



Curso de Postgrado de Actualización

# **MODELADO, SIMULACIÓN Y SINTESIS DE PROCESOS**

**S. Benz, A. Santa Cruz, N. Scenna**

Centro de Aplicaciones Informáticas en el Modelado de  
Ingeniería

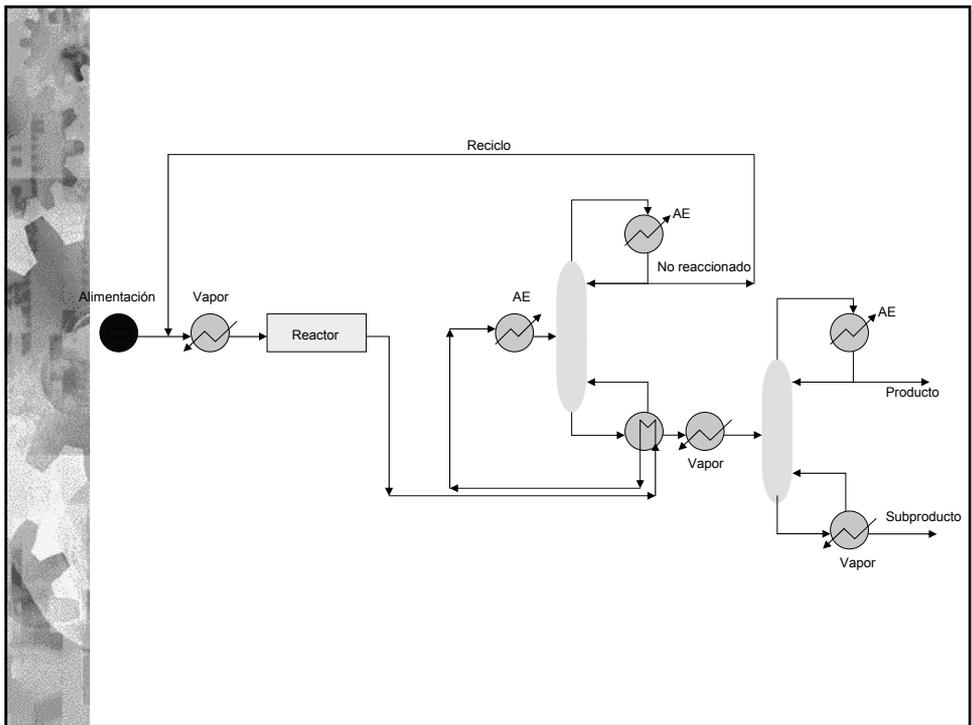
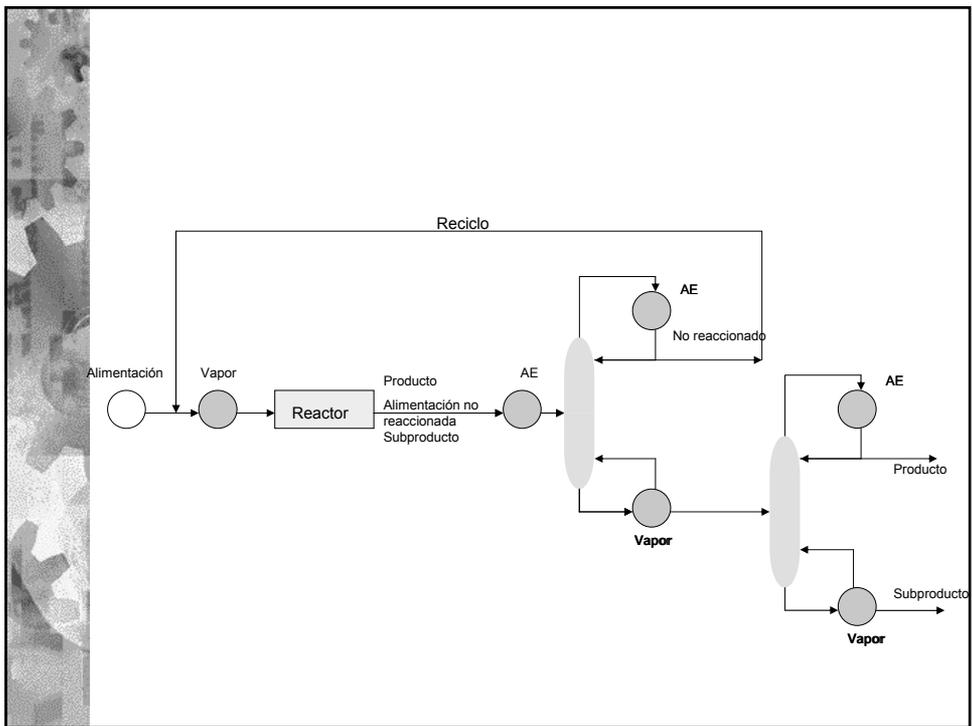
UTN - Facultad Regional Rosario

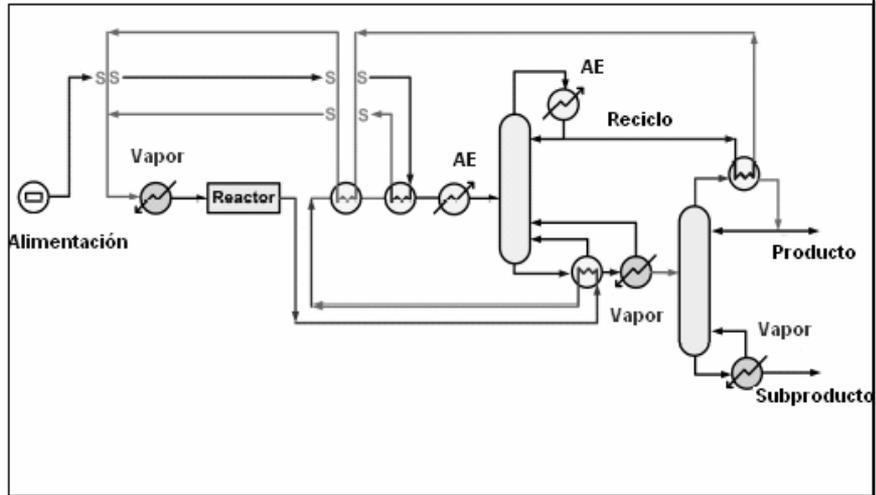
**2008**



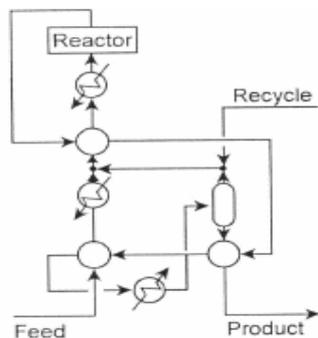
## **CLASE 3**

# **SINTESIS DE LA RED DE INTERCAMBIADORES**



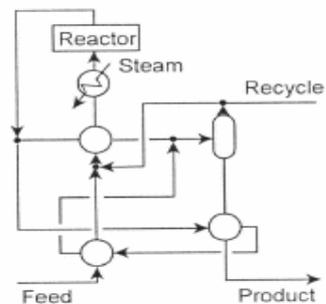


## Diseño para una mejor Integración del Proceso



Base Case

⇒



Better Process Integration

Hot Utility = -38%

Units = -33%

Cold Utility = -100%

Area = -15%

## **El problema de Síntesis de RIC puede definirse como ...**

- La determinación de una red para intercambiar calor entre un conjunto de corrientes de proceso (recuperación de energía)
- El calentamiento y el enfriamiento no satisfecho por el intercambio entre ellas, debe ser satisfecho por servicios auxiliares externos ( vapor, aceite caliente, agua de enfriamiento, refrigerantes, etc.)

Dado:

- i. Un conjunto de corrientes calientes a ser enfriadas y un conjunto de corrientes frías a ser calentadas.
- ii. Las velocidades de flujo y las temperaturas de entrada y salida de todas las corrientes.
- iii. La capacidad calorífica de todas las corrientes como una función de la temperatura.
- iv. Los servicios auxiliares disponibles y sus costos, además de los costos de capital



El objetivo del problema de síntesis de redes de intercambio calórico se enuncia típicamente como sigue:

Determinar la estructura que se corresponda con el costo total anual mínimo de la red (costos de capital anualizados y costos de servicios auxiliares).



### **Uno de los enfoques para la síntesis de una RIC de mínimo costo anual ...**

- Diseñar una RIC que minimice el consumo de servicios de calefacción y enfriamiento (disminuye los costos operativos); esto es que la red propuesta funcione con la máxima recuperación energética (MER).
- Generar la red de intercambio compatible con la condición de MER, minimizando el número de equipos de intercambio y con ello el área de intercambio (disminuye el costo de capital).

## **Corriente Fría - Corriente Caliente**

Las corrientes materiales que intervienen en el proceso se pueden clasificar, según **la tarea** que realizan, en:

- Frías: Aquellas que absorben energía
- Calientes: Aquellas que ceden energía

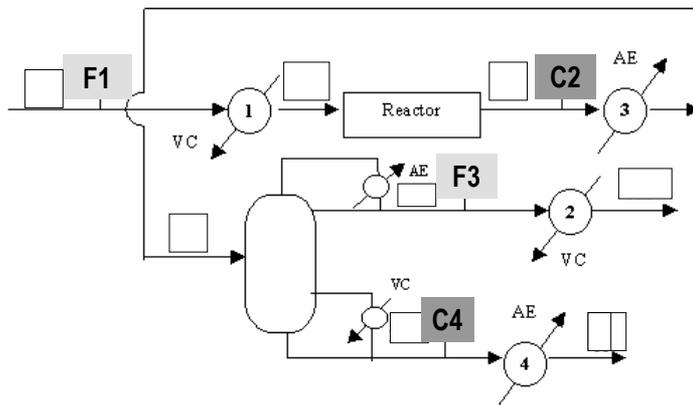
Esta clasificación no se basa en las temperaturas de las respectivas corrientes sino en las tareas que hay que efectuar sobre ellas. Conviene tener presente que de acuerdo con estas definiciones, algunas de las corrientes frías pueden tener mayor temperatura que otras clasificadas como calientes.

## **Características generales de los sistemas de intercambio térmico**

Para desarrollar el tema se hará uso de un ejemplo sencillo aplicado a la industria química.

En el diagrama se puede identificar, dos corrientes calientes y dos corrientes frías y las tareas a realizar por el sistema de intercambio térmico

## Ejemplo



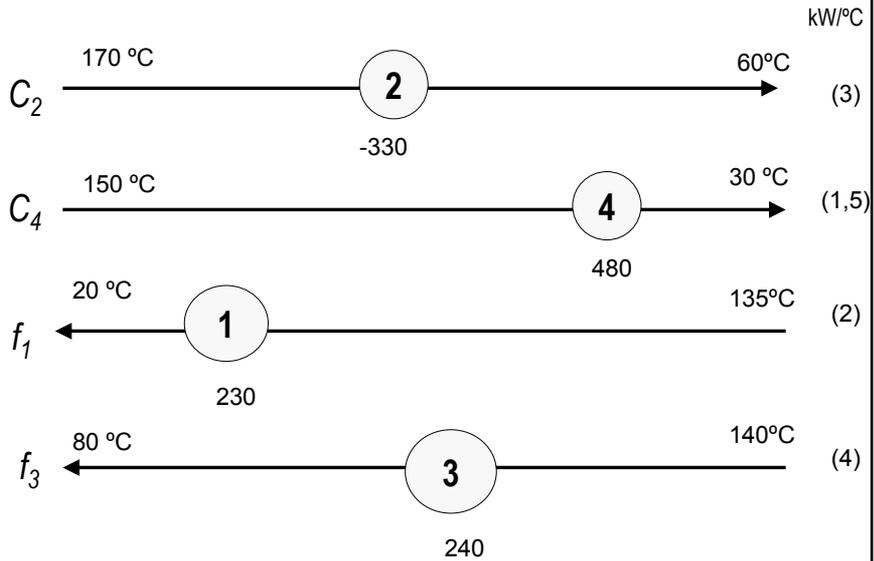
Esquema de Proceso típico de la Industria Química (Temperaturas en °C).

Tipo y nro de corriente	Temp de entrada (°C)	Temp de salida deseada (°C)	Flujo de capacidad calorífica (KWI/°C)	Calor a intercambiar (KW)
1 (fría)	<b>20</b>	<b>135</b>	2,0	230
2 (caliente)	<b>170</b>	<b>60</b>	3,0	-330
3 (fría)	<b>80</b>	<b>140</b>	4,0	240
4 (caliente)	<b>150</b>	<b>30</b>	1,5	-180
$\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ Temp vapor = 200°C      Temp agua enf = 15°C				

## Diagrama de grilla

- Las corrientes calientes (CC) se representan por flechas de izquierda a derecha, y las corrientes frías (CF) por flechas de derecha a izquierda.
- Las temperaturas se indican sobre las corrientes en puntos de interés.
- Los intercambiadores se representan por medio de círculos y, en caso de existir integración energética, se dibujan como nexos entre corrientes frías y calientes. Generalmente los calentadores aparecen en el extremo izquierdo sobre la corriente fría y los enfriadores en el extremo derecho de las corrientes calientes.

**Diagrama de grilla**



## Leyes Termodinámicas

Máximo requerimiento de servicios de calefacción =  $\Sigma Q_F$ .

Máximo requerimiento de servicios fríos =  $\Sigma Q_C$ .

La máxima recuperación de energía implica el mínimo uso de servicios auxiliares.

$$\left[ \begin{array}{l} \text{calor disponible en} \\ \text{corrientes calientes y} \\ \text{servicios de calefacción} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{calor requerido por} \\ \text{corrientes frías y} \\ \text{servicios de enfriamiento.} \end{array} \right]$$

ó  $\Sigma Q_C + Q_{SC} = \Sigma Q_F + Q_{SF}$  (1° ley termod.)

Se asume que el calor puede ser transferido desde cualquier corriente caliente a cualquier corriente fría.

Esta condición puede ser no factible ya que la transferencia de calor puede ocurrir solamente de zonas de temperatura más elevada a zonas de temperatura más baja (2° ley de la termodinámica).

Debe haber una diferencia de temperatura que actúe como fuerza impulsora para transferir calor entre corrientes calientes y frías.

$(\Delta T_{\min}) = 0$ ,  área de transferencia infinita

Se debe determinar la máxima recuperación de energía posible con una mínima diferencia de temperatura adoptada ( $\Delta T_{\min}$ )

Se debe determinar la demanda remanente de energía cuyo balance debe ser satisfecho con servicios auxiliares.

## **Antes de conocer la RIC, se puede anticipar...**

- El cálculo de menor consumo posible de servicios auxiliares compatibles (vapor de calefacción, agua de enfriamiento) compatible con la restricción que define la mínima diferencia de temperaturas permitida entre las corrientes sujetas a intercambio (ej:  $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ )
- El número mínimo de unidades requeridas para obtener la RIC con mayor recuperación energética.

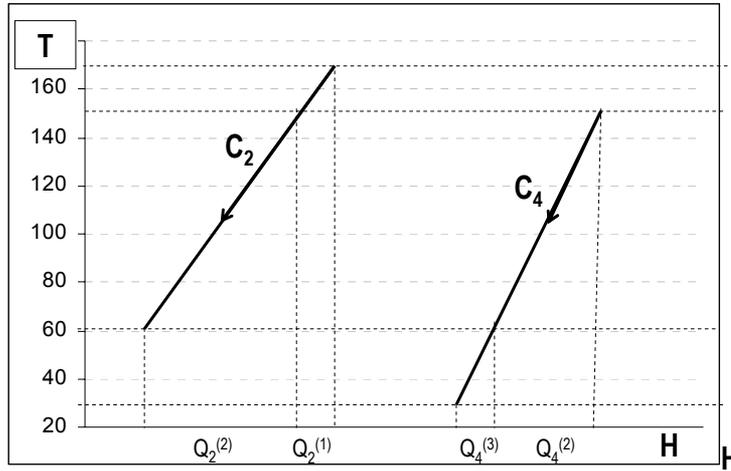
**Se introduce ahora, el concepto de ...**

**Corrientes Compuestas Frías**

**Corrientes Compuestas Calientes**

# Corriente Compuesta Caliente (CCC)

- Representar en un Diagrama T – H todas las corrientes.
- Trazar horizontales en los extremos de todas las corrientes



**A partir del rango de temperatura y el flujo de capacidad calorífica, se calcula la variación de entalpía**

$$\Delta H_i = (mC_p)_i \Delta T_i \quad \longrightarrow \quad \Delta T_i = \frac{1}{mC_p} \Delta H_i$$

**A partir de las temperaturas de entrada y salida se pueden identificar Intervalos de temperaturas:**

- Intervalo 1: 170 ° - 150°
- Intervalo 2: 150 ° - 60°
- Intervalo 3: 60 ° - 30 °

## Análisis del diagrama T - H

➤ De 170 a 150°C:

- Hay una sola corriente ( $C_2$ ) cuyo  $(m Cp)_2 = 3 \text{ KW} / ^\circ\text{C}$
- El calor que puede ser obtenido de este intervalo es:

$$Q^{(1)} = 3 \text{ KW} / ^\circ\text{C} \times (170 ^\circ\text{C} - 150 ^\circ\text{C}) = 60 \text{ KW}$$

➤ De 150 a 60°C:

- Existen dos corrientes ( $C_2$  y  $C_4$ )
- El calor que puede ser obtenido de este intervalo es:

$$Q^{(2)} = (3 + 1,5) \text{ KW} / ^\circ\text{C} \times (150 ^\circ\text{C} - 60 ^\circ\text{C}) = 405 \text{ KW}$$

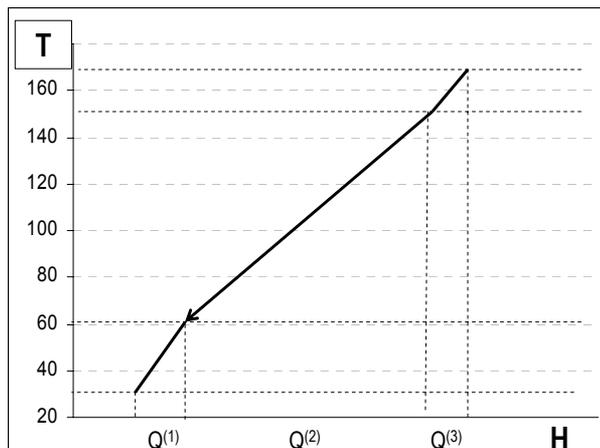
➤ De 60 a 30°C:

- Hay una sola corriente ( $C_2$ ) cuyo  $(m Cp)_2 = 3 \text{ KW} / ^\circ\text{C}$
- El calor que puede ser obtenido de este intervalo es:

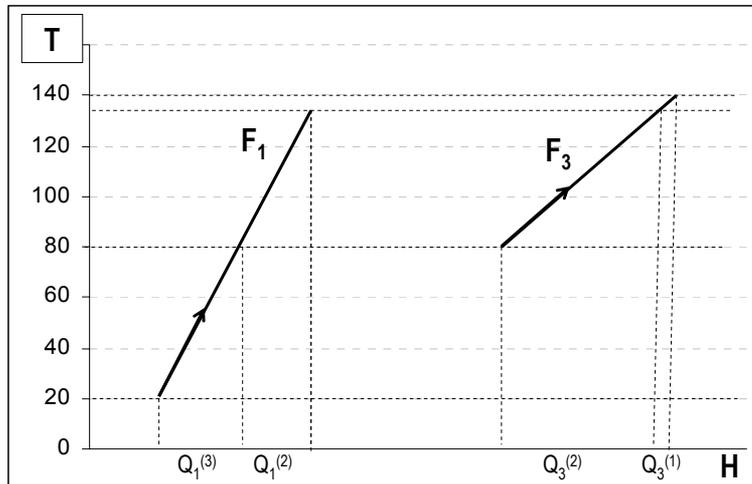
$$Q^{(3)} = 1,5 \text{ KW} / ^\circ\text{C} \times (60 ^\circ\text{C} - 30 ^\circ\text{C}) = 45 \text{ KW}$$

## Corriente Compuesta Caliente (CCC)

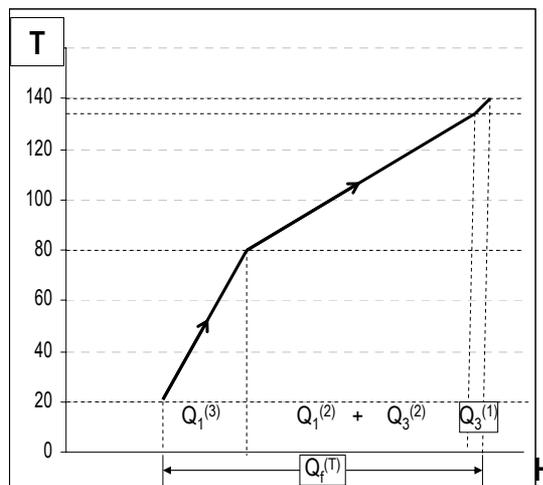
Se obtiene trazando en cada intervalo de temperatura la curva T - H para una corriente cuyo flujo de capacidad calorífica  $(m Cp)_C$ , es igual a la suma de los flujos de la capacidad calorífica de las corrientes individuales que hay en cada intervalo



# Construcción de la Corriente Compuesta Fría (CCF)



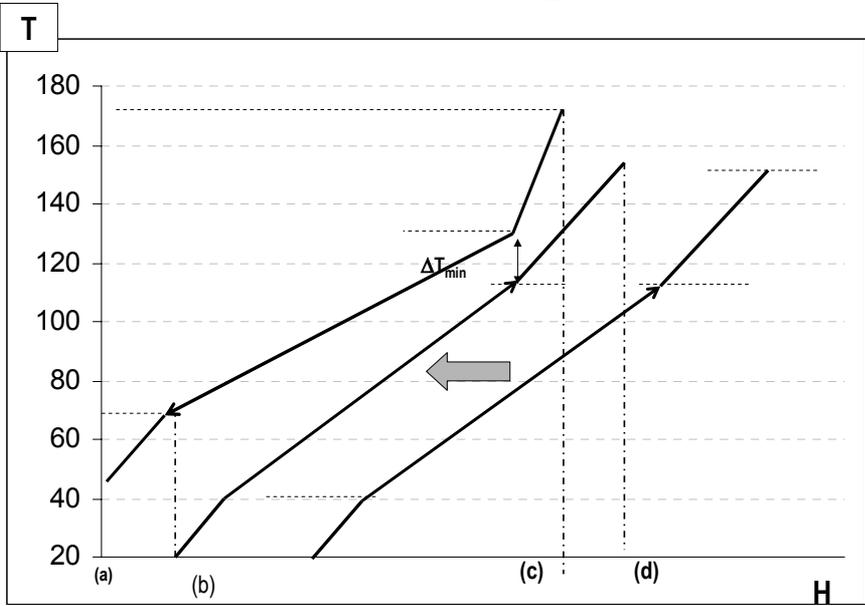
# Corrientes Compuesta Fría



## Para estas curvas valen las siguientes consideraciones:

- Es posible efectuar desplazamientos horizontales de las corrientes sin alterar la información que ellas proveen
- La proyección de la curva sobre el eje H corresponde al calor total disponible en las corrientes calientes,  $Q_C^{(T)}$

## CCF y CCC en el diagrama T-H

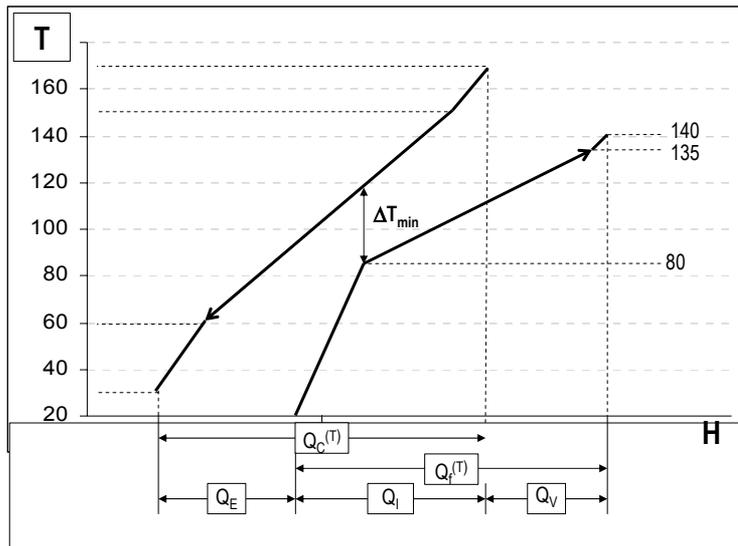


## Propiedades Gráficas

- La proyección de la curva de la CCC sobre el eje “H” corresponde a la entalpía total disponible en el conjunto de corrientes calientes.
- La proyección de la curva de la CCF sobre el eje “H” corresponde a la entalpía total requerida por el conjunto de las corrientes frías.
- Las curvas de las corrientes compuestas pueden efectuar desplazamientos horizontales sin alterar la información que ellas proveen.

### Propiedades Gráficas

- Trazada una recta vertical sobre el diagrama T-H, si ésta intercepta simultáneamente a la CCC y la CCF, entonces es posible el intercambio energético entre ambas corrientes.
- La magnitud del solapamiento entre las corrientes compuestas caliente y fría indica una medida del intercambio energético entre ellas (b-c)
- Trazada una recta vertical sobre el diagrama T-H, si ésta intercepta solo una de las corrientes compuestas, la tarea de calefacción o enfriamiento se satisface mediante servicios auxiliares (a – b) y (c – d)



## Mínimo Consumo de SA

El mínimo consumo de servicios auxiliares depende de la diferencia mínima de temperaturas preestablecido entre las corrientes sujetas a intercambio:  $i, j$ .

$$(\Delta t_{\min})_{i,j} > 0$$

Para el ejemplo, se adopta  $(\Delta t_{\min})_{i,j} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

- Calor a suministrar por el vapor de calefacción:

$$Q_V = Q_f^{(T)} - Q_I$$

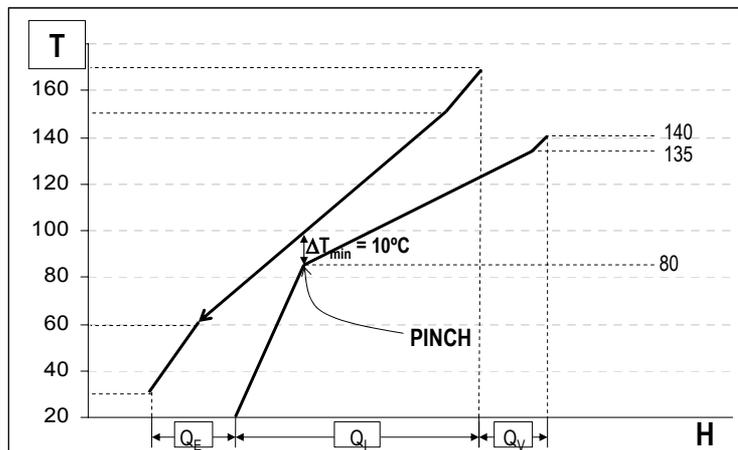
- Calor a ser extraído por el agua de enfriamiento:

$$Q_{AE} = Q_C^{(T)} - Q_I$$

Según las posiciones relativas de las curvas:

	CASO 1	CASO 2
$\Delta T$	48 °C	10 °C
$Q_I$	280 KW	450 KW
$Q_V$	190 KW	20 KW
$Q_{AE}$	230 KW	60 KW

La situación descrita en el CASO 2 es la de máxima recuperación ( $Q_I$ ) y menor demanda de servicios auxiliares, compatibles con la restricción  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$



Al punto de mayor aproximación de las curvas compuestas se lo designa como el "PINCH" del problema

Se puede observar que al disminuir el  $\Delta T$  hasta adoptar el mínimo permitido:

- Aumenta  $Q_I$
- Disminuyen  $Q_V$  y  $Q_{AE}$
- Disminuye el  $\Delta T$  en todos los puntos de intercambio

Disminuyen las cargas térmicas en calefactores y enfriadores

Tiende a aumentar el área de intercambio

## Tabla del problema

Diagrama  $\bar{T} - H$

- Para la corriente compuesta caliente:

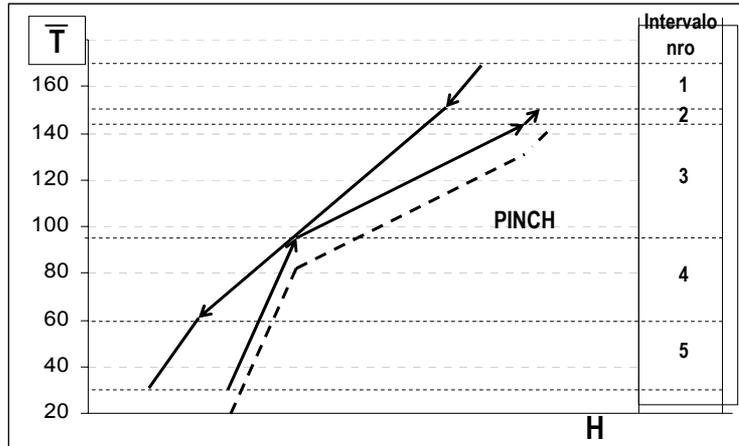
$$\bar{T} = T$$

- Para la corriente compuesta fría:

$$\bar{T} = T + \Delta T_{\min}$$

Esta transformación corresponde a un corrimiento hacia arriba de la curva compuesta fría en la cantidad  $\Delta T_{\min}$ .

En el PINCH, las curvas CCC y CCF hacen contacto en el diagrama T-H, mientras que en términos reales tengan una diferencia igual a  $\Delta T_{\min}$ .

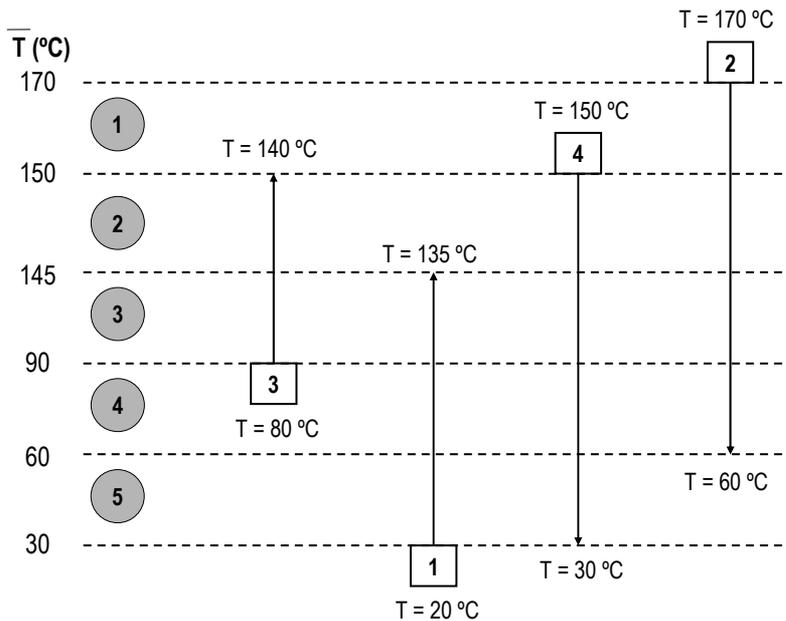


## Sectorización del problema

- En el diagrama  $\bar{T}$ -H, se distinguen Intervalos de Temperatura.
- En cada intervalo, el flujo de capacidad calorífica para las CCC y CCF son constantes.
- Los cambios de estos valores ocurren precisamente en los extremos de cada intervalo

Esta operación se puede representar gráficamente en un diagrama de corrientes calientes y frías

## Sectorización del problema Diagrama de corrientes calientes y frías



### Sectorización del problema

- En cada intervalo, se plantea un problema de integración térmica separado.
- Se busca en cada intervalo de temperatura la mayor integración térmica posible entre las CCC y CCF
- Para cada intervalo de temperaturas  $(T_i; T_{i+1})$ ,  
donde  $T_i > T_{i+1}$ ,  $Q_i = [(m Cp)_{f,i} - (m Cp)_{c,i}] * (T_{i+1} - T_i)$

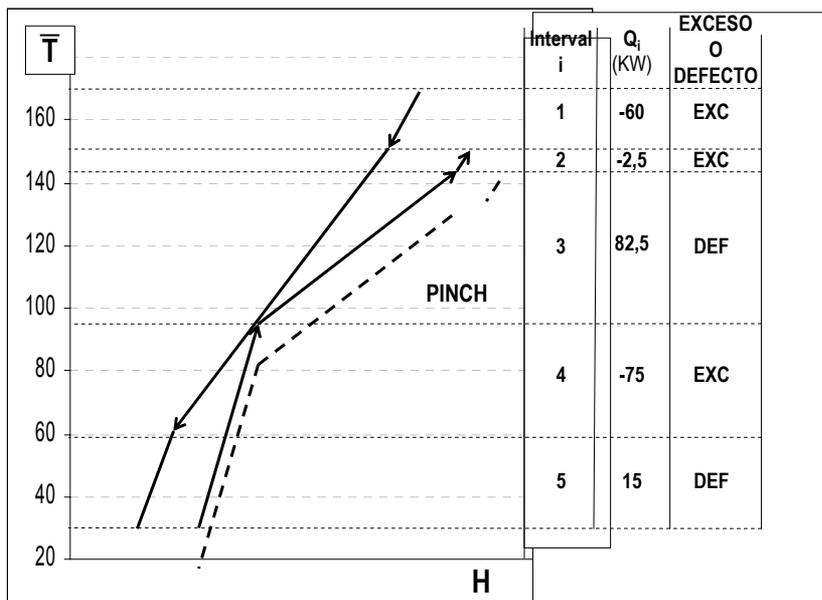
Siendo,

$(m Cp)_{f,i}$  = es el caudal de capacidad calorífica de la CCF en el intervalo (i)

$(m Cp)_{c,i}$  = es el caudal de capacidad calorífica de la CCC en el intervalo (i)

# Tabla del problema

SECTOR Nº	$T_i - T_{i+1}$ (°C)	$(m Cp)_{f,i} -$ $(m Cp)_{c,i}$	$Q_i$ (KWI)	EXCESO O DEFICIT
1	20	-3,0	-60,0	Exceso
2	5	-0,5	-2,5	Exceso
3	55	+1,5	+82,5	Déficit
4	30	-2,5	-75,0	Exceso
5	30	+0,5	+15,0	Déficit



## Resolución de la Tabla del problema

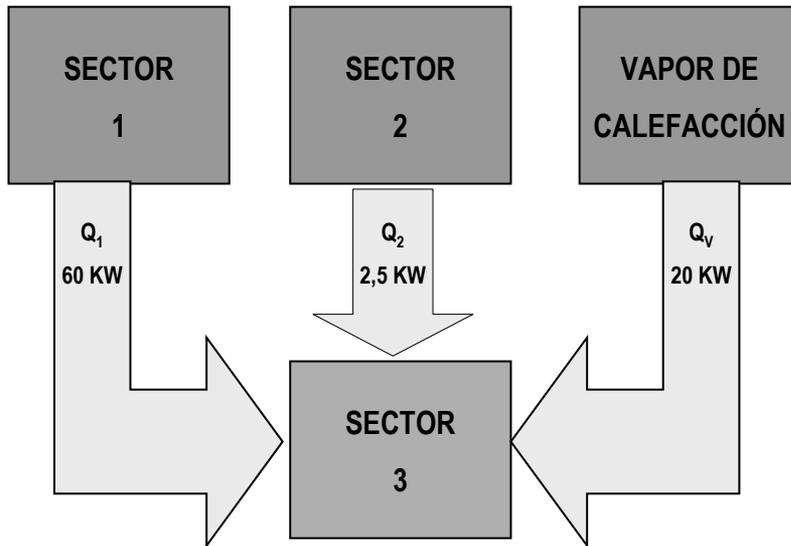
- Gráfica: En cada intervalo, se propende a la mayor integración posible entre CCC y CCF (desplazamiento horizontal)
- Numérica: se resuelve el balance en cada intervalo y se identifica:
  - Si existe un Exceso de energía; debe ser removida.
  - Si existe un Deficit de energía; debe ser compensado en el sector.
  - Estas tareas pueden ser efectuadas mediante  $V_C$  y  $A_E$ , manteniendo la independencia de cada sector.

El exceso de energía de un sector cualquiera (i) se puede transferir a sectores o niveles de menor temperatura (por ej, sector j), con  $j > i$ , y que presenten un déficit de energía con la finalidad de cubrir total o parcialmente ese déficit

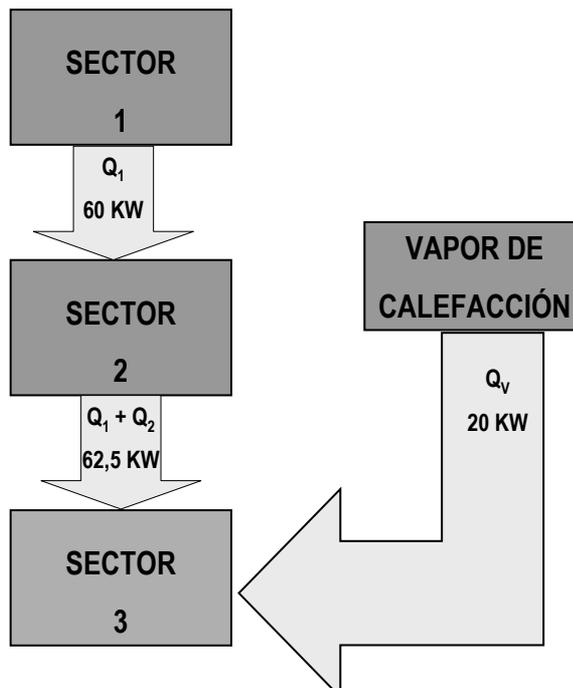
En el ejemplo:

- En los sectores 1 y 2 existe un exceso de energía (**total 62,5 kW**)
- El sector 3 presenta un déficit de energía (**82,5 kW**)
- La diferencia, de 20kW, hace inevitable el uso de servicios auxiliares

### Una posible solución (en paralelo)



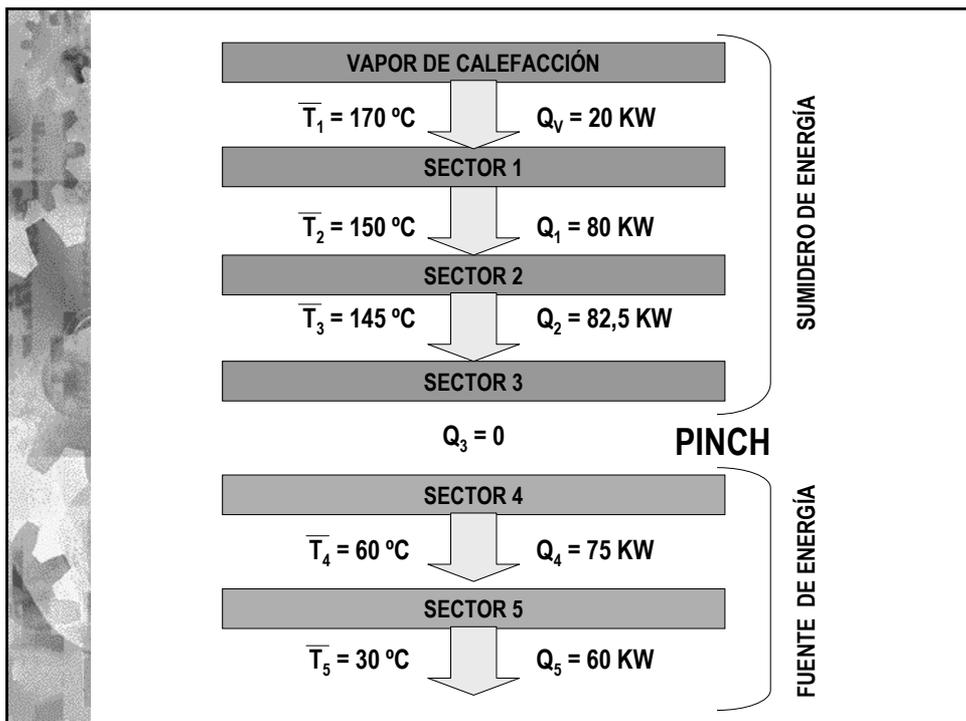
### Otra alternativa (en cascada)





## Resultado del esquema en cascada

- El sector deficitario 3 recibe de los sectores 1 y 2 la misma cantidad de energía que la que recibía en el esquema en paralelo.
- Las corrientes del Sector 2, intercambian calor con una mayor fuerza impulsora ( $\Delta T$ ), lo cual incide en la disminución del área de intercambio necesaria



## Tratamiento numérico del problema

1. Cambio de variable para las temperaturas reales (de  $\bar{T}$  a  $T$ )
2. Identificación de los valores de  $T_i$  para los cuales una corriente de proceso ingresa al sistema de intercambio o lo abandona
3. Cálculo del calor que demanda cada sector ( $Q_i$ )
4. Uso del principio de la disposición en cascada, adicionado la menor cantidad de calor de calefacción ( $Q_v$ ) por el extremo caliente

$$S_1 = Q_1 - Q_v$$

$$S_2 = Q_1 + Q_2 - Q_v$$

$$S_3 = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_v$$

## Para el ejemplo

$$S_1 = -60 \text{ KW} - Q_v$$

$$S_2 = -60 \text{ KW} - 2,5 \text{ KW} - Q_v = -62,5 \text{ KW} - Q_v$$

$$S_3 = -60 \text{ KW} - 2,5 \text{ KW} + 82,5 \text{ KW} - Q_v = 20 \text{ KW} - Q_v$$

$$S_4 = -60 \text{ KW} - 2,5 \text{ KW} + 82,5 \text{ KW} - 75 \text{ KW} - Q_v = -55 \text{ KW} - Q_v$$

$$S_5 = -60 \text{ KW} - 2,5 \text{ KW} + 82,5 \text{ KW} - 75 \text{ KW} + 15 \text{ KW} - Q_v = -40 \text{ KW} - Q_v$$

- $Q_v \leq 0$

- El menor consumo de vapor corresponde al menor valor de  $Q_v$ , tal que hace negativas o nulas todas las sumas parciales. En este ejemplo:  $Q_v = 20 \text{ KW}$

## Propiedades del PINCH

- Para el diseño de RIC de MER, el nivel de temperatura correspondiente al PINCH separa al problema en dos regiones.
- Sobre el PINCH, región “sumidero” de energía (toma calor del vapor de calefacción, pero no entrega calor a la región por debajo del PINCH)
- Debajo del PINCH, región “fuente” de calor (no toma calor de ningún lado, pero si cede calor al agua de enfriamiento).
- No debe haber transferencia de energía a través del mismo (condición de MER)

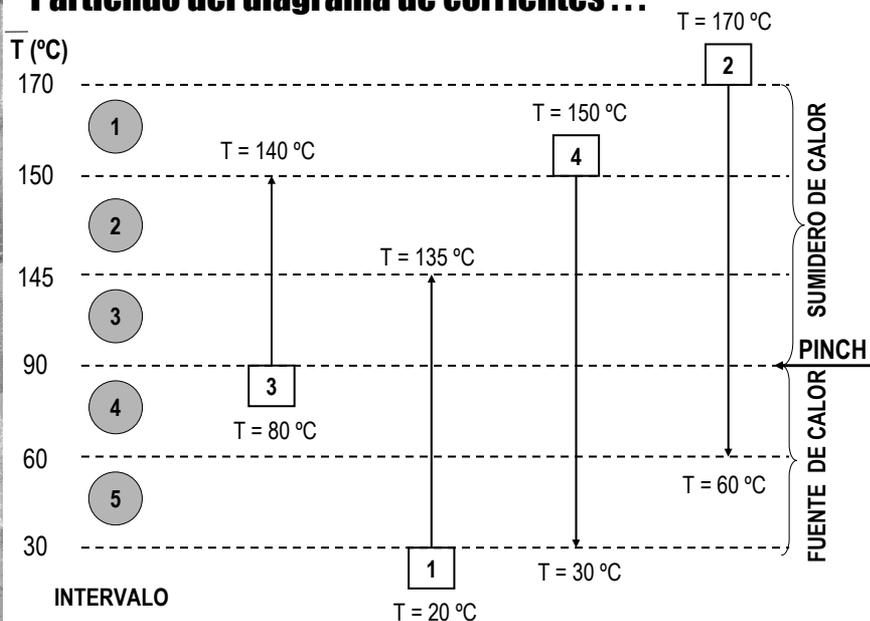
## ¿Qué ocurre si se viola la independencia térmica de las regiones separadas por el PINCH?

- Si se utiliza parte del calor disponible ( $\delta Q$ ) pertenecientes a la región que actúa como sumidero para satisfacer parcialmente las necesidades de las corrientes frías de la región fuente, se transfiere de calor ( $\delta Q$ ) a través del PINCH. es negativo
- Para realizar las mismas tareas sobre las corrientes integradas necesitamos mas servicios auxiliares, ya que:
  - $Q_V$  se ha transformado en  $Q_V + \delta Q$
  - $Q_{AE}$  se ha transformado en  $Q_{AE} + \delta Q$
- La transferencia de calor a través del PINCH ha causado un aumento de la fuerza impulsora ( $\Delta T$ ) entre las corrientes integradas

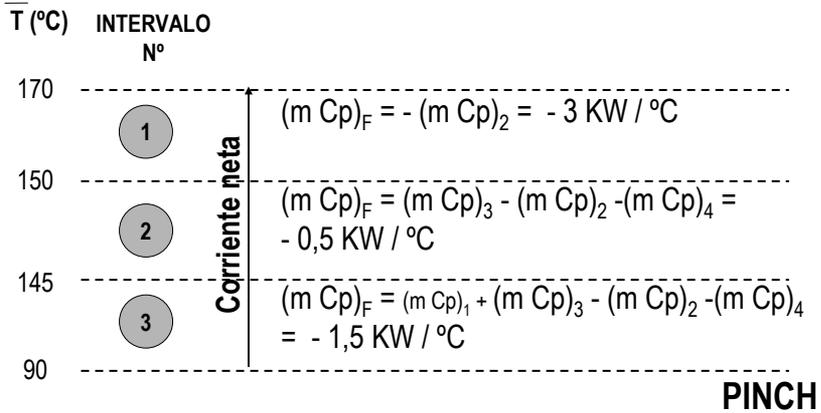
## Perfil neto de corrientes efectivas para las regiones fuente y sumidero

- Representar al conjunto de corrientes frías y calientes incluidas en la zona de proceso que actúa globalmente como sumidero de calor, como integrando una corriente neta o efectiva fría, la cual para ser calentada requerirá una cantidad de calor igual a la que la “zona sumidero” demanda del servicio auxiliar de calefacción,  $Q_V$ .
- De igual forma, las corrientes frías y calientes incluidas en la zona fuente, pueden conformar la corriente neta o efectiva caliente.

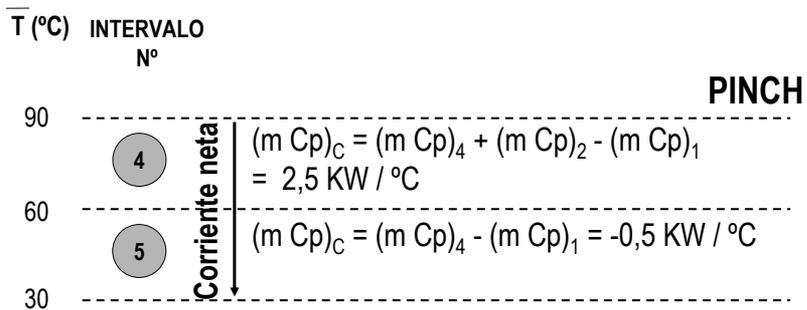
### Partiendo del diagrama de corrientes ...

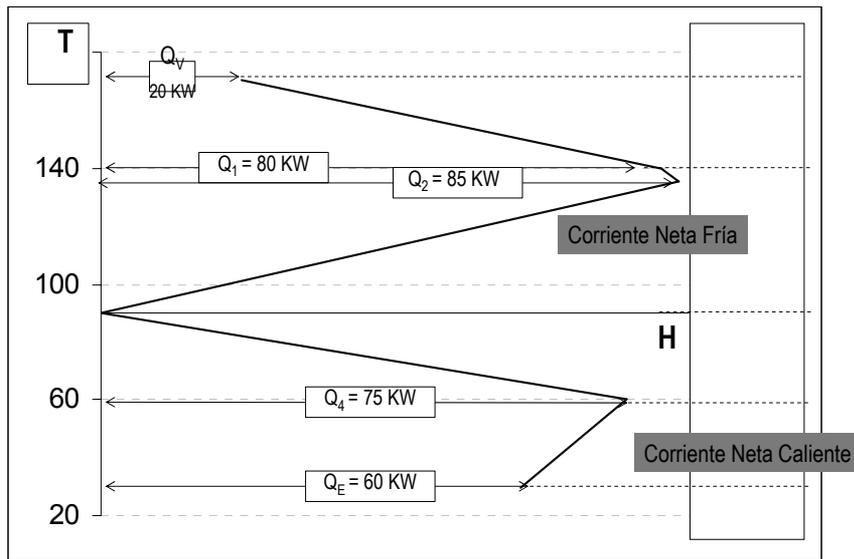


## Corriente neta Fría en la zona “sumidero”



## Corriente neta *caliente* en la zona “fuente”





## Diseño óptimo de la RIC

Los diseños RIC más económicos presentan dos propiedades :

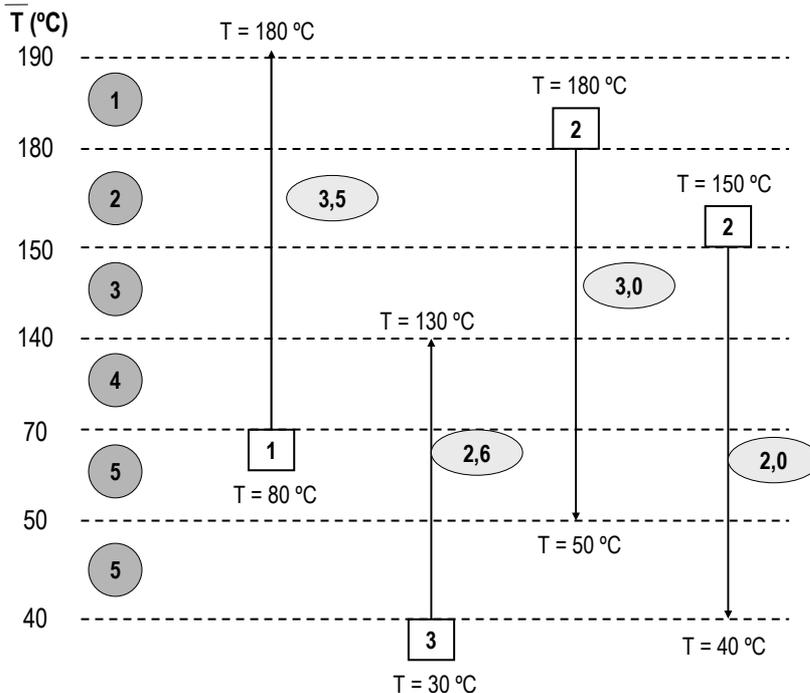
- El consumo de servicios de calefacción y de enfriamiento se ha minimizado y se opera en las proximidades del PINCH del proceso
- El número de unidades requerido para maximizar el flujo de calor recuperado, ha sido reducido también a un valor mínimo

## Datos Ejemplo 2

Tipo y nro de corriente	Temp de entrada (°C)	Temp de salida deseada (°C)	Flujo de capacidad calorífica (KWI/°C)	Calor a intercambiar (KW)
<b>f<sub>1</sub></b>	80	180	3,5	430
<b>C<sub>2</sub></b>	180	50	3,0	-390
<b>f<sub>3</sub></b>	30	130	2,6	260
<b>C<sub>4</sub></b>	150	40	2,0	-220

$\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$       Temp vapor = 200°C      Temp agua enf = 25°C

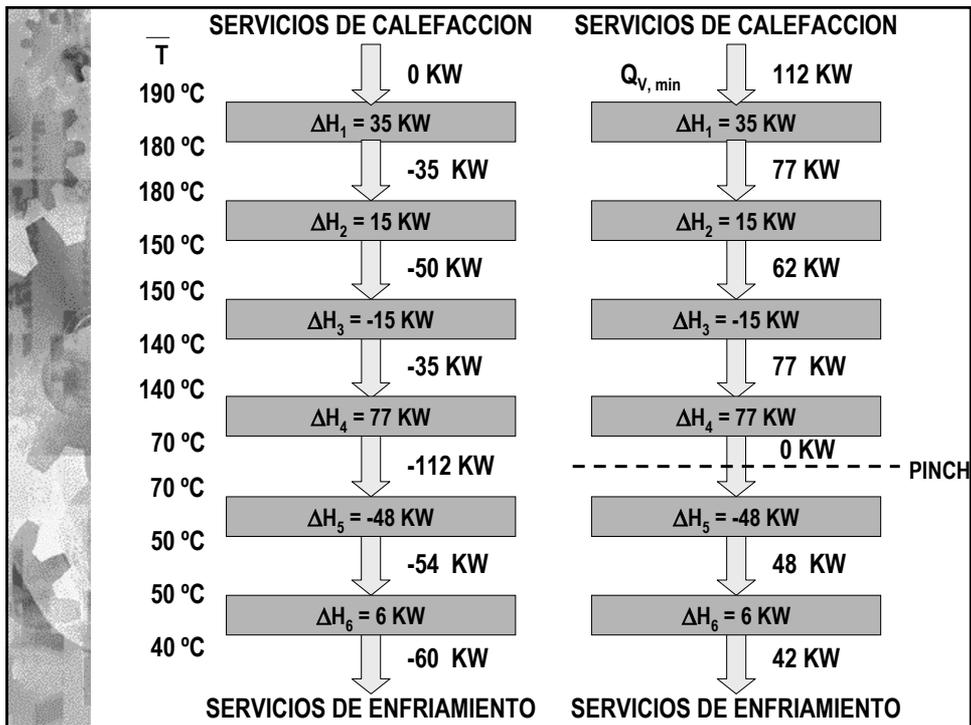
### Diagrama de Corrientes – Ejemplo 2



## Tabla del Problema – Ejemplo 2

NIVEL (k)	$T_i - T_{i+1}$ (°C)	$(m C_p)_{f,i} -$ $(m C_p)_{c,i}$	$\Delta H_k$ (KW)	EXCESO O DEFICIT
1	10	3,5	35	Déficit
2	30	0,5	15	Déficit
3	10	-1,5	-15	Exceso
4	70	1,1	77	Déficit
5	20	-2,4	-48	Exceso
6	10	0,6	6	Déficit

- Se construye la cascada de calor, suponiendo que no se recibe calor de los servicios de calefacción.
- Aparecen así, flujos calóricos de signo negativos entre niveles, los cuales carecen de sentido.
- El flujo más negativo corresponde al PINCH
- Para que la cascada sea termodinámicamente factible los flujos calóricos tienen que ser no negativos, por lo que el  $Q_{v, \min}$  debe ser 112 KW
- El PINCH ocurre:
  - A una temperatura de 70 °C
  - Entre los niveles 4 y 5



## Consumo de Servicios Auxiliares

➤ RED sin Integración: Sumar los flujos calóricos a suministrar a las corrientes frías ( $\Delta H_f$ ) y a eliminar en las corrientes calientes ( $\Delta H_C$ )

$$\text{En total: } (420 + 390 + 260 + 220) = 1290 \text{ KW}$$

➤ RIC: Al aumentar el grado de integración la carga total baja. Con la máxima integración queda:

$$(\Delta H_f - \Delta H_C - Q_i) = (390 + 220 - 42) = 568 \text{ KW}$$

Conclusión: Reducción del consumo de SA en 44 %

## En resumen

La minimización de los requerimientos de serv. auxiliares

Disminución del costo operativo anual

Disminución de área de transferencia

Establecido el valor de área de transferencia, los costos fijos de la red no quedan automáticamente definidos

Depende del número de unidades

$$\text{Costo} = \alpha (\text{Area})^\beta$$

- Todos los diseños de la RIC que minimizan las necesidades de servicios auxiliares presentan la misma carga calórica total ( $\Delta H_f - \Delta H_C - Q_i$ ).
- Cuando el número de intercambiadores es cercano al mínimo, la carga de cada equipo se maximiza.
- Los diseños más económicos favorecen la implementación de empalmes calóricos entre aquellas corrientes que pueden intercambiar entre si un flujo calorífico relativamente alto. Esta situación se da cuando:
  - Las capacidades caloríficas globales de ambas corrientes son similares
  - Los rangos de temperatura presentan una superposición extensa



## **PROCEDIMIENTO ALTERNATIVO PARA AL DETERMINACIÓN DEL CONSUMO MÍNIMO DE SERVICIOS.**

### **METODO DEL TRANSPORTE**



#### **Redefinición de los niveles de temperatura del problema**

En la curva compuesta, correspondiente a las corrientes calientes, su pendiente cae bruscamente de derecha a izquierda en un diagrama T – H cuando se produce el ingreso de una nueva corriente (tipo diente de sierra que apunta hacia la otra corriente).

Para la corriente compuesta fría, idem a la anterior pero se observa de izquierda a derecha

Al realizar el desplazamiento de la curva fría hacia la izquierda, algún “diente de sierra” originará el primer punto de contacto de ambas curvas (PINCH)

EL PINCH



Ocurre a la  $T_e$  de una de las corrientes

En consecuencia, si se generan los niveles de temperatura del problema a partir de las  $T_e$  de las corrientes exclusivamente, no se modifican los resultados que se obtendrían.

Para este ejemplo: (180, 150, 70, 40)

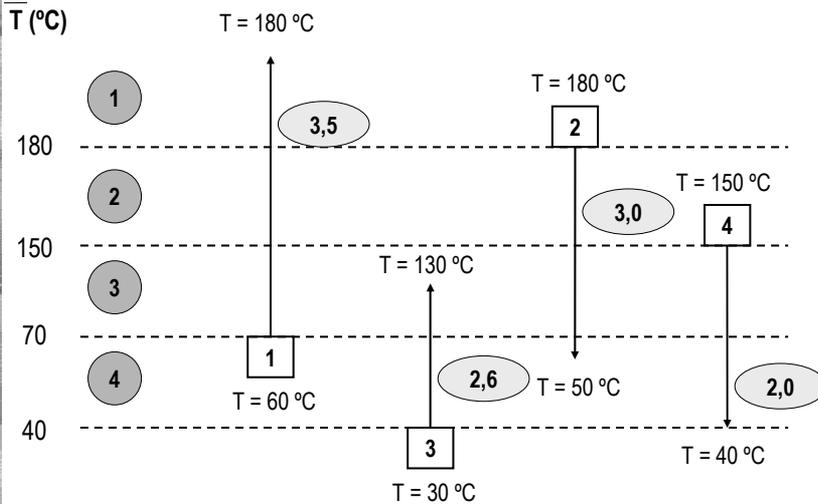
Aquí se pueden construir 3 intervalos.

- Se debe incluir un nivel adicional en el tope de la cascada de calor si existen demandas de calor que no puedan ser cubiertas por ninguna de las corrientes de proceso.

En el ejemplo ocurrirá si se presenta requerimientos energéticos a temperaturas superiores a 170 °C

- Se debe incluir otro nivel adicional en el fondo de la cascada de calor si existen ofrecimientos de calor que no puedan ser removidos por ninguna de las corrientes frías

En el ejemplo ocurrirá si la temperatura de salida de las corrientes calientes es inferior a 40 °C



Ahora se puede desarrollar la tabla del problema, la cual es más reducida ya que ha disminuido el número de intervalos (de 6 a 4)

## Sub - corrientes

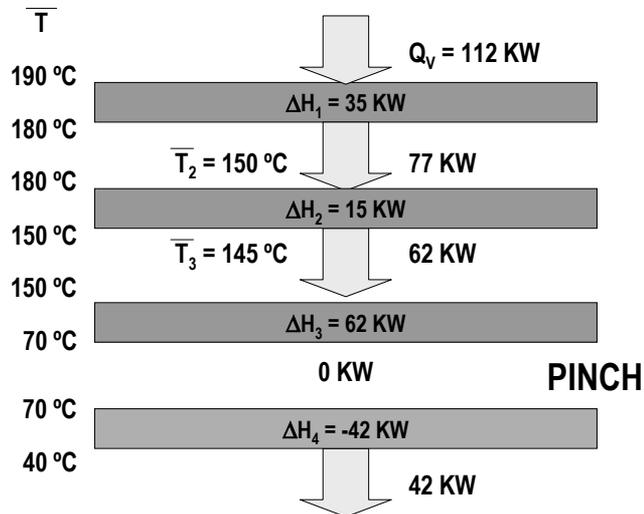
- Los niveles de temperatura del problema dividen a cada corriente en tramos o sub - corrientes.
- Cada sub – corriente queda caracterizada por dos índices:
  - El primero indica la corriente a la que pertenece y
  - El segundo señala el nivel térmico del tramo

Así  $f_{1,1}$  representa el tramo de la corriente  $f_1$  de nivel térmico 1

Redefinición de los niveles de temperatura

Nivel (k)	Corrientes (i)	Sub - corriente (i,k)	(m Cp) <sub>i</sub> (KW / °C)	T <sub>i,k</sub> - T <sub>i,k+1</sub> (°C)	ΔH <sub>i,k</sub> (KW)	ΣΔH <sub>i,k</sub> (KW)
1	f <sub>1</sub>	f <sub>11</sub>	3,5	10	35	35
2	f <sub>1</sub>	f <sub>12</sub>	3,5	30	105	15
	C <sub>2</sub>	C <sub>22</sub>	3,0	30	-90	
3	f <sub>1</sub>	f <sub>13</sub>	3,5	80	280	62
	C <sub>2</sub>	C <sub>23</sub>	3,0	80	-240	
	f <sub>3</sub>	f <sub>33</sub>	2,6	70	182	
	C <sub>4</sub>	C <sub>43</sub>	2,0	80	-160	
4	C <sub>2</sub>	C <sub>24</sub>	3,0	20	-60	-42
	f <sub>3</sub>	f <sub>34</sub>	3,6	30	78	
	C <sub>4</sub>	C <sub>44</sub>	2,0	30	-60	

## Cascada de calor



SERVICIOS DE ENFRIAMIENTO

## El tableau de consumo mínimo de servicios

- El número de filas es igual al número de intervalos e temperatura mas uno.
- Cada fila esta asociada a la demanda de calor de un determinado sector de temperaturas (excepto la última que se reserva para el agua de enfriamiento)
- Se asigna a la fuente fría una demanda de calor lo suficientemente grande como para que sea capaz de recibir todo el flujo calórico disponible en las corrientes calientes. (por ej. 10000 KW)
- A la izquierda de cada fila se indica el valor de la demanda de calor de ese intervalo.
- Cada columna del tableau está vinculada a a la oferta de calor en un determinado intervalo de temperatura (la última columna corresponde al servicio de calefacción)

Para que el balance energético global se cumpla:

La suma de las demandas de calor provenientes de las corrientes frías y del servicio de enfriamiento

=

La suma de todas las disponibilidades de calor de las corrientes calientes y del servicio de calefacción

Para el servicio de calefacción:

$$\begin{aligned}Q_V &= Q_A + \Delta H_f + \Delta H_C \\ &= 10000 \text{ KW} + 680 \text{ KW} - 610 \text{ KW} \\ &= 10070 \text{ KW}\end{aligned}$$

## Algunas consideraciones mas....

El tableau del problema

- Cada demanda de calor ( $f_j$ ) debe ser satisfecha utilizando la disponibilidad de calor existentes en las corrientes calientes y si esta no fuera suficiente se recurre a servicios de calefacción.
- Cada oferta de calor ( $C_i$ ) debe ser utilizada para satisfacer las demandas energéticas de las corrientes frías y si hubiera excedente se elimina recurriendo al servicio de enfriamiento.
- Hay que tener en cuenta que la disponibilidad de calor de un cierto nivel no puede ser utilizada para satisfacer las demandas de niveles superiores. (Termodinámica no es posible). En este ejemplo los empalmes ( $f_1, C_2$ ), ( $f_2, C_3$ ) son no factibles (NF)

El tableau del problema

		(90)	(400)	(120)	(10070)	
		Calientes				
		Frías	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$V$
(35)	$f_1$	NF	NF	NF	35	} $Q_{V, \min} = 112$ KW
(105)	$f_2$	90	NF	NF	15	
(462)	$f_3$		400	NF	62 (PINCH)	
(78)	$f_4$			78		
(10000)	$A$			42	9958	
				} $Q_{A, \min} = 42$ KW		

## **Demanda mínima de servicios de calefacción**

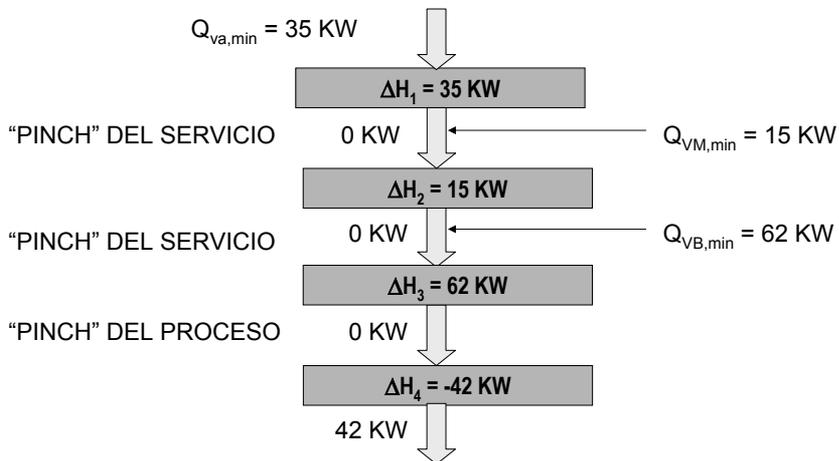
- Se obtiene como la suma de los flujos caloríficos que aparecen en la columna V (a excepción de la celda (A, V), para este ejemplo 112 KW.
- Una información adicional que brinda es el nivel térmico de esa demanda (brinda un perfil de temperatura de la demanda energética a ser cubierta)

## **Demanda mínima de servicios de enfriamiento**

- Se calcula como la suma de los valores que aparecen en los casilleros de la última fila, con excepción de la celda (A, V). Para este ejemplo: 4 2KW

# Cascada de calor

## Se utilizan tres servicios de calefacción a distintos niveles térmicos



## Consideración de las restricciones de diseño

- El Tableau del problema es imprescindible cuando se deben considerar ciertas restricciones que impiden la ejecución de determinados intercambios calóricos
- Es conveniente trabajar con sub – corrientes en lugar de con supercorrientes

**Consideración de las restricciones de diseño**

- El número de filas es igual al de sub – corrientes frías mas uno.
- El número de columnas es igual al de sub – corrientes calientes mas uno.
- Amas se ordenan por niveles térmicos decrecientes
- Los servicios se colocan en la última fila y en la última columna

**Consideración de las restricciones de diseño**

		(90)	(240)	(160)	(60)	(60)	(10070)
<b>C</b>		<b>C<sub>22</sub></b>	<b>C<sub>23</sub></b>	<b>C<sub>43</sub></b>	<b>C<sub>24</sub></b>	<b>C<sub>44</sub></b>	<b>V</b>
<b>F</b>							
(35)	<b>f<sub>11</sub></b>	NF	NF	NF	NF	NF	35
(105)	<b>f<sub>12</sub></b>	90	NF	NF	NF	NF	15
(280)	<b>f<sub>13</sub></b>		240	40	NF	NF	
(182)	<b>f<sub>33</sub></b>			120	NF	NF	62 (PINCH)
(78)	<b>f<sub>34</sub></b>				60	18	
(10000)	<b>A</b>					42	9958

- Si por ejemplo, por razones de seguridad, es conveniente evitar la ejecución del intercambio calórico entre las corrientes  $f_3$  y  $C_2$ , se bloquean estos casilleros en el tableau, colocando NF.
- Esto significa que el flujo calórico disponible en la corriente  $C_2$  solo puede ser empleado para calefaccionar la corriente fría  $f_1$ .

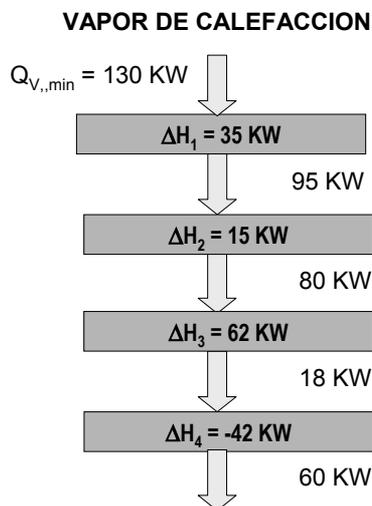
**Tableau cuando se prohíbe el empalme calórico  $f_3/C_2$**

		(90)	(240)	(160)	(60)	(60)	(10070)	
		<b>C</b>					<b>V</b>	
<b>F</b>		<b>C<sub>22</sub></b>	<b>C<sub>23</sub></b>	<b>C<sub>43</sub></b>	<b>C<sub>24</sub></b>	<b>C<sub>44</sub></b>	<b>V</b>	
35)	<b>f<sub>11</sub></b>	NF	NF	NF	NF	NF	35	} $Q_{V, \min} = 130$ KW
05)	<b>f<sub>12</sub></b>	90	NF	NF	NF	NF	15	
80)	<b>f<sub>13</sub></b>		240	40	NF	NF		
82)	<b>f<sub>33</sub></b>	NF	NF	120	NF	NF	62 (PINCH)	
78)	<b>f<sub>34</sub></b>	NF	NF		NF	60	18	
(100)	<b>A</b>				60		9940	

$Q_{A, \min} = 42$  KW

- La lectura de la oferta calórica de la columna V indica un incremento de los requerimientos de servicios auxiliares (de 112 Kw a 130 KW)
- Naturalmente, la demanda de servicios de enfriamiento también se incrementa en 18 unidades (pasa de 42 KW a 60 KW)
- Esto se debe a que la restricción impide que se alcance el PINCH del proceso

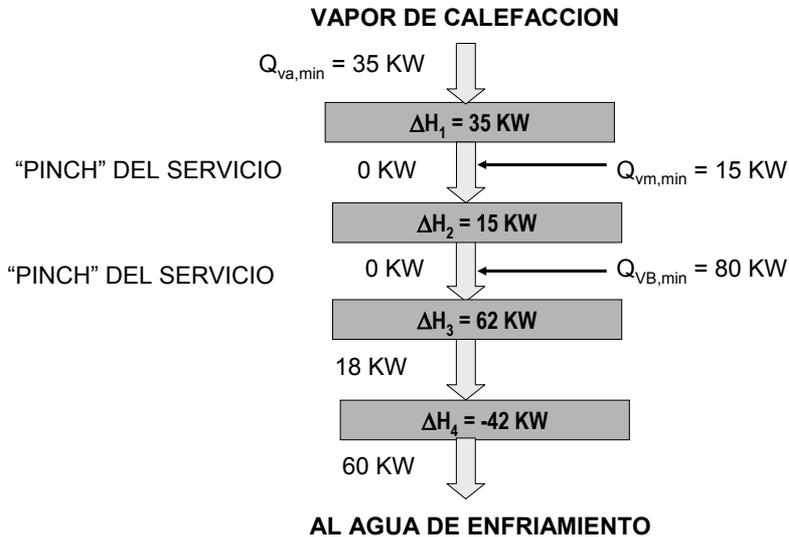
### Cascada de calor cuando se prohíbe el empalme calórico $f_3/C_2$



**NO HAY  
PINCH**

AL AGUA DE ENFRIAMIENTO

**Cascada de calor, si se utilizan tres servicios de calefacción a distintos niveles térmicos y se prohíbe el empalme calórico  $f_3/C_2$**



- Si se emplean tres servicios de calefacción a distintos niveles térmicos aún cuando se prohíbe el empalme calórico  $f_3/C_2$  aparecen dos PINCH en la cascada (PINCH DEL SERVICIO) correspondientes a los servicios de calefacción de los niveles 2 y 3.
- Solo ha desaparecido el PINCH de menor temperatura, que es el verdadero PINCH del proceso
- Lo verdaderamente peculiar en este caso es la ausencia del PINCH del proceso a pesar de requerirse tanto servicios de calefacción como de enfriamiento



# **PROCEDIMIENTO DE GENERACIÓN DE UNA RIC CARACTERIZADA POR UN CONSUMO MÍNIMO DE SERVICIOS**



## **Algunas consideraciones previas:**

El procedimiento para la generación de una RIC donde los requerimientos de servicios se han minimizado estará basado en las propiedades del PINCH

En general, una RIC puede considerarse como formada por dos sub – redes independientes, que no interactúan entre si.

Cada una de ellas involucra:

- Un conjunto de diferentes sub – corrientes calientes y frías
- Un único servicio (de calefacción o enfriamiento)

## Tableau del problema de transporte de cada sub - problema

F \ C	V	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>43</sub>
F <sub>11</sub>	35	NF	NF	NF
F <sub>12</sub>	77	28	NF	NF
F <sub>13</sub>		62	218	
F <sub>33</sub>			22	160

Sobre el "PINCH"

$$\begin{aligned} \bullet N_{\text{MIN}} &= n_{\text{corr.}} + N_{\text{serv.}} - 1 = \\ &= 4 + 1 - 1 = 4 \end{aligned}$$

F \ C	C <sub>24</sub>	C <sub>44</sub>
F <sub>34</sub>	60	18
A		42

Debajo del "PINCH"

$$\begin{aligned} \bullet N_{\text{MIN}} &= n_{\text{corr.}} + N_{\text{serv.}} - 1 = \\ &= 3 + 1 - 1 = 3 \end{aligned}$$

- Una condición que distingue a los mejores diseños de RIC es la minimización del número de intercambiadores requeridos para maximizar la recuperación energética.
- Esto implica haber maximizado la cantidad de calor intercambiado en cada unidad (realizar empalmes calóricos entre pares de corriente frías y calientes que posean similares ( $m C_p$ ) y rangos de temperatura)

# Configuración de la RIC

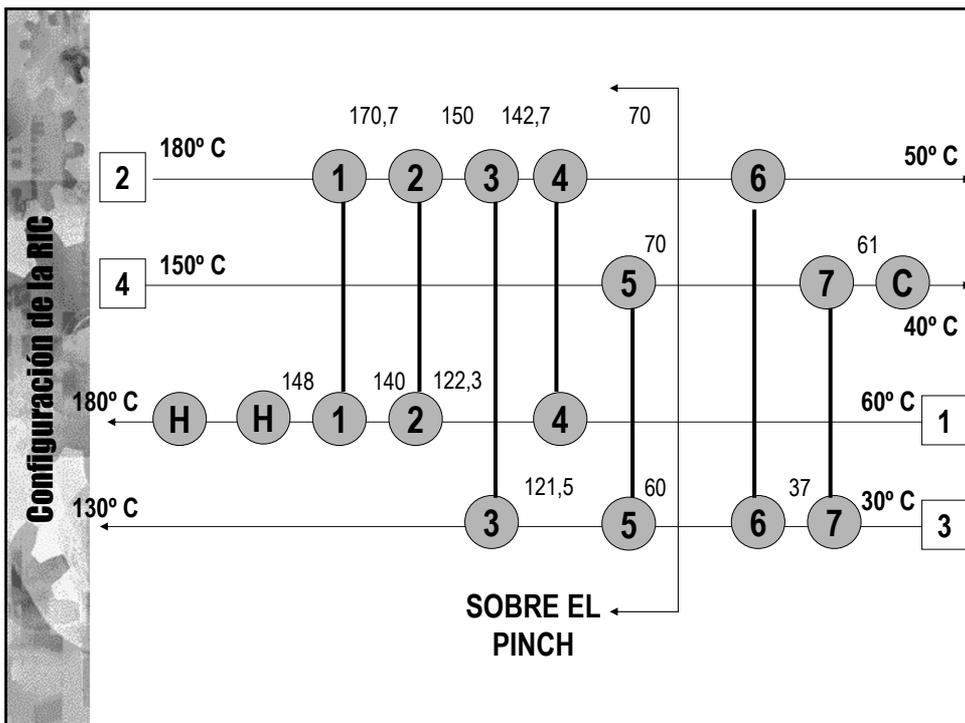
La información contenida en el tableau se utiliza para generar las configuraciones iniciales de las sub – redes superior e inferior.

Representación tipo grilla propuesta por Linnhoff y Flower

- Cada intercambio calórico entre dos corrientes aparece representado por dos círculos ubicados sobre las líneas correspondientes, unidos por una raya vertical.
- Los calentadores (H) y los enfriadores © se indican mediante un único círculo sobre la corriente que corresponda.
- Las unidades de intercambio calórica han sido dispuestas estrictamente en el orden en el que aparecen en el tableau.
- En el caso de las unidades 3 y 4, cuyas posiciones en la grilla se han invertido, se debe al hecho de que una de esas unidades, indefectiblemente, lleva a cabo un empalme calórico PINCH

# Empalme calórico PINCH

- Es toda transferencia calórica que se inicia o completa a la temperatura del PINCH. (en este ejemplo en la unidad 4)
- Las corrientes que intervienen en un empalme calórico PINCH deben satisfacer ciertos requisitos para que sea factible termodinámicamente:
  - Para la sub – red superior:
 
$$(m Cp)_f \geq (m Cp)_C$$
  - Para la sub – red inferior:
 
$$(m Cp)_f \leq (m Cp)_C$$



Se ha sintetizado una RIC que contiene:

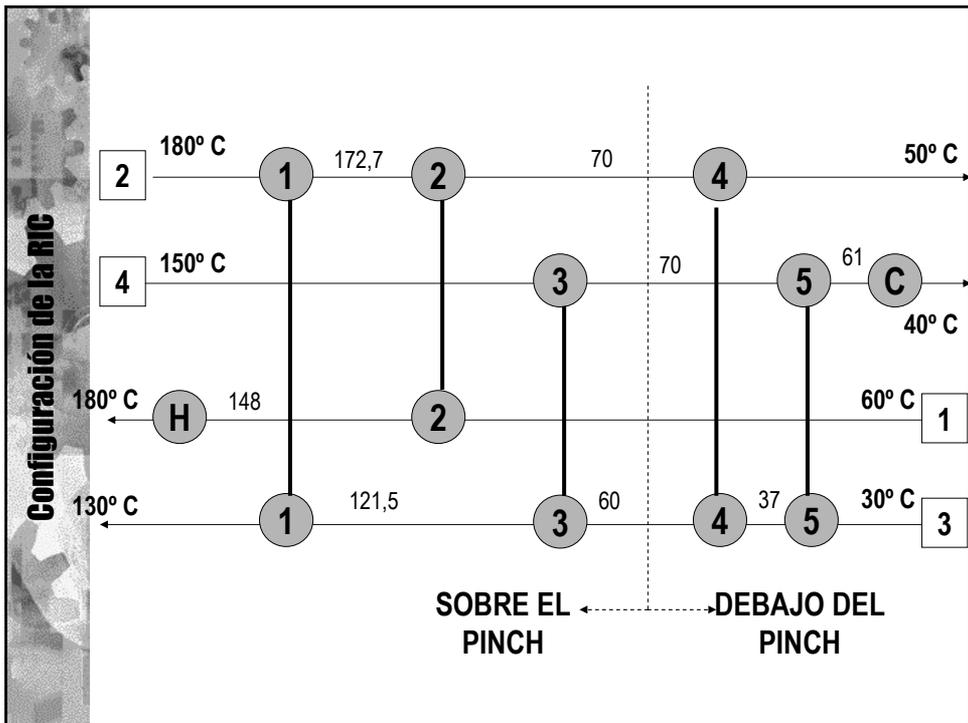
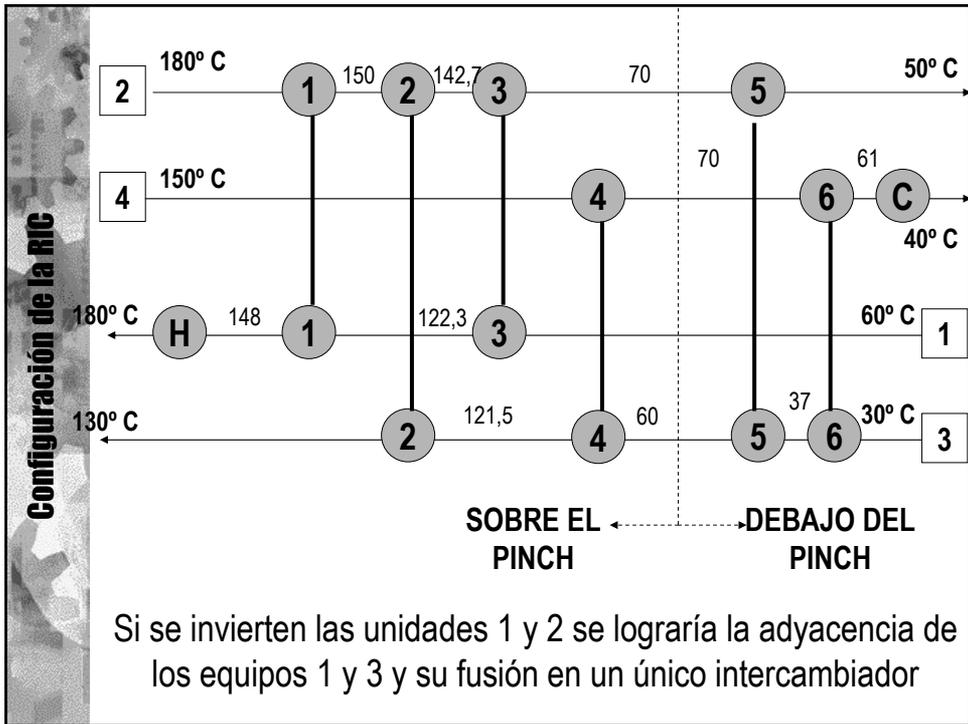
- 2 calentadores
- 1 enfriador
- 7 intercambiadores
- La demanda de servicios de calefacción y enfriamiento en el diseño propuesto se ha minimizado.

Esta red permite disminuir los costos operativos (hasta llegar a los valores del PINCH), sin embargo la inversión requerida por la red incluida puede llegar a ser importante

## Reducción del número de unidades

- Se puede proceder a anexar unidades cuando:
- Llevan a cabo empalmes calóricos entre el mismo par de corrientes fría y caliente.
- Ocupan posiciones adyacentes en al red
- La anexión es termodinámicamente factible.

Por ejemplo, los dos calentadores, que suministran calor a al corriente f1, se pueden transformar en un único equipo. Igual procedimiento se puede aplicar para las unidades 1 y 2





Como ya no se pueden realizar  
mas modificaciones sobre la red,  
todo indicaría que se ha sintetizado  
una RIC caracterizada por un costo  
operativo y de inversión mínimo



**Predicción del número  
mínimo de equipos de  
intercambio calórico**

## Cuando el proceso presenta un PINCH

El número mínimo de equipos en cada sub - red (superior o inferior) esta dada por:

$$N_{\min} = F + C + S - 1$$

Donde:

**F:** nro de corrientes frías

**C:** nro de corrientes calientes

**S:** nro de servicios utilizados en la sub - red

En este ejemplo:

$$N_{\min}^{(\text{SUP})} = 2 + 2 + 1 - 1 = 4$$

$$N_{\min}^{(\text{INF})} = 1 + 2 + 1 - 1 = 3$$



**La RIC  
comprende 7  
unidades**

## Cuando el proceso no presenta un PINCH

El proceso total se comporta como una sub - red

El número mínimo de equipos esta dada por:

$$N_{\min} = F + C$$

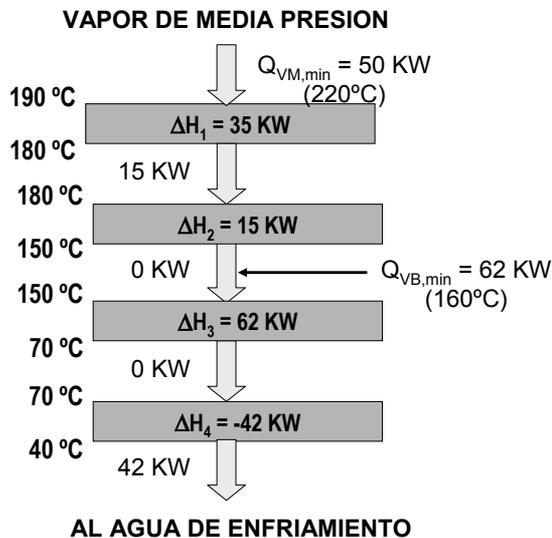
Donde:

**F:** nro de corrientes frías

**C:** nro de corrientes calientes

# USO DE MÚLTIPLES SERVICIOS DE CALEFACCIÓN

## CASCADA DE CALOR CUANDO SE EMPLEAN DISTINTOS TIPOS DE SERVICIOS DE CALEFACCIÓN



		(50)	(90)	(62)	(240)	(160)
	<b>C</b>	<b>V<sub>M</sub></b>	<b>C<sub>22</sub></b>	<b>V<sub>B</sub></b>	<b>C<sub>23</sub></b>	<b>C<sub>43</sub></b>
<b>F</b>						
(35)	<b>f<sub>11</sub></b>	35				
(105)	<b>f<sub>12</sub></b>	15	90			
(280)	<b>f<sub>13</sub></b>			62	218	
(132)	<b>f<sub>33</sub></b>				22	160