alternativa.

5. Selección de la alternativa técnico/económico más conveniente.



Cuál es el punto pinch?



$QH_{min} = 7,5 \text{ MW}$

Arriba del pinch

$QC_{min} = 10 \text{ MW}$

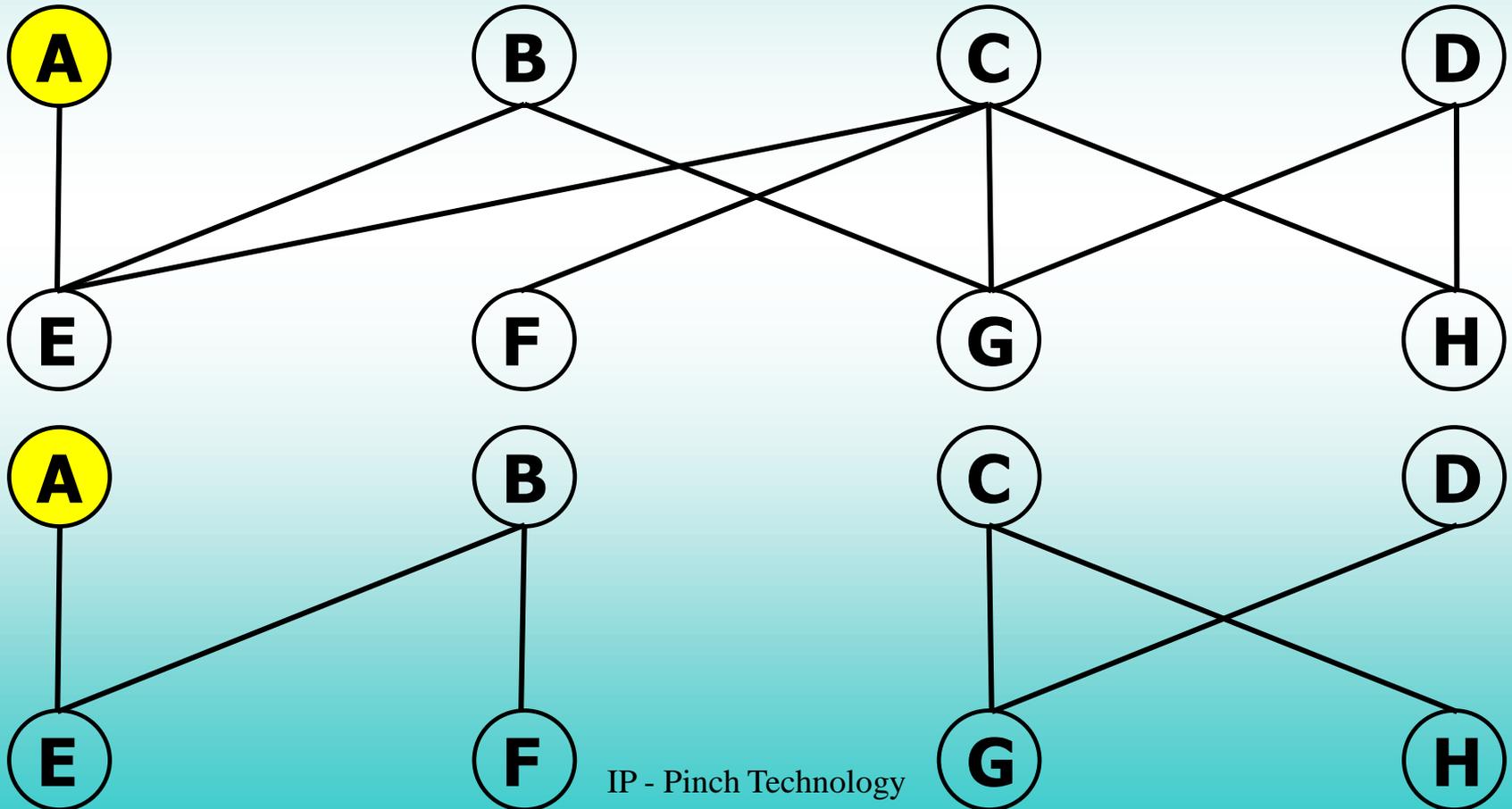
Abajo del pinch

¿Cuántas corrientes hay arriba del pinch?

¿Cuántas corrientes hay abajo del pinch?

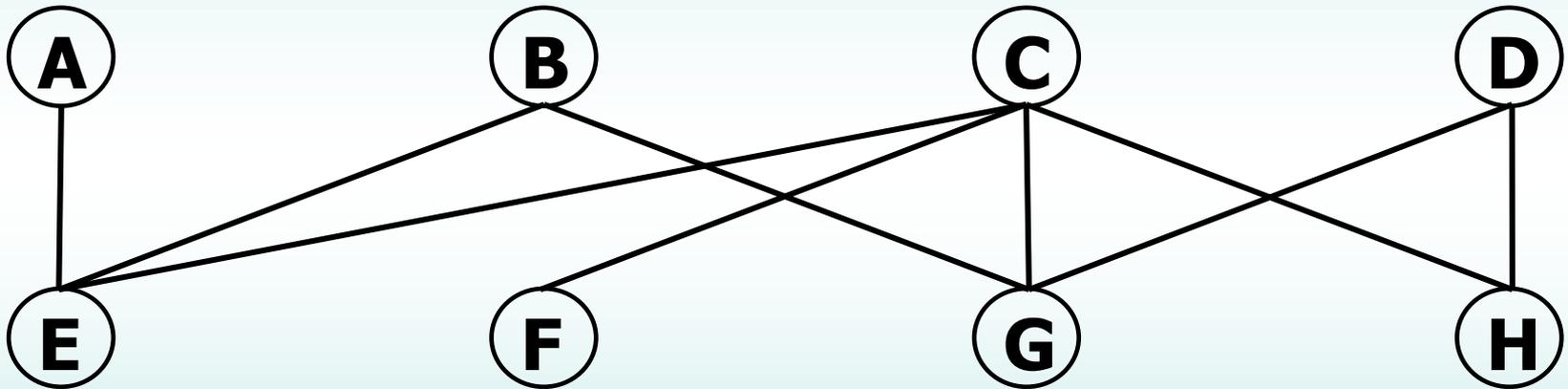
Número de unidades de intercambio

- Para analizar el mínimo número de intercambiadores se usaran algunos resultados de la **teoría de grafos**.
- Un grafo es un conjunto de puntos, **nodos**, y **aristas** que vinculan algunos de los nodos por pares.
- En este grafo cada arista representa una conexión entre los nodos. Las aristas no se cruzan.



Número de Intercambios

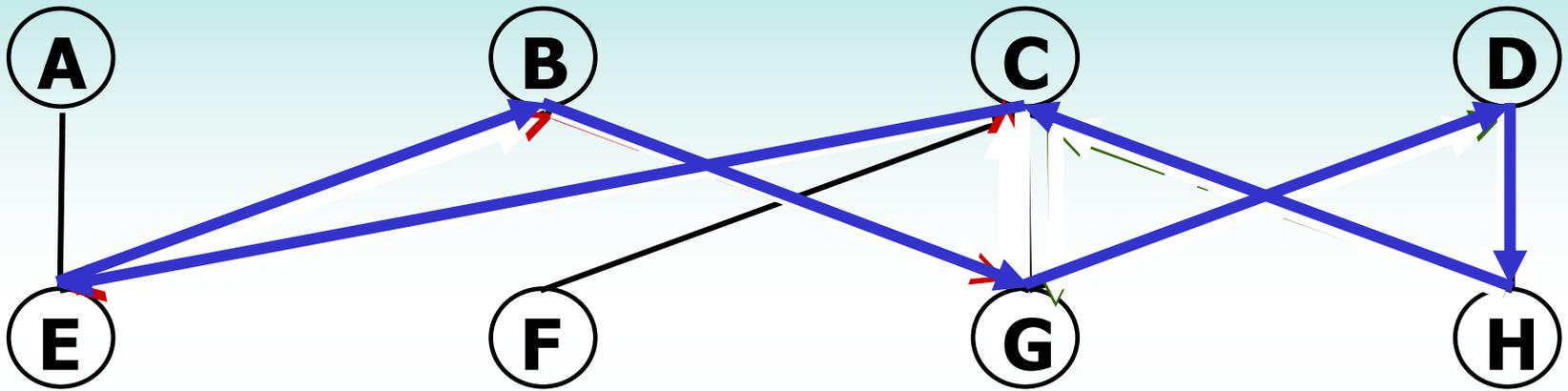
- En esta representación los **nodos** corresponden a las corrientes de proceso o servicios.
- Las **aristas** representan los intercambiadores que transfieren energía entre dos corrientes, una fuente y la otra, sumidero.



- Un **camino** es una secuencia de aristas distintas.
- Un grafo está **conectado** si existe un camino que une todos los nodos.
- Si un grafo no está conectado tiene **subsistemas independientes**.

Número de Intercambiadores

- Un **ciclo** es un camino que comienza y termina en el mismo nodo.

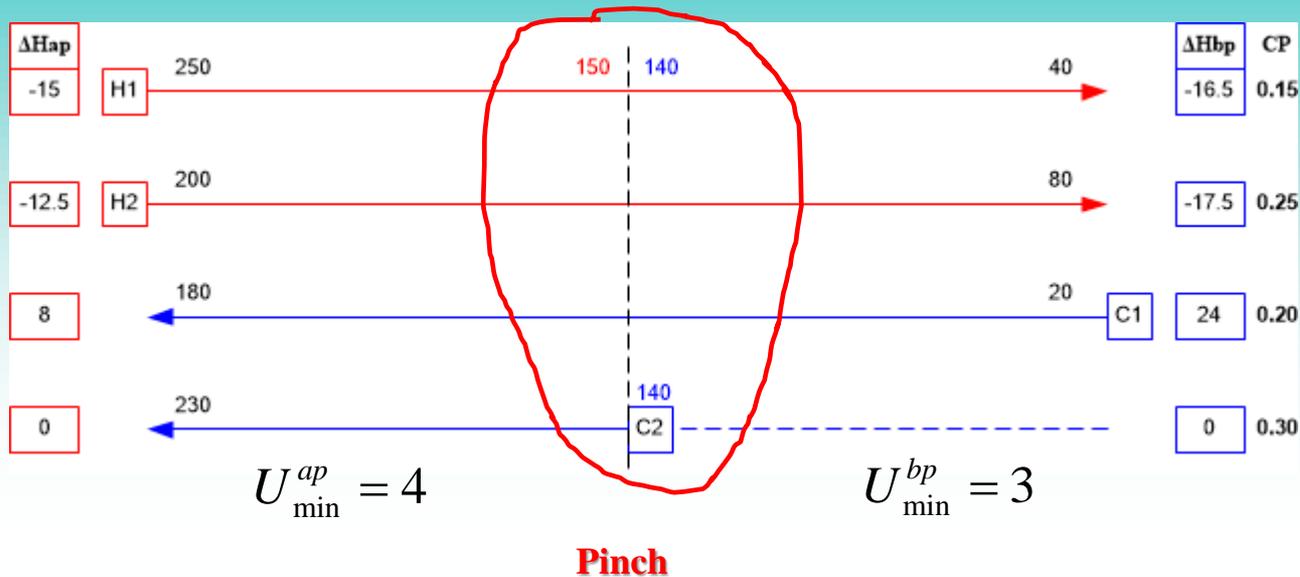


- **BGCEB** es un ciclo.
- **CGDHC** también.
- Ambos tienen una arista común, **CG**, si se elimina se obtiene un nuevo ciclo, que es **dependiente**.
- Son ciclos **independientes** si no tienen arista común.

Número de Intercambios

- La condición del Pinch divide el sistema en dos subsistemas independientes en **balance entálpico**.
- Para asegurar el balance todas las corrientes deberán intercambiar entre si, **subsistema conectado**.
- En general buscaremos obtener un sistema con el menor número de intercambios posible, esto ocurrirá cuando no existan ciclos.
 - $N = S + C - L$
 - $C = 0$ es decir que no existan ciclos.
 - $L = 1$ es decir un solo subsistema.
 - $N = S - 1$ sobre y bajo el pinch.
 - $N = (S - 1)_{\text{sobre}} + (S - 1)_{\text{bajo}}$ en total.

Método de diseño Pinch



¿Cuántos unidades mínimas de intercambio son necesarias para la MER?

$$U_{\min, \text{MER}}^{ap} = N^{ap} + S^{ap} - 1 \quad U_{\min, \text{MER}}^{bp} = N^{bp} + S^{bp} - 1$$

U: unidades, N: corriente de proceso, S: tipo de servicio (calefacción o enfriamiento)

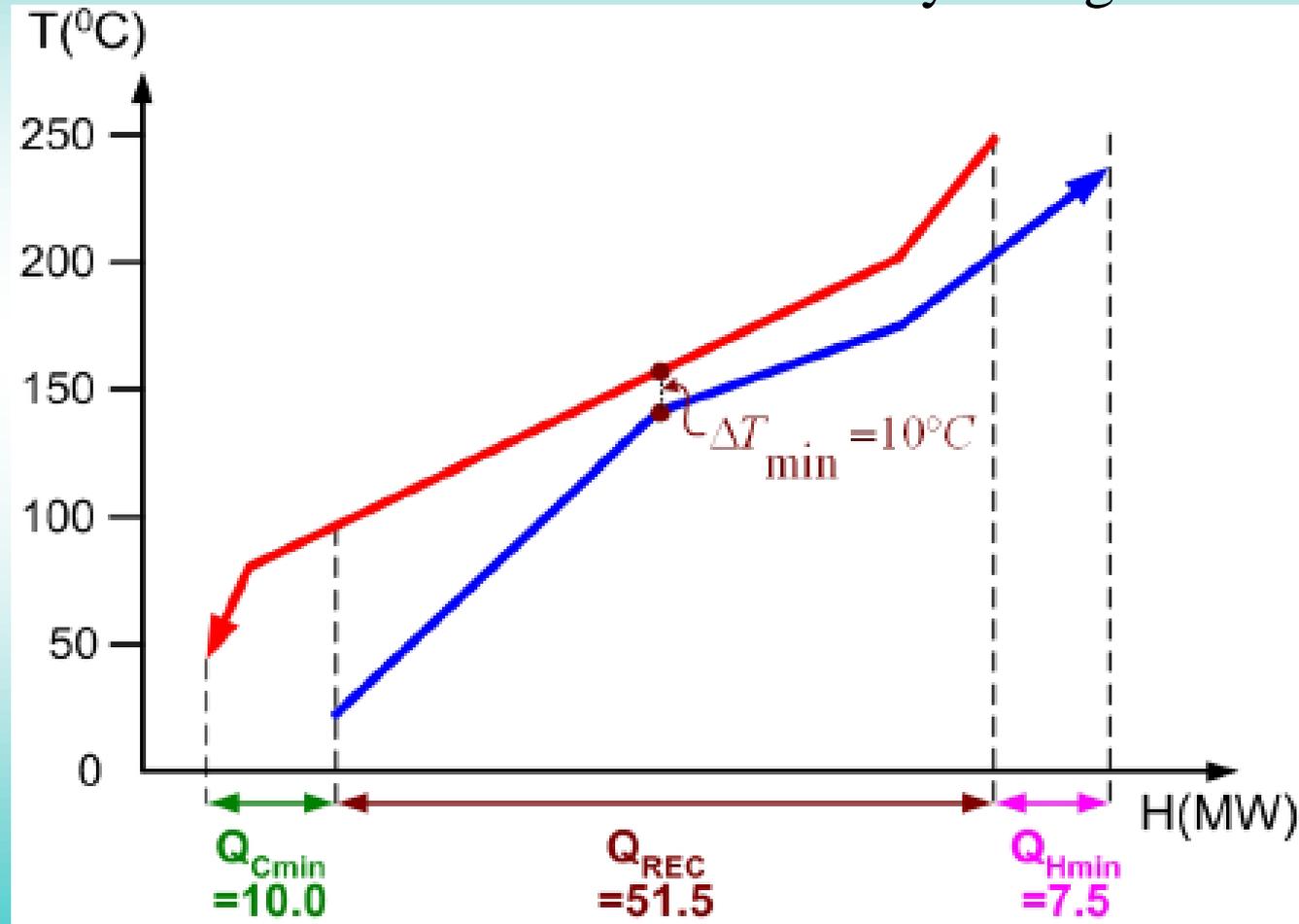
Sistema total: $U_{\min} = N + S - 1$ $U_{\min} = 4 + 2 - 1$

N: 4 S: 2 (calefacción o enfriamiento)

$$U_{\min} = 5$$

Método de diseño Pinch

- No transferir calor a través del pinch.
- El intercambio de calor debe realizar a ΔT mayor o igual a ΔT_{min} .

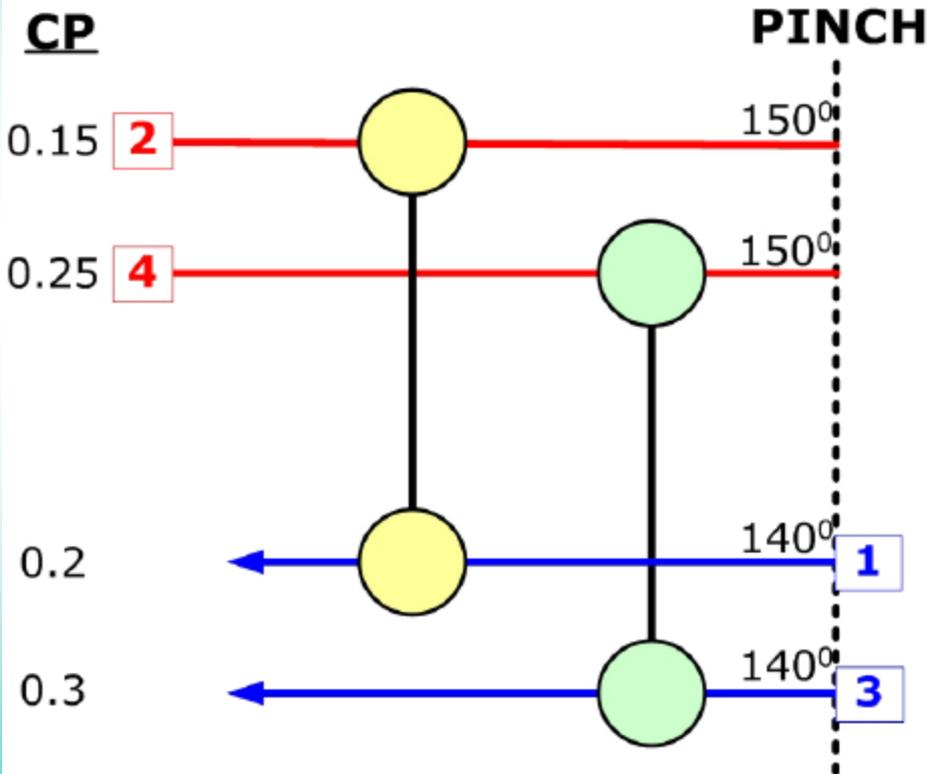


Método de diseño Pinch

Above
Pinch

$$CP_H < CP_C$$

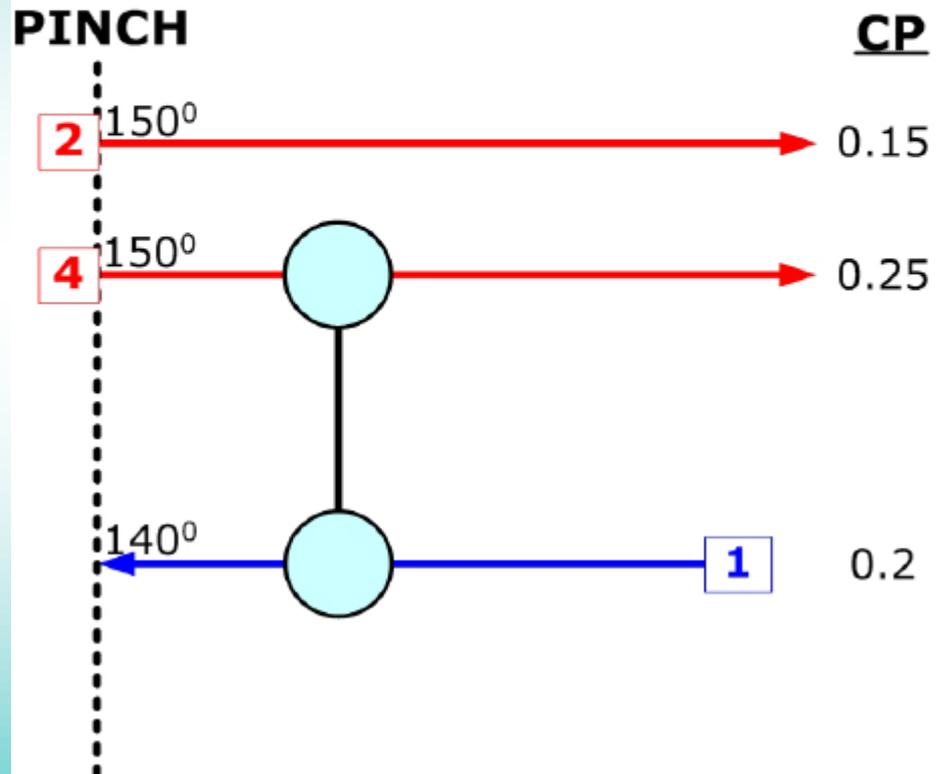
0.15	0.2
0.25	0.3



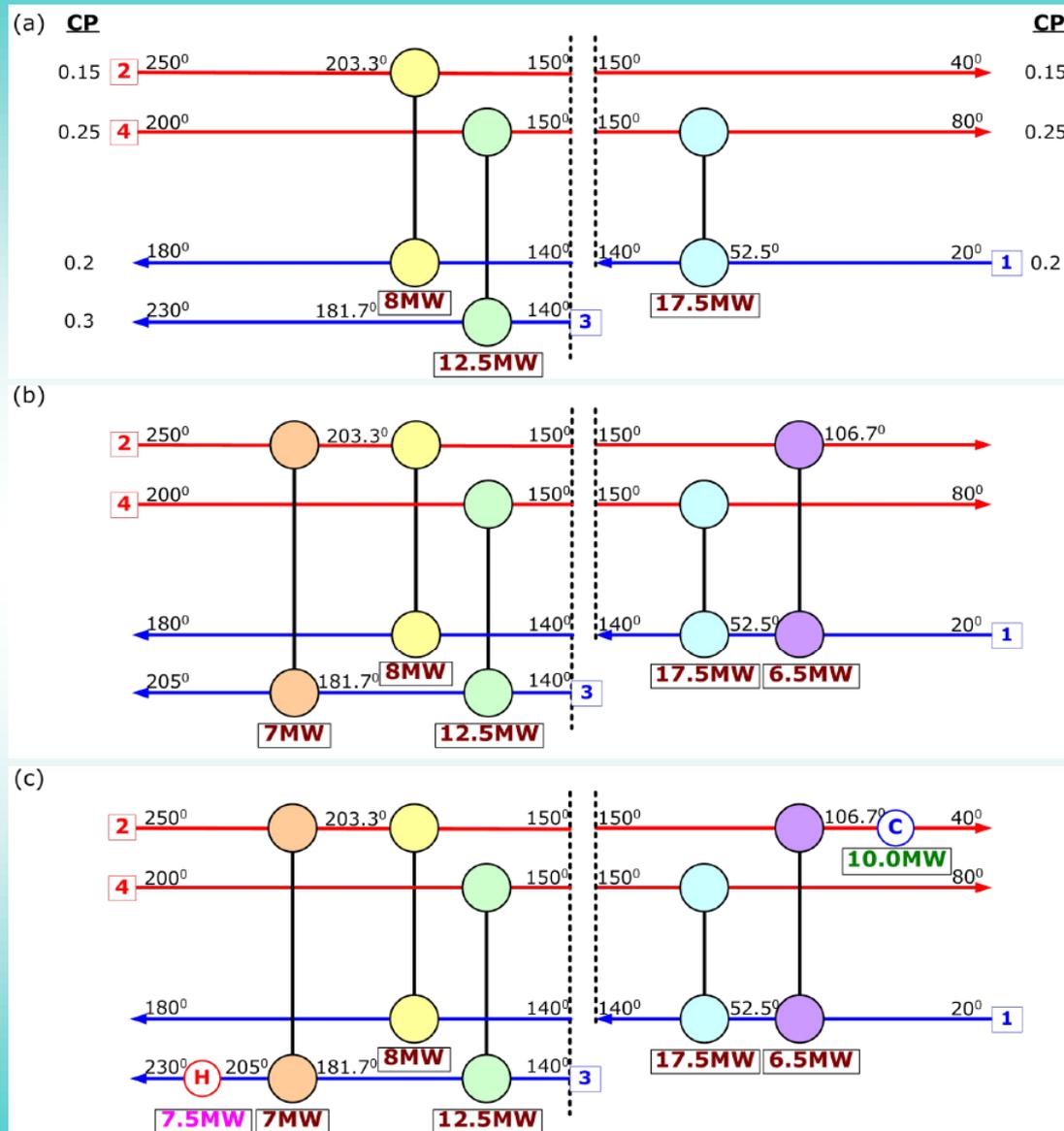
Below
Pinch

$$CP_H > CP_C$$

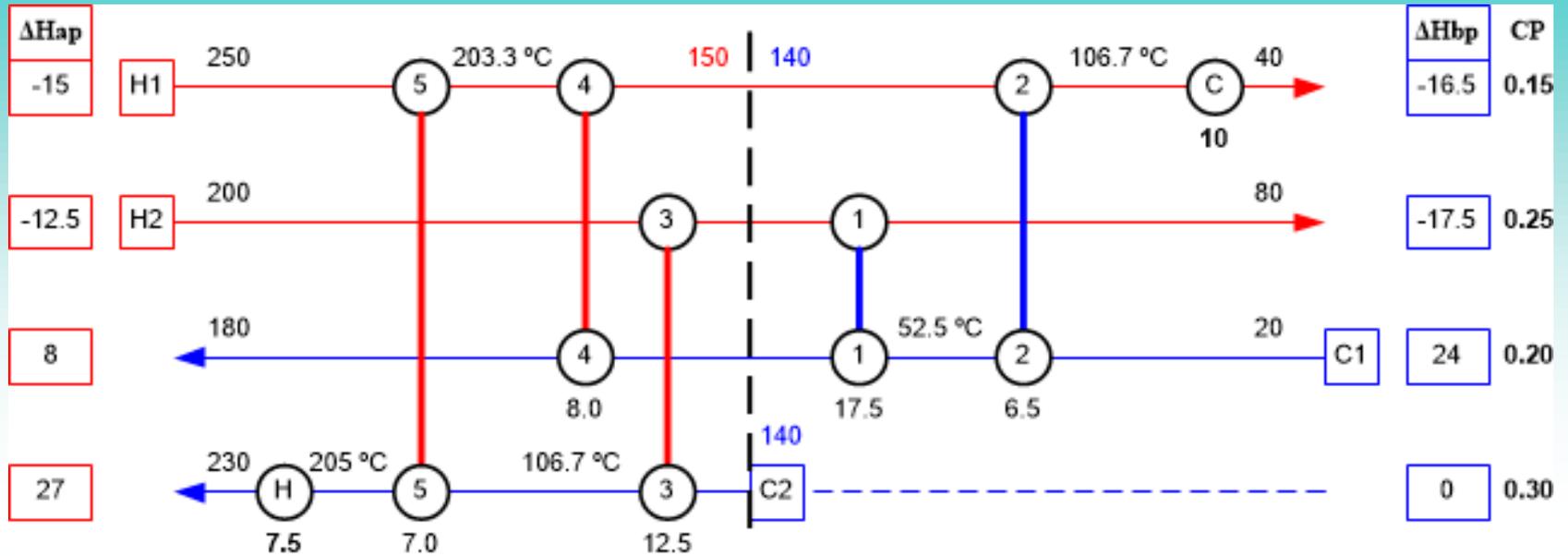
0.15	0.2
0.25	-



Método de diseño Pinch



Red de intercambio de calor

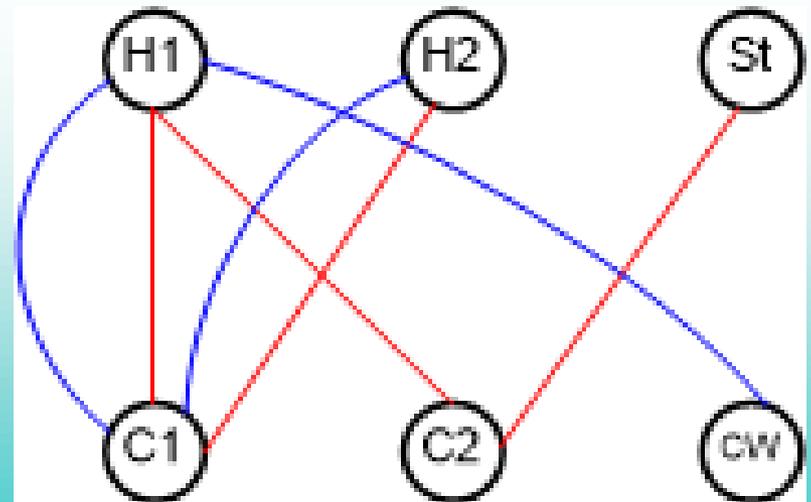


$$U_{\min}^{\text{MER}} = 7$$

$$U_{\min} = 5$$

$$\Delta U = U_{\min}^{\text{MER}} - U_{\min}$$

$$\Delta U = 2 \quad \text{Dos lazos a través del pinch}$$

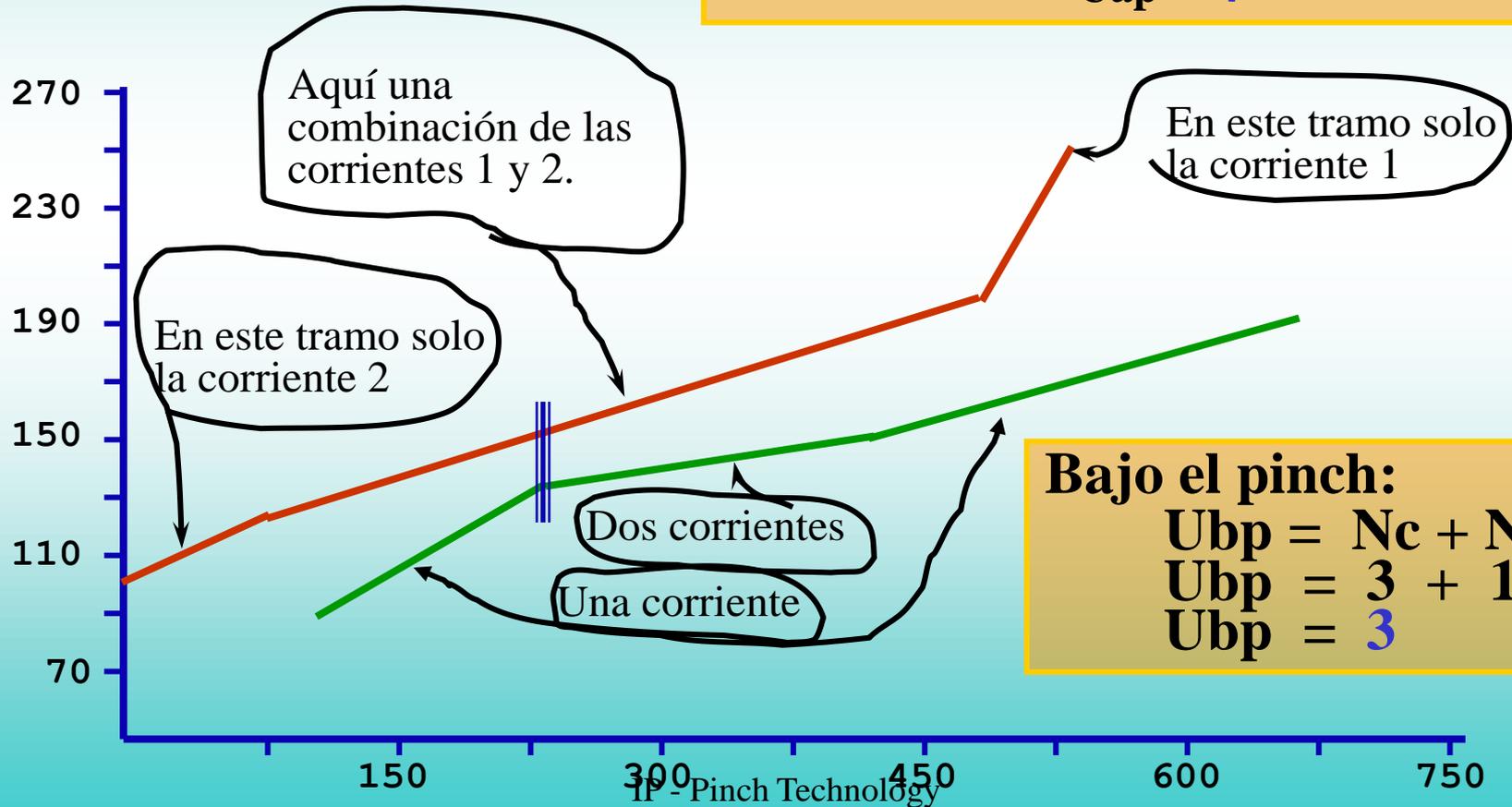


Determinación de *targets*

La información contenida permite calcular el **mínimo número de intercambios**.

Sobre el pinch:

$$U_{ap} = N_c + N_s - 1$$
$$U_{ap} = 4 + 1 - 1$$
$$U_{ap} = 4$$



Bajo el pinch:

$$U_{bp} = N_c + N_s - 1$$
$$U_{bp} = 3 + 1 - 1$$
$$U_{bp} = 3$$

Evolución del diseño

- Se completó el diseño de la red para **máxima recuperación de energía** (MER).
- Este diseño cumple con las restricciones impuestas por el análisis pinch:
 - **Respetar el ΔT_{min} .**
 - **No intercambiar a través del pinch.**
- El resultado consistió en separar el problema en **dos sistemas independientes** y como consecuencia aumentar el número de intercambiadores.
- ¿ Se puede mejorar este diseño, relajando restricciones para resolver el conflicto:

costos de inversión / costos de operación?

Meta:

Número mínimo de unidades de intercambio de calor

Evolución del diseño

- Recordemos la **regla de Euler**:

$$\text{Sobre pinch: } U_{ap} = N_{sp} + S_c - 1$$

$$\text{Bajo pinch: } U_{bp} = N_{bp} + S_f - 1$$

$$\text{Total: } U_{\min, \text{MER}} = N_{sp} + N_{bp} + S_c + S_f - 2$$

- Si consideramos toda la red **como un solo sistema** tendríamos:

$$U_{\min} = N_t + S_c + S_f - 1$$

- Hay corrientes que participan en ambos lados y en general será:

$$U_{sp} + U_{bp} > U_{\min} \text{ con } U_{sp} + U_{bp} - U_{\min} > 1$$

- Es siempre posible que el diseño MER tenga mas intercambios.

¿Existe la posibilidad de que eliminando esos intercambios se reduzca el costo total?

Método de relajación de energía

Evolución del diseño

• Este procedimiento se denomina *relajación de energía* y sus pasos son:

❖ Calcular el número de lazos o ciclos:

$$\text{Nlazos} = U_{\text{min}, \text{MER}} - U_{\text{min}} - 1$$

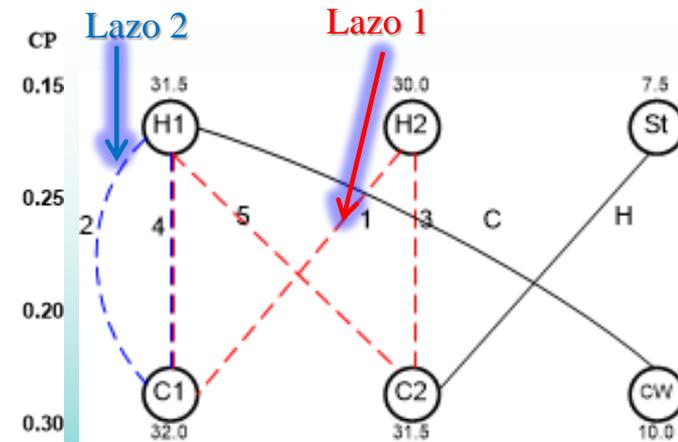
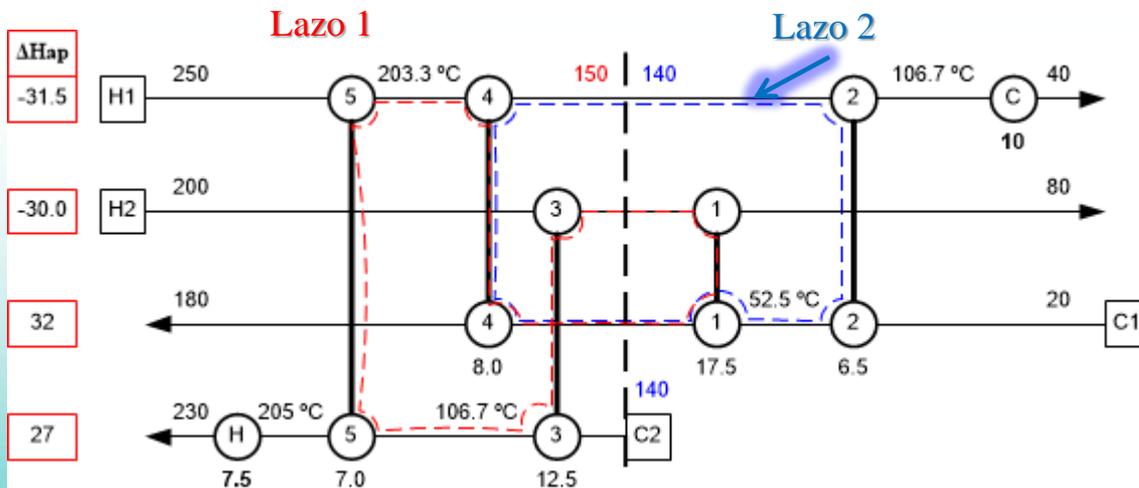
❖ Romperlos eliminando el **menor intercambio en cada uno** y trasladando su carga.

❖ Verificar las temperaturas y el cumplimiento de ΔT_{min} .

❖ Determinar los caminos para relajación de energía y calcular sus cargas adicionales para restaurar ΔT_{min} .

❖ Seleccionar el menor costo total.

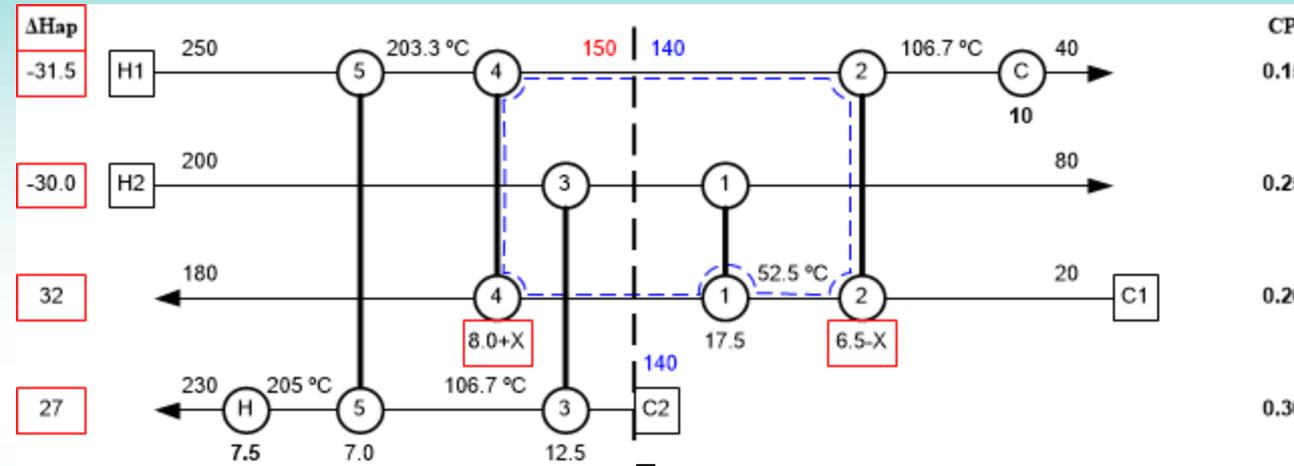
1. Calcular el número de lazos o ciclos



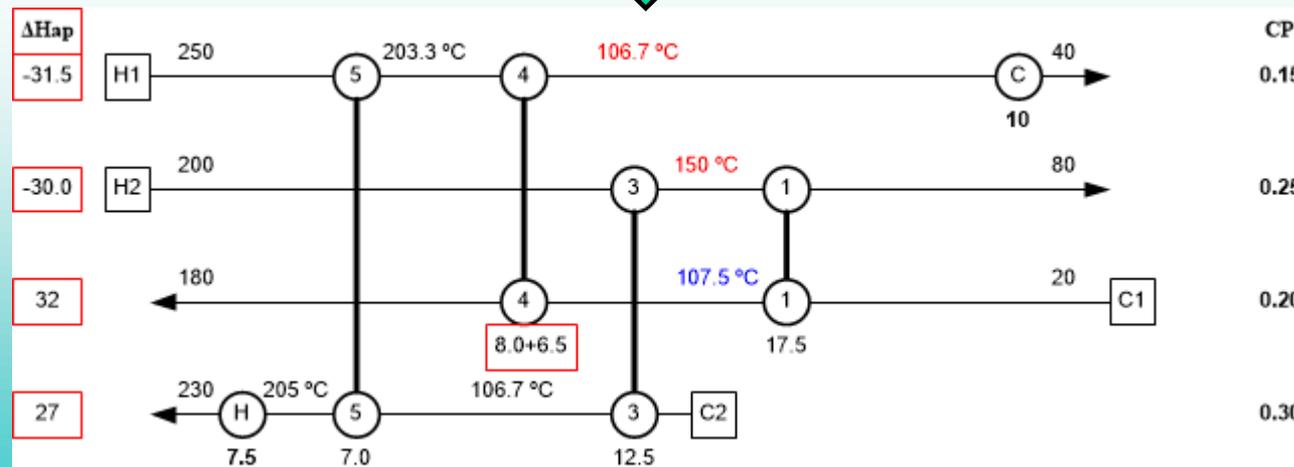
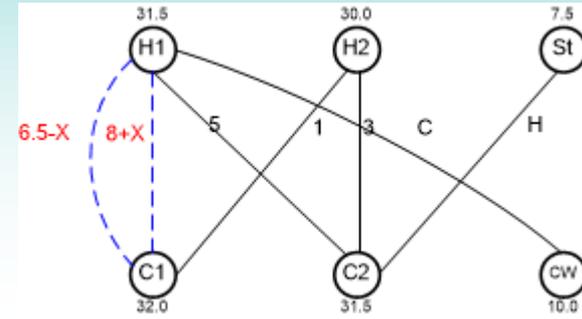
Hay dos lazos o ciclos a través del pinch
Del lazo o ciclo 2, se elimina un intercambiador de calor

Evolución del diseño

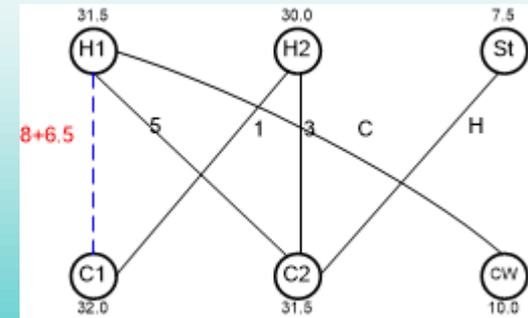
2. Romper lazo o ciclo eliminando el menor intercambio en cada uno y trasladando su carga (eliminar intercambiador 2).



CP
0.15
0.25
0.20
0.30

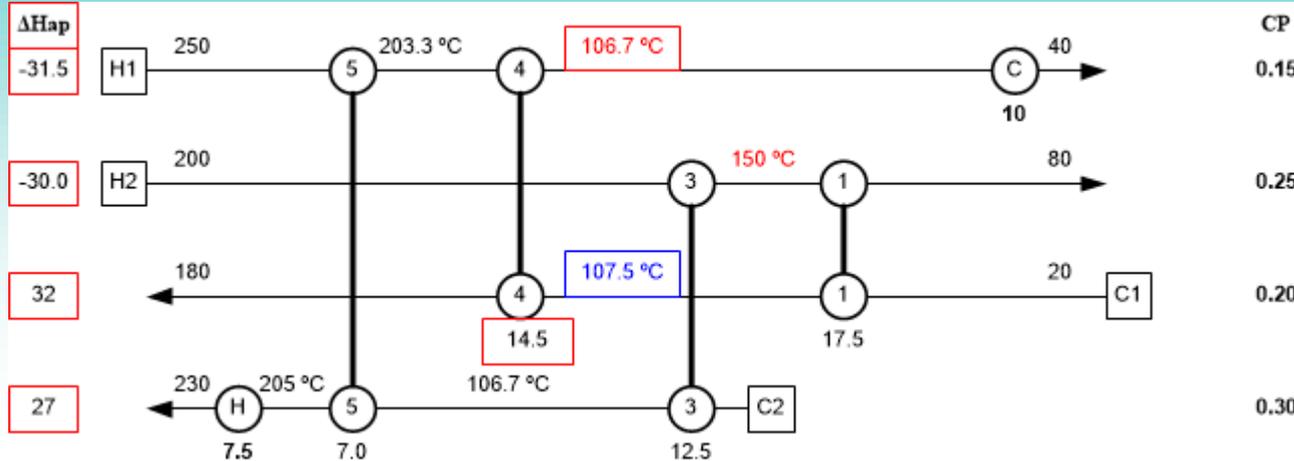


CP
0.15
0.25
0.20
0.30



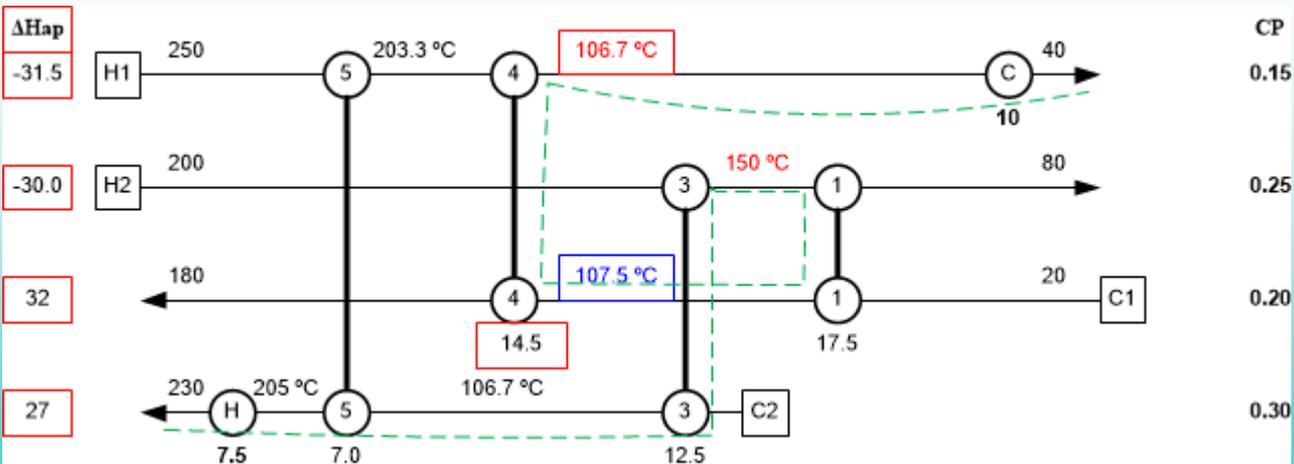
Evolución del diseño

3. Verificar las temperaturas y el cumplimiento de ΔT_{min} .



El intercambiador 4 viola el $\Delta T_{min}=10\text{ °C}$.
 Notar que los requerimientos de las corrientes de proceso no cambian.

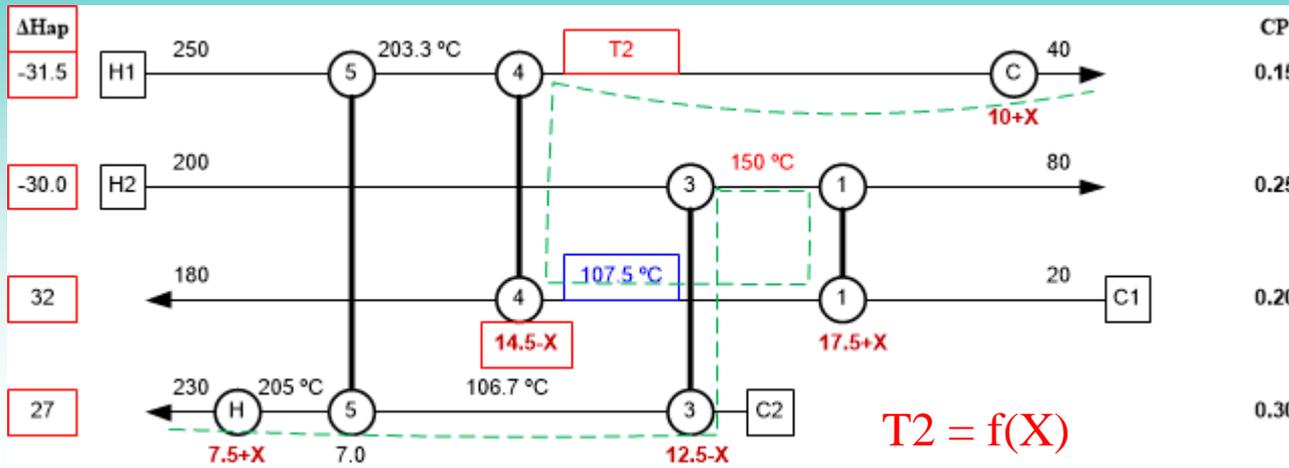
4. Determinar camino para relajación de energía para restaurar ΔT_{min} .



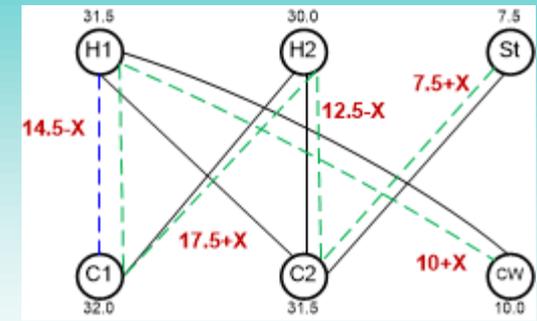
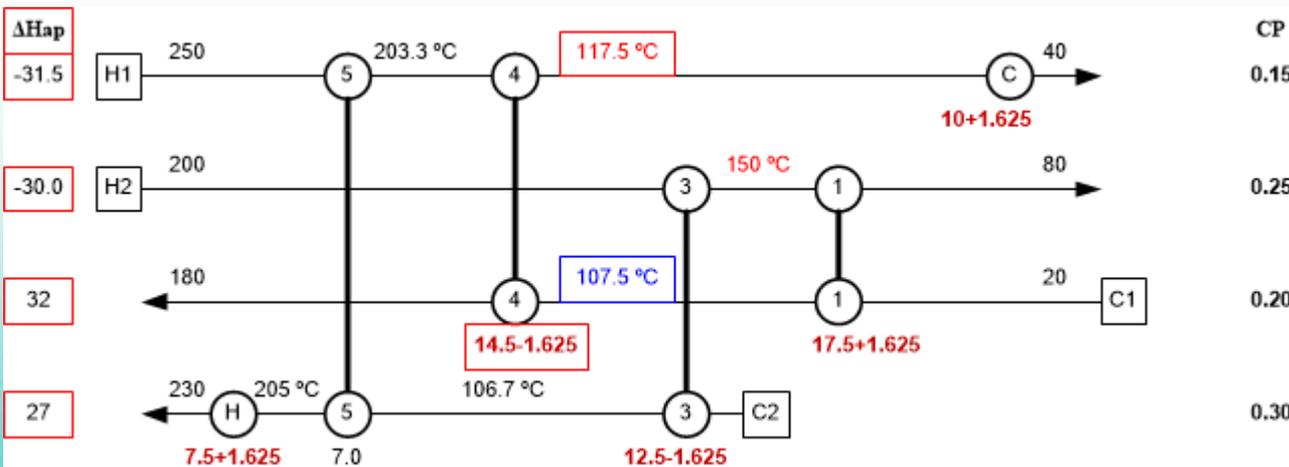
El camino de relajación debe conducir energía de un servicio caliente a otro frío pasando por el intercambio que viola el ΔT_{min} .

Evolución del diseño

5. Calcular sus cargas adicionales para restaurar ΔT_{min} .



$\Delta T_{min} = 10^\circ C \quad T_2 = 117.5^\circ C \quad X = 1.625$



$$T_2 = 203.3^\circ C - \frac{14.5 - X}{0.15}$$

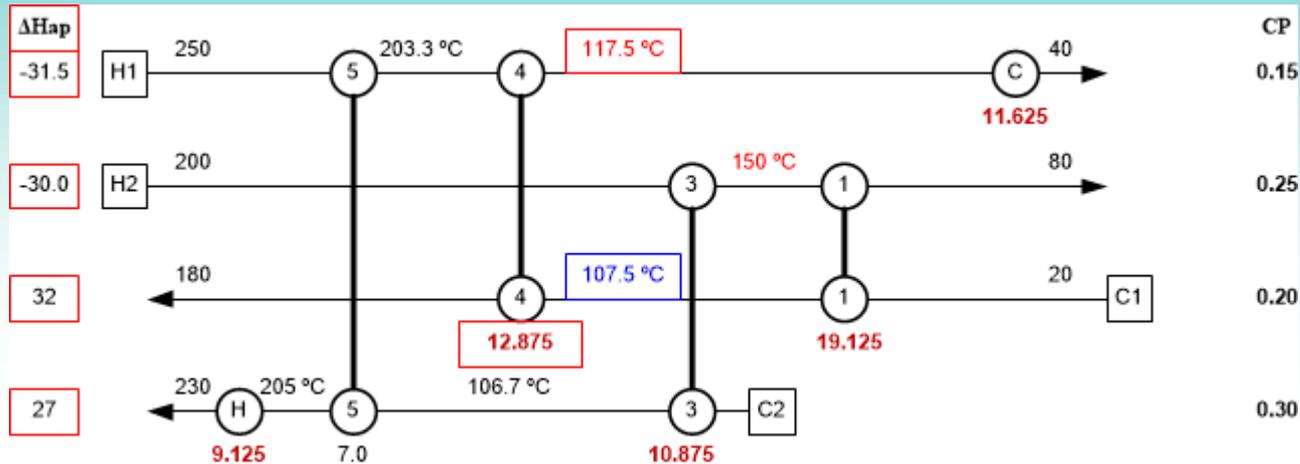
$$T_2 = 40^\circ C + \frac{10 + X}{0.15}$$

Red de intercambio con una unidad menos. Pasan a través del pinch 1,625 MW de energía.
 QH= 9,125 MW (22 % superior a QHmin)
 QC= 11,625 MW (16 % superior a Qcmin)

Evolución del diseño

Conclusiones.

1. La red resultante de la eliminación de un intercambiador de calor es:



2. Se encontró un camino que transporta **1,625 MW** adicionales. Esto significa una transferencia a través del pinch

3. Los nuevos requerimientos de servicios son:

QH= 9,125 MW (22 % superior a QHmin)

QC= 11,625 MW (16 % superior a Qcmin)

4. Aplicar los mismos pasos para eliminar el otro intercambiador (se puede proponer eliminar los dos intercambiadores de una sola vez).

Evolución del diseño

- Se plantea un conflicto entre:
 - # Reducción de costo de capital:
 - Un intercambio menos.
 - # Aumento de costo de operación:
 - Mayor consumo de servicios de calefacción y enfriamiento de 1,625 KW.
 - Mayor superficie del calentador H, del enfriador C y de los intercambio 1, 3 y 4.
- Este conflicto debe resolverse por comparación de los costos totales.
- El análisis pinch nos permite identificar exactamente estos conflictos y calcular sus consecuencias.

Evolución del diseño

- El diseño MER es siempre la base para la evolución hacia un compromiso económico:
 - *Menor inversión en equipos.*
 - *Mayor costo operativo.*
- En la solución de este conflicto también intervienen consideraciones sobre:
 - Operabilidad.
 - Controlabilidad.
 - Seguridad.
 - Confiabilidad.
- En todos los casos el análisis pinch permite identificar y cuantificar esos compromisos.
- No quedan incorporados en un programa global, sino siempre bajo el control del ingeniero.

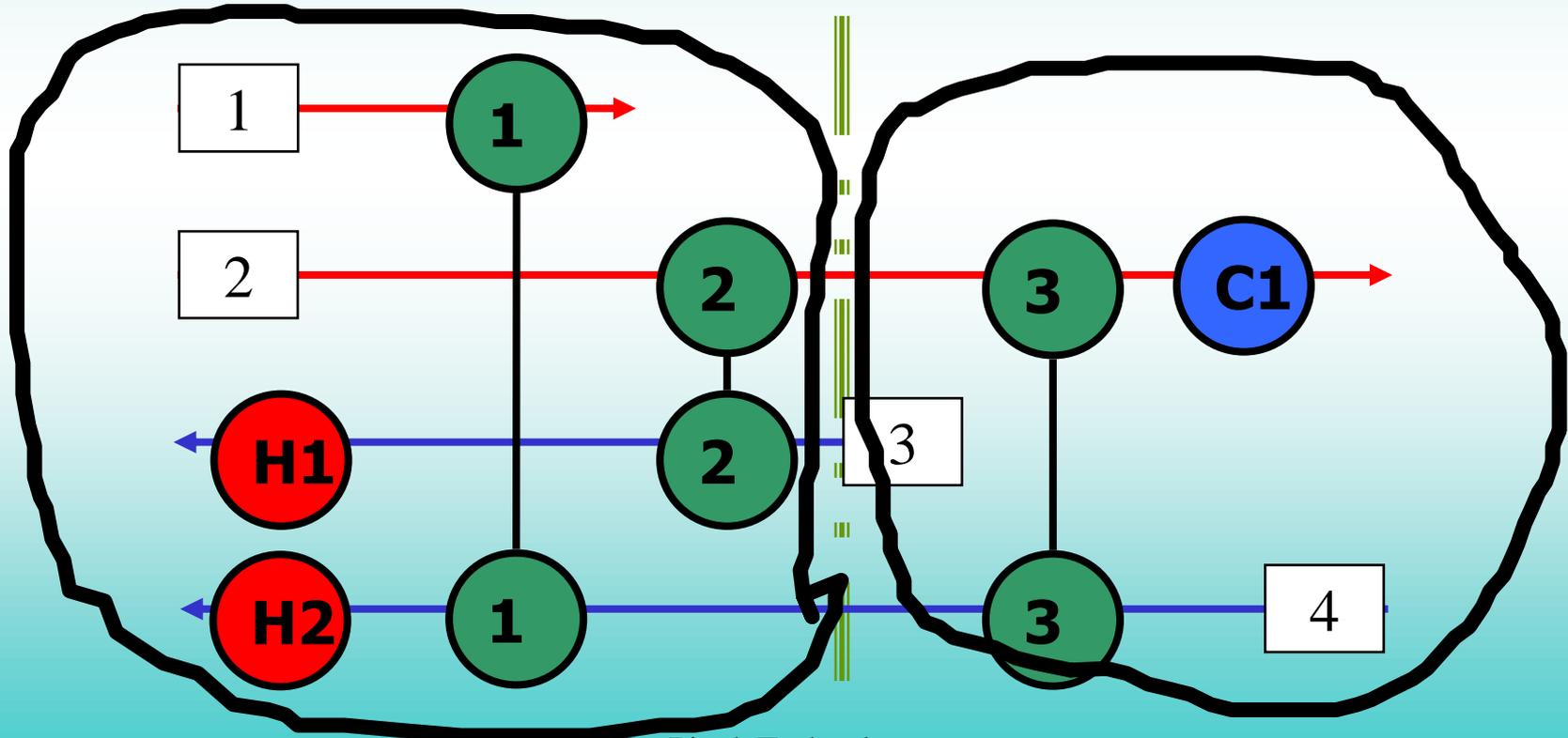
Evolución del diseño

- En este ejemplo:

$$U_c = N_{ap} + S_c - 1 = 4 + 1 - 1 = 4$$

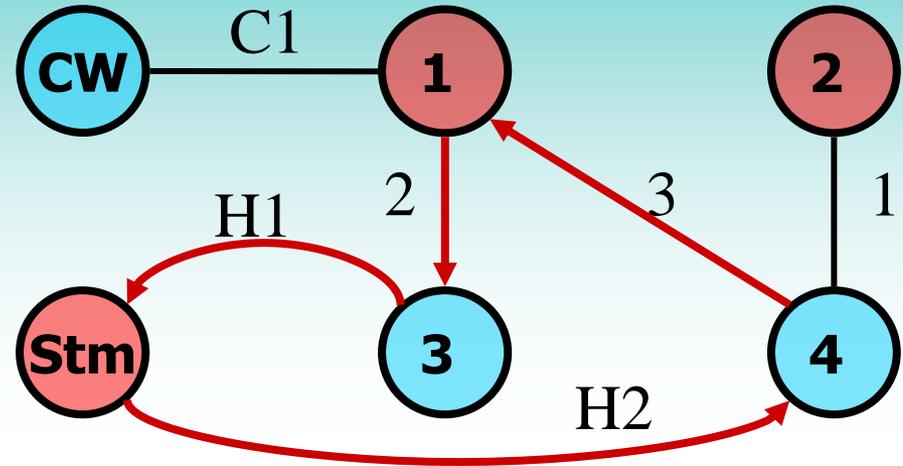
$$U_f = N_{bp} + S_f - 1 = 2 + 1 - 1 = 2$$

$$N_{ciclos} = N_{sp} + N_p - N_t - 1 = 4 + 2 - 4 - 1 = 1$$

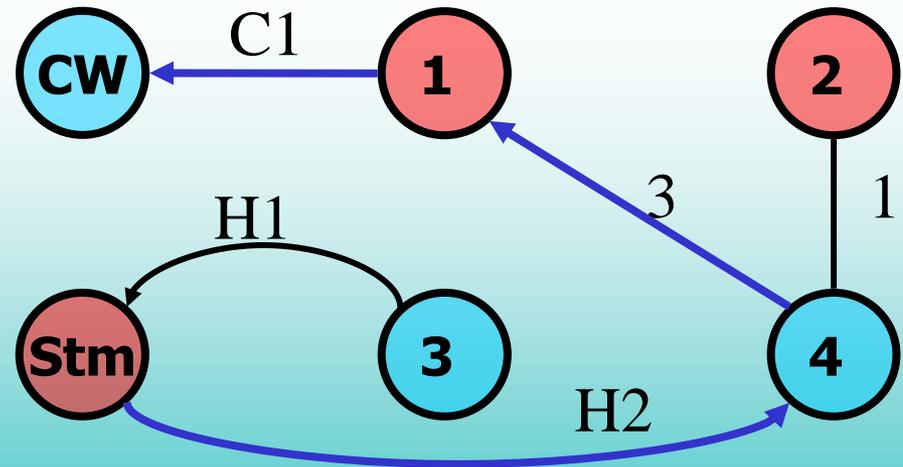


Evolución del diseño

- Resulta mas fácil identificar el ciclo sobre el grafo de conexión de las corrientes:



- ✓ También es mas fácil identificar un camino.
- ✓ Supongamos que se elimina el intercambio 2:



Análisis de solución

- El planteo general del problema es encontrar el óptimo global de la red y está definido por
 - Consumo de energía : determinado por el intercambio a través del pinch.
 - Área de intercambio : función de los ΔT reales.
 - Número de unidades : que depende del número de intercambios y sus características.
 - División de corrientes.
- Una vez identificado el diseño MER, se puede intentar su evolución utilizando las restricciones como ***grados de libertad***.